

ELECTRIFICACIÓN DE UN SISTEMA FÉRREO EN COLOMBIA

DANIEL LONGAS SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ÁREA TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
MEDELLÍN  
2018

ELECTRIFICACIÓN DE UN SISTEMA FÉRREO EN COLOMBIA

DANIEL LONGAS SÁNCHEZ

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Área Transmisión y  
Distribución de Energía Eléctrica

Director

Andrés Emiro Díez Restrepo, IE, PhD

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

MAestrÍA EN INGENIERÍA ÁREA TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

MEDELLÍN

2018

29 de junio de 2018

Daniel Longas Sánchez

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 85 Régimen Discente de Formación Avanzada.

*Daniel longas Sánchez*

---

## DEDICATORIA

A mis padres, quienes por la gracia de Dios  
me dieron las facultades para luchar y  
perseverar por mis objetivos

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus agradecimientos a:

Andrés Emiro Díez, por su acompañamiento, dedicación y enseñanzas durante la elaboración de este trabajo.

Daniel Arroyave, por su colaboración y dedicación para obtener los resultados de las simulaciones.

A todos aquellos que de alguna u otra forma ayudaron para que este proyecto se realizara y sirvieron de apoyo para terminar mi trabajo de grado con éxito.



1.4	MODOS DE OPERACIÓN .....	56
1.4.1	OPERACIÓN NORMAL.....	56
1.4.2	Falla de un transformador de tracción.....	57
1.4.3	Falla de una SET .....	58
1.5	PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....	60
1.5.1	Tensiones y frecuencias de la catenaria.....	60
1.5.2	Potencia de los equipos inductivos .....	62
1.5.3	Desbalances en la red trifásica .....	64
1.5.4	Fluctuaciones de Voltaje y <i>Flicker</i> .....	67
1.6	MATERIAL RODANTE .....	72
1.6.1	Locomotora.....	72
1.6.2	Vagones .....	78
 <b>CAPÍTULO 2</b>		
<b>CASO DE ESTUDIO .....</b>		<b>81</b>
2.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	82
2.2	DIMENSIONAMIENTO DEL MATERIAL RODANTE .....	85
2.2.1	Selección de los vagones .....	86
2.2.2	Selección de la locomotora .....	86
2.3	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ELECTRIFICACIÓN .....	95
 <b>CAPÍTULO 3</b>		
<b>CASO BASE .....</b>		<b>100</b>
3.1	FUERZA DE TRACCIÓN .....	101
3.1.1	Fuerza de tracción inicial.....	101

3.1.2	Fuerza de tracción máxima .....	102
3.1.3	Fuerza de tracción a plena potencia .....	103
3.2	RESISTENCIA A LA RODADURA .....	103
3.3	RESISTENCIA POR PENDIENTE LONGITUDINAL .....	107
<b>CAPITULO 4</b>		
<b>CASO COMPLETO.....</b>		<b>110</b>
4.1	FRECUENCIA DE DESPACHO .....	111
4.2	UBICACIÓN DE LAS SET, ATI Y ATM .....	111
4.2.1	Ambos trenes en terreno plano .....	114
4.2.2	Un tren en ascenso y otro en descenso .....	115
4.2.3	Ambos trenes en ascenso.....	115
4.2.4	Un tren en ascenso y otro en terreno plano .....	116
4.3	SELECCIÓN DE LA CATENARIA .....	117
4.4	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....	120
4.4.1	Simulación del caso de mayor demanda de potencia.....	120
4.4.2	Simulación del caso de dos trenes .....	122
4.4.3	Simulación en DIgSILENT .....	125
<b>CAPITULO 5</b>		
<b>ANÁLISIS FINANCIERO .....</b>		<b>133</b>
5.1	PARÁMETROS INICIALES.....	135
5.1.1	Datos del material rodante.....	135
5.1.2	Información financiera .....	136
5.1.3	Información operativa .....	138



5.1.4	Sistema eléctrico .....	139
5.1.5	Comentarios respecto a la electrificación .....	145
5.2	BALANCE INICIAL .....	146
5.2.1	GASTOS DE MANTENIMIENTO .....	147
5.3	DATOS FINANCIEROS .....	148
5.4	VENTA PROYECTADA .....	150
5.5	GASTOS PROYECTADOS .....	151
5.6	FLUJO DE CAJA INVERSIONISTA .....	155
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>159</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>162</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>163</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>171</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre los esquemas de conexión.....	56
Tabla 2. Tensiones permitidas según IEC 60850 [27], [39] .....	61
Tabla 3. Sobrecargas permitidas por clase de servicio de acuerdo a la EN 50329 .....	63
Tabla 4. Límites para variaciones relativas de potencia en función del número de variaciones por minuto de acuerdo con el estándar de la IEC 61000 3-7 [51, p. 22] .....	71
Tabla 5. Comparativa entre diferentes fabricantes de locomotoras [55, pp. 1–4], [63, p. 2], [74, pp. 15–17], [75, p. 16], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91] .....	88
Tabla 6. Análisis comparativo entre los sistemas de corriente continua y alterna [17], [19], [20], [22], [31], [93], [94] .....	96
Tabla 7. Especificaciones del material rodante [79], [63], [92], [96] .....	100
Tabla 8. Pendiente máxima para mantener una velocidad de 120km/h.....	109
Tabla 9. Ubicación de las SET, ATI y ATM para la ruta Sanín - Poveda.....	112
Tabla 10. Características de los transformadores y AT empleados para el caso de estudio [5], [17], [20], [29].....	117
Tabla 11. Conductores empleados para el caso de estudio [105] .....	118
Tabla 12. Características de los conductores empleados [107], [108], [109] .....	118
Tabla 13. Ubicación geométrica de los conductores de la vía principal .....	119
Tabla 14. Ubicación geométrica de los conductores de la vía secundaria.....	119
Tabla 15. Potencia instantánea máxima por cada SET .....	122
Tabla 16. Parámetros de las LT empleadas .....	125
Tabla 17. Variaciones de potencia por SET de acuerdo a las fuentes .....	131

Tabla 18. Costos de cada locomotora [114], [115], [116], [117], [118] .....	135
Tabla 19. Ubicación de las SET y ATI la ruta Sanín – Poveda parcialmente electrificada ..	140
Tabla 20. Distancia de las LT .....	142
Tabla 21. Costos de los activos eléctricos .....	144
Tabla 22. Balance general de los activos a evaluar .....	147
Tabla 23. Gastos de mantenimiento .....	148
Tabla 24. Proyección de las ventas.....	150
Tabla 25. Proyección de la flota y gastos para cada caso.....	153
Tabla 26. VPN para cada caso.....	158

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un sistema de tracción eléctrica .....	34
Figura 2. Esquema de una catenaria con su estructura de soporte.....	42
Figura 3. Configuración típica de un sistema de alimentación en CC .....	45
Figura 4. Sistema de alimentación directo .....	48
Figura 5. Sistema de alimentación con TB y conductor de retorno .....	49
Figura 6. Sistema de alimentación dual.....	50
Figura 7. Conexión delta abierto- Estrella abierto o conexión (Vv) .....	53
Figura 8. Conexión Scott.....	54
Figura 9. Conexión Le Blanc.....	55
Figura 10. Esquema de operación normal en sistemas de CA .....	57
Figura 11. Esquema de operación ante falla de un transformador de tracción .....	58
Figura 12. Esquema de operación ante falla de la SET .....	59
Figura 13. Mapa de la norma para evaluación y límites de emisión fluctuaciones de tensión de cargas fluctuantes en alta y media tensión de acuerdo con la IEC 61000 3-7 [2] .....	67
Figura 14. Mapa de la norma para evaluación de emisión fluctuaciones de tensión y <i>flicker</i> de acuerdo a la IEC 61000 3-3 [2].....	68
Figura 15. Curva del PST=1 para diferentes tipos de lámparas [51, p. 34] .....	70
Figura 16. Convertidor de tracción para locomotoras duales.....	77
Figura 17. Ruta Sanín – Poveda con sus respectivas estaciones.....	84
Figura 18. Perfil de elevación de la Ruta Sanín – Poveda (suavizada) .....	85
Figura 19. Fuerzas en función de la velocidad para una locomotora ALP 45DP .....	106
Figura 20. Velocidad y fuerza en función de la distancia .....	121

Figura 21. Voltaje en el pantógrafo respecto a la posición .....	124
Figura 22. Topología del transformador de tracción en DigSILENT .....	126
Figura 23. Ubicación de las posibles SEs para alimentar las SET .....	127
Figura 24. Perfil de elevación de la Ruta Sanín – Poveda con tramos electrificados.....	142
Figura 25. Ejemplo de electrificación gradual en un sistema eléctrico múltiple (e.g., 1500V <sub>CC</sub> y 25kV <sub>CA</sub> ) [61].....	146
Figura 26. Flujo de caja libre del proyecto .....	157

## GLOSARIO

**ARMÓNICO:** “Una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental” [1, p. 3].

**BOGIE:** Conjunto de dos o tres pares de ruedas montadas sobre ejes que están paralelos y próximos entre sí en un bastidor, sirviendo como un subconjunto modular de ruedas y ejes que se emplea generalmente para vehículos largos.

**COMBUSTIBLE FÓSIL:** Son aquellos que se formaron hace millones de años, a partir de restos orgánicos de plantas y animales muertos, durante miles de años de evolución del planeta. Estos combustibles son; petróleo, carbón y gas natural.

**DESBALANCE:** En los sistemas trifásicos se presenta cuando las tensiones y/o ángulos entre fases consecutivas no son iguales.

**DIODO:** Dispositivo semiconductor que permite la circulación de la corriente en un solo sentido.

**ELEVACIÓN DE TENSIÓN:** Incremento del valor eficaz de la tensión entre el 1,1 y el 1,8 p.u. de la tensión de funcionamiento normal, con una duración de entre medio ciclo (8 ms ó 10 ms) y varios segundos. En inglés en general se denomina *Swell*.

**FEEDERS:** Cables que conducen la corriente eléctrica desde la SE al tren.

**FLICKER:** “Inestabilidad de la sensación visual inducida por estímulos de luz en los cuales fluctúa la luminosidad o la distribución espectral” y en consecuencia puede causar efectos nocivos sobre los seres humanos [2].

**FLUCTUACIONES DE VOLTAJE:** Se producen por las variaciones de la carga, es decir, la cantidad de trenes que se encuentran cercanos a una misma SE frenando o arrancando al mismo tiempo.

**HUECO DE TENSIÓN:** Disminución del valor eficaz de la tensión entre el 0,1 y el 0,9 p.u. de la tensión de funcionamiento normal y con una duración desde medio ciclo hasta algunos segundos. En el inglés americano se denomina *Sag*, en el inglés británico se denomina *Dip*.

**INTERVALOS DE OPERACIÓN:** Espacio de tiempo entre dos vehículos consecutivos.

**INVERSOR:** Dispositivo electrónico que transforma la tensión CC a CA sinusoidal monofásica o trifásica con amplitud constante y frecuencia estable. Está compuesto por elementos semiconductores como IGBTs.

**MÓDULO COMÚN:** Entiéndase como “conjunto de equipos comunes que sirven a toda una SE, tales como servicios auxiliares, protección de barras, SCC común, etc” [3]

**OPENTRACK RAILWAY TECHNOLOGY:** . Herramienta computacional que se emplea para planeamiento ferroviario permitiendo determinar y analizar las necesidades de infraestructura, construcción horaria, futuras expansiones, fallas del sistema y cálculos de consumo de potencia [4].

**PANTÓGRAFO:** Se encarga de captar la energía eléctrica de la catenaria hacia el tren [5, p. 10].

***PUSH-PULL:*** Modo de operación de las locomotoras que permite su conducción por cualquier de sus extremos, gracias a un mando múltiple equipado en la cabina de control de cada locomotora.

**RECTIFICADOR DE POTENCIA:** Convertidor estático de energía que se encarga de transformar la tensión CA a CC.

**SUBESTACIÓN:** Instalación que recibe de las compañías de suministro la corriente eléctrica, adecuándola a las características que precisa el tipo de electrificación de la línea aérea de contacto que debe alimentar.



## LISTA DE SIGLAS

**AAR:** (del inglés, *Association of American Railroads*). Asociación de Ferrocarriles Americanos. “Fundada en 1934, es la organización de tecnología, investigación, establecimiento de normas y tecnología ferroviaria líder en el mundo que se centra en la seguridad y la productividad de la industria ferroviaria de mercancías de los Estados Unidos” [6].

**ACPM:** Aceite Combustible Para Motores. Es el termino más empleado en Colombia para llamar al gasóleo extraído del petróleo.

**ACSR:** (del inglés, *Aluminum Conductor Steel Reinforced*). Cable de aluminio con refuerzo central de acero.

**AENOR:** Asociación Española de Normalización y Certificación. “Entidad mercantil, trabaja en los ámbitos de la evaluación de la conformidad y actividades asociadas, como la formación o la venta de publicaciones” [7].

**ANI:** Agencia Nacional de Infraestructura.

**AREMA:** (del inglés, *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*). Formado en 1997, “su misión es el desarrollo y avance tanto del conocimiento técnico y práctico como de las prácticas recomendadas relacionadas con el diseño, la construcción y mantenimiento de la infraestructura ferroviaria” [8].

**AT:** Autotransformador.

**ATI:** Autotransformador intermedio.

**ATM:** Autotransformador Medio.

**AWG:** (del inglés, *American Wire Gauge*). Calibre de alambre estadounidense.

**BL:** Bahía de Línea.

**BSI:** (del inglés, *British Standards Institution*). Multinacional que se encarga de la creación de normas para la estandarización de procesos. Su sede principal está en Londres, Reino Unido y actualmente tiene presencia en Asia, Europa y América [9].

**BT:** Bahía de Transformador.

**CC:** Corriente Continua.

**CD:** Corriente Directa.

**CA:** Corriente Alterna.

**CENELEC:** (del inglés, *European Committee for Electrotechnical Standardization*). “Es el responsable de la estandarización en el campo de la ingeniería electrotécnica. CENELEC crea acceso al mercado a nivel europeo, pero también a nivel internacional, adoptando estándares internacionales siempre que sea posible, a través de su estrecha colaboración con la IEC, en virtud del Acuerdo de Frankfurt” [10].

**COP:** Código formal de la ISO para abreviar el peso colombiano.

**CPE:** Calidad de la Potencia Eléctrica. Se encarga de estudiar problemas causados por la desviación de la tensión, corriente o frecuencia de sus valores ideales.

**CREG:** Comisión de Regulación de Energía y Gas.

**DANE:** Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

**DigSILENT PowerFactory:** (del inglés, *Digital SimuLator for Electrical NeTwork*). “Es una aplicación de software líder en análisis de sistemas de potencia para analizar sistemas de generación, transmisión, distribución e industriales” [11].

**EI:** Estación Intermedia. Punto de parada para el intercambio de carga.

**EMI:** (del inglés, *ElectroMagnetic Interference*). Interferencia Electromagnética.

**EMF:** (del inglés, *ElectroMagnetic Fields*). Campos Electromagnéticos.

**EN:** (del inglés, *European Standard*). Estándar Europeo.

**EIM:** Estación Intermedia Multimodal. Punto de parada para el intercambio de carga y conectividad con otros medios de transporte.

**ET:** Estación Terminal.

**EUR:** Código formal de la ISO para abreviar el euro.

**FP:** Factor de Potencia. En un circuito de CA, es la relación entre la potencia activa, P, y la potencia aparente, S.

**HV:** (del inglés, *High Voltage*). Alta Tensión.

**IEEE:** (del inglés, *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc*). “Su trabajo es promover la creatividad, el desarrollo y la integración, compartir y aplicar los avances en las tecnologías de la información, electrónica y ciencias en general para beneficio de la humanidad y de los mismos profesionales. Creado en Nueva York en 1884, con sede principal en la ciudad de Piscataway en los Estados Unidos y subsedes en más de 190 países del mundo” [1].

**IEC:** (del inglés, *International Electrotechnical Commission*). Es una organización de normalización en los campos eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas. Fundada en 1904 durante el Congreso Eléctrico Internacional de San Luis (EEUU).

**IGBT:** (del inglés, *Insulated Gate Bipolar Transistor*). Transistor Bipolar de Compuerta Aislada.

**IPP:** Índice de Precios del Productor. “Indica la evolución de los precios de venta del productor, correspondientes al primer canal de comercialización o distribución de los bienes transados en la economía” [12].

**ISO:** (del inglés, *International Organization for Standardization*). Organización Internacional de Normalización.

**LT:** Línea de Transmisión.

**LV:** (del inglés, *Low Voltage*). Baja Tensión.

**m.s.n.m.:** Metros Sobre el Nivel del Mar.

**MV:** (del inglés, *Medium Voltage*). Media Tensión.

**NEMA:** (del inglés, National Electrical Manufacturers Association). “Brinda un foro para el desarrollo de estándares técnicos que beneficien a la industria y los usuarios, la promoción de políticas de la industria en asuntos legislativos y regulatorios, y la recopilación, análisis y disseminación de datos de la industria. Además de su sede en Rosslyn, Virginia, NEMA también tiene oficinas en Beijing y la Ciudad de México” [13].

**PCC:** (del inglés, *Point of Common Coupling*). Punto de Acople Común.

**P<sub>LT</sub>:** (del inglés, *Perception of light flicker in the long term*). Percepción a Largo Plazo. Indica la severidad de las fluctuaciones de voltaje y *flicker* a término largo. El período de observación es de una semana con un intervalo de dos horas. Es adecuado para análisis de perturbaciones causadas por fuentes aleatorias [2].

**P<sub>ST</sub>:** (del inglés, *Perception of light flicker in the short term*). Percepción de Corto Plazo. Indica la severidad de las fluctuaciones de voltaje y *flicker* a término corto. El período de observación es de una semana con un intervalo de diez minutos. Es adecuada para perturbaciones causadas por fuentes individuales [2].

**p.u.:** (del inglés, *Per unit*). Por Unidad. Se define como la relación entre el valor real de una variable y un valor de referencia o base de esa variable.

**PVU:** (del inglés, *Percent Voltage Unbalance*). Porcentaje de Desequilibrio de Voltaje.

**RENFE:** Red Nacional de los ferrocarriles Españoles. Empresa de servicios de transportes ferroviarios de viajeros y mercancías depende del Ministerio de Fomento [14].

**RMS:** (del inglés, *Root Mean Square*). Valor eficaz de una señal.

**RIV:** (del italiano, *Regolamento Internazionale dei Veicoli*). Reglamento Internacional de Vagones.

**SAI:** Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos.

**SE:** Subestación de Energía.

**SET:** Subestación de Tracción.

**SIN:** Sistema Interconectado Nacional.

**STN:** Sistema de Transmisión Nacional.

**STR:** Sistema de Transmisión Regional.

**SVC:** (del inglés, *Conventional Static Var Compensators*). Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva.

**TB:** Transformador *booster*.

**TRM:** La Tasa de Cambio Representativa del Mercado. Expresa la cantidad de pesos colombianos por un USD.

**TMAR:** Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento. Se aplica para llevar a valor presente los flujos netos de efectivo.

**TIR:** Tasa Interna de Retorno. Permite determinar el porcentaje de beneficio o pérdida que tendría la inversión. En otras palabras, se puede definir como la la tasa de descuento donde el valor neto de los flujos de caja libre en los periodos evaluados sea igual a cero.

**TyD:** Grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica de la Universidad Pontificia Bolivariana.

**UNE:** Asociación Española de Normalización. “Asociación sin fines lucrativos, desarrolla la actividad de Normalización y Cooperación” [7].

**USD:** Código formal de la ISO para abreviar el dólar estadounidense.

**UIC:** (del francés, *Union Internationale des Chemins de Fer*). Unión Internacional de Ferrocarriles.

**V<sub>CC</sub>:** Voltios de corriente continua.

**V<sub>CA</sub>:** Voltios de corriente alterna.

**V<sub>LL</sub>:** Voltaje línea - línea.

**V<sub>LN</sub>:** Voltaje línea – Neutro.

**VPN:** Valor Presente Neto. Es un indicador para determinar cuantitativamente la viabilidad de una inversión o proyecto en términos de rentabilidad y ganancia.

**XM:** Compañía Expertos en Mercados S.A. E.S.P.



## UNIDADES Y SÍMBOLOS

Amperio	A
Celsius	°C
Hora	h
Horsepower	HP
Joules	J
Galón	gal
Gramo	g
Metro	m
Minuto	min
Millas por hora	mph
Newton	N
Ohm	$\Omega$
Pie	ft
Revoluciones por minuto	rpm
Segundo	s
Siemens	S
Tonelada	Tn
Vatio	W
Vatio-hora	Wh
Velocidad	v
Voltio	V

## 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, pasando por la ciudad de Montería, y siguiendo las cuencas de los ríos Medellín, Porce y Nechí. Se opta por analizar esta ruta debido a que tiene pendientes pequeñas y permiten conectar las capitales de dos departamentos de Colombia.

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) y su distribución a lo largo del trayecto, al igual que el sistema de catenarias que cumple con los requerimientos para alimentar el sistema de tracción eléctrica seleccionado a lo largo de la ruta. De igual forma, se estiman los posibles puntos de conexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de acuerdo con la proximidad de las fuentes a las SET y los niveles de tensión recomendados por diferentes autores y experiencias de otros países que hayan implementado esta tecnología. Posteriormente se realizan simulaciones en *OpenTrack* para evaluar el efecto de la circulación de los trenes en el tiempo, teniendo en cuenta las pendientes, para detectar posibles sobrecargas y evaluar el comportamiento de la tensión a lo largo del recorrido. Con los resultados obtenidos se simula el sistema férreo electrificado conectado al SIN mediante DIGSILENT 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 Calidad de la Potencia. Finalmente se realiza un análisis financiero que permite identificar la viabilidad de diferentes alternativas de operación: locomotoras diésel eléctrica, duales o eléctrica pura.

En el primer capítulo se hace una revisión de las tecnologías existentes para la electrificación de sistemas ferroviarios con la respectiva configuración de las SET y las características del material rodante, incluyendo los esquemas de operación en condiciones normales, ante falla de un transformador de tracción y una SET. También, se determinan las variables eléctricas que permitan la operación normal del sistema dentro de los límites permitidos por los Estándares Europeos (EN, por sus siglas en inglés), Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en inglés) e Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés), los cuales se deben tener en cuenta para la evaluación técnica del proyecto.

En el segundo capítulo se realiza el trazado de la ruta Sanín – Poveda con sus perfiles de elevación en el aplicativo *Google Earth*, y se evalúan técnicamente diferentes locomotoras, seleccionando la locomotora dual ALP 45DP de *Bombardier* por contar con una potencia ajustada a las necesidades del caso de estudio. Luego se hace un análisis comparativo entre los sistemas de Corriente Continua (CC) y Corriente Alterna (CA), eligiendo el sistema 2x25kV CA para rutas de larga distancia, ya que representa grandes ventajas respecto a las otras tecnologías existentes por la disminución de las pérdidas por efecto Joule, menores caídas de tensión, disminución de los armónicos, conexión directa a las redes de Alta Tensión (HV, por sus siglas en inglés) o EHV, y mayor distancia entre las SET.

En el tercer capítulo se determina cuantitativamente las curvas de tracción para la locomotora ALP 45DP y la cantidad necesaria para vencer la resistencia de rodadura y por pendiente longitudinal de acuerdo con la potencia de las locomotoras y la carga transportada, considerando una pendiente máxima de diseño de 2%, y una velocidad de operación deseada de 120km/h. Adicionalmente, se hallan las pendientes máximas para conservar dicha velocidad. De allí se obtiene que un estimativo de la potencia máxima requerida por el tren en la condición más exigente es aproximadamente 28.8MVA.

En el cuarto capítulo se determina la frecuencia de despacho de los trenes de acuerdo con la carga que requieren movilizar y la ubicación de las SET, Autotransformador intermedio (ATI) y Autotransformador Medio (ATM), y se selecciona la catenaria de forma cualitativa para construir el modelo eléctrico. Adicionalmente se realiza una simulación completa de la flota en el aplicativo *OpenTrack*, y se obtienen perfiles de tensión, consumo de energía, velocidad, fuerza, potencia en las SET, y Autotransformador (AT) por unidad de tiempo, entre otros. Luego, con las potencias instantáneas máximas en las SET, se corre un flujo de carga desbalanceado del SIN considerando estas cargas conectadas a las subestaciones (SE) de alimentación propuestas, empleando la herramienta computacional *DigSILENT*. De acuerdo con los resultados se evidencia un mejor comportamiento del sistema ferroviario conectado al Sistema de Transmisión Nacional (STN) o redes de tensión mayores de 220kV en la mayoría de casos, sin necesidad de emplear esquemas complementarios para mitigar el impacto de la conexión de los transformadores de tracción en el Punto de Acople Común (PCC, por sus siglas en inglés) por la naturaleza de la carga. Estas evaluaciones proporcionan los datos necesarios para el desarrollo de un diseño eléctrico conceptual.

Finalmente, en el quinto capítulo se hace un análisis financiero de los sistemas ferroviarios desde el primer año de operación a partir del flujo de caja libre para cada caso, y además se estudia la viabilidad y rentabilidad de un proyecto de este tipo a partir del Valor Presente Neto (VPN). Con base en estos resultados se comprueba que la locomotora eléctrica pura representa la mejor alternativa desde el punto de vista financiero, seguido de la locomotora dual y la locomotora diésel-eléctrica, debido a los márgenes de utilidad crecientes conforme avanzan los periodos, y a pesar de requerir mayor inversión inicial. De igual forma se plantea la electrificación parcial del 34% de la ruta Sanín – Poveda, principalmente en áreas metropolitanas y estaciones de parada, la cual equivale a un 46% de inversión inicial requerida en la electrificación completa.

**PALABRAS CLAVE:** Electrificación, Tracción Eléctrica, Calidad De La Potencia, Ferrocarriles.

## **Abstract**

*The objective of the present work is to quantify and qualify the electricity 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 and that is located between the Municipality of Envigado to Arboletes in Antioquia, passing through the city of Montería, and following the basins of the Medellín, Porce and Nechí rivers. This route was chosen for analysis because it has small slopes and allows the connection between the capitals of two departments of Colombia.*

*From the analytical calculation of the power required by the rolling stock with its respective travel schedule, the demand of the traction substations (SET) and their distribution along the route is estimated, as well as the catenary system that feeds the selected electric traction system along the route. Additionally, possible points of connection to the National Interconnected System (SIN) are estimated in accordance with the proximity of the sources to the configuration and the voltage levels recommended by different authors and experiences of other countries that have implemented this technology. Simulations are then carried out in OpenTrack to evaluate the effect of train operations over time, taking into account the slopes, to detect possible overloads and to evaluate the behavior of the voltage along the route. With the results obtained, the electrified railway system connected to the SIN was simulated by DigSILENT to determine the fluctuations of the voltages caused in the three-phase network, imbalances and flicker, which is compared with the most relevant international standards of Power Quality. Finally, a financial analysis is carried out to identify the viability of different operating alternatives: diesel, electric or dual diesel locomotives.*

*The first chapter presents a review of the existing technologies for the electrification of railway systems with the respective configuration of the SET and the characteristics of the rolling stock. Also, the electrical variables that allow the normal operation of the system are determined within the limits allowed by the International Standards, which must be taken into account for the technical evaluation of the project.*

*The second chapter describes the Sanín - Poveda route with its elevation profiles in Google Earth. Different locomotives were technically evaluated. Then, the selected locomotive was the Bombardier ALP 45DP for having a power adjusted for the project requirements. Next, a comparative analysis between the systems of Direct Current (DC) and Alternating Current (AC) was made. The 2x25kV CA system was chosen for long distance routes, since it represents great advantages compared to other existing technologies.*

*The third chapter determinates quantitatively the traction curves for the locomotive ALP 45DP. The maximum design considerations were a slope of 2% and a desired operating speed of 120km / h. From there it is obtained that an estimate of the maximum power required by the train in the most demanding condition.*

*The fourth chapter determinates the train dispatch schedule. Additionally, a complete simulation of the fleet is carried out in OpenTrack and DigSILENT, and voltage profiles, energy consumption, speed, force and power are obtained. According to the results, the railway system performs better when connected to the National Transmission System or voltage networks greater than 220kV. These evaluations provide the necessary data for the development of a conceptual electrical design.*

*Finally, the fifth chapter shows a financial analysis of the railway system using the free cash flow for each case and Net Present Value. Based on these results, the pure electric locomotive represents the best alternative from the financial point of view, due to the*

*increasing profit margins as the periods advance, and in spite of requiring the largest initial investment. Likewise, the partial electrification of 34% of the Sanín - Poveda route is proposed, mainly in metropolitan areas and stop stations, which is equivalent to 46% of the initial investment required in the complete electrification.*

*Keywords: ELECTRIFICATION; ELECTRIC TRACTION; QUALITY OF POWER; RAILWAY*

## INTRODUCCIÓN

Los ferrocarriles son un medio alternativo y práctico para el transporte de grandes cantidades de mercancía a nivel interdepartamental en Colombia que actualmente se desarrolla casi en su totalidad en camiones, pues permiten disminuir los costos de flete, debido a su relativo bajo costo de mantenimiento y alto nivel de prestaciones. Además de ser más rápidos, seguros, con vías férreas dedicadas ayudan a descongestionar las carreteras principales del país y disminuir su desgaste. 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.

Colombia presenta actualmente una fuerte dependencia de las carreteras como medio principal para el transporte de pasajeros y mercancía. Esto puede ser muy crítico al momento de presentarse taponamientos o deslizamientos debido a la topografía de las carreteras, aumentando considerablemente los costos operacionales y ocasionando pérdidas millonarias en el transporte de mercancía. Para que el país pueda competir a nivel mundial, aprovechando su ubicación geográfica y comunicación con ambos océanos, es urgente optar por las tecnologías aplicadas a nivel mundial, aprovechando las líneas férreas existentes y construyendo nuevas líneas férreas, ya sea para mejorar o innovar en este tema. Es importante que Colombia promueva el desarrollo de ingeniería ferroviaria para motivar el ingreso de estudiantes en esta área de conocimiento.

En este trabajo se pretende hacer un estudio de pre factibilidad de electrificación de la 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 que iniciaría operaciones en el segundo semestre del 2020 [15].

La importancia de electrificar la ruta ferroviaria planteada en este proyecto es que, aparte de ser amigable con el medio ambiente, se aprovecha en gran medida 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 [16].

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), potencia requerida, distancia y factibilidad para conexión a las redes de Media Tensión (MV, por sus siglas en inglés) o HV sin que ocasione perturbaciones electromagnéticas considerables en la red eléctrica o afectación en indicadores de la Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE).

Para validar las simulaciones del sistema de alimentación seleccionado, de acuerdo con los requerimientos del proyecto, se emplea la herramienta computacional *OpenTrack*, que permite obtener resultados de forma ágil y dinámica del comportamiento eléctrico ante las variaciones de la carga por el funcionamiento del ferrocarril como una carga no lineal.

En el desarrollo de este trabajo de grado, se llevan a cabo en las siguientes etapas:

### **Estado del arte**

Se realizaron consultas en internet, correo electrónico, catálogos y diapositivas, sobre estudios realizados en países para la implementación de este tipo de sistemas y la topología existente de las redes del SIN. Esto permitió extraer la información necesaria para

seleccionar, dimensionar y diseñar de manera preliminar las Líneas de Transmisión (LT) hasta las SET, el tipo de SE, voltaje y corriente de operación, líneas de alimentación y la selección del material rodante.

Se tuvieron en cuenta estudios técnico económicos del ferrocarril eléctrico en Colombia para determinar las especificaciones técnicas requeridas y seleccionar el material rodante; de igual forma se realizó una evaluación financiera del proyecto.

### **Configuración general de los sistemas de tracción eléctrica.**

En este aparte se realiza una evaluación de las tecnologías existentes referentes a la electrificación de sistemas ferroviarios que permita la selección adecuada del material rodante y la configuración de las SET.

Los elementos que componen un sistema de tracción eléctrica son [17]:

- Líneas de transporte: Alimentación de las SET mediante redes de transmisión y distribución de acuerdo al caso.
- Catenaria: Distribuida en el trayecto del sistema férreo para alimentar el material rodante.
- SET: Su función es transformar la energía procedente de las redes de energía para adecuarlas a niveles admisibles para el material rodante.
- Material rodante: Todos los vehículos que tienen ruedas capaces de circular sobre una vía férrea.

En la Figura 1 se muestra el esquema básico de electrificación ferroviaria.

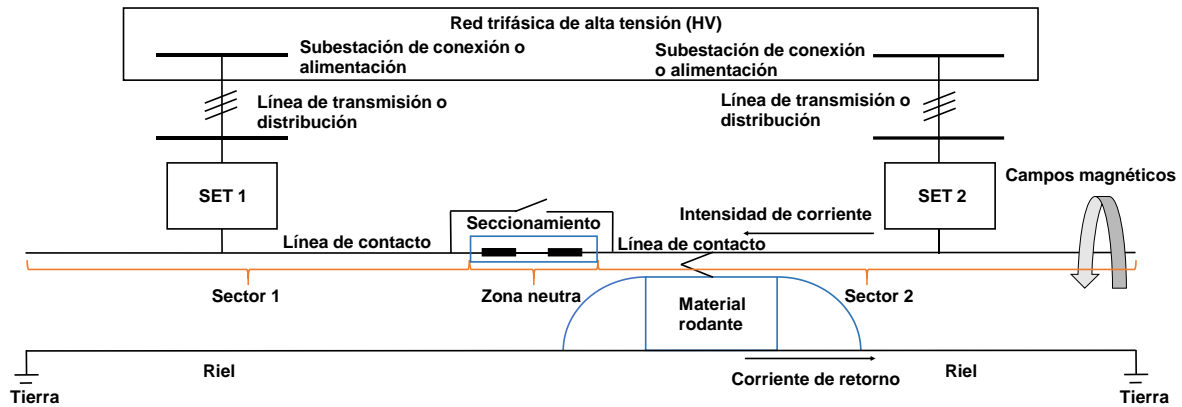


Figura 1. Esquema de un sistema de tracción eléctrica

### Selección del sistema de tracción eléctrica adecuado para el caso de estudio.

Se realiza el trazado de la ruta propuesta y a partir del material rodante seleccionado para la carga a transportar se hace un cálculo analítico que permita dimensionar el sistema eléctrico, teniendo en cuenta la distancia y calibre de los conductores de las Líneas de Transmisión (LTs) desde las SE hasta las SET, transformadores de tracción, AT, material rodante, catenaria y demás equipos necesarios para construir el modelo eléctrico.

### Análisis detallado del caso

En este caso se realiza una simulación detallada en *OpenTrack*, donde los resultados permiten evaluar el comportamiento de las variables eléctricas y su impacto en la red eléctrica existente teniendo en cuenta estándares internacionales de la CPE como la IEC 60850, EN 50163, EN 50329, IEC 61000-4-27, IEC 61000 3-7, IEEE 519, EN50160, IEC 61000-2-12 e IEC 61000-4-30. Para simular el desbalance, las fluctuaciones de voltaje que pueda producir este sistema en el PCC se emplea adicionalmente la herramienta computacional *DigSILENT*.

Para las simulaciones del caso que realizaran en *OpenTrack* se consideran los siguientes parámetros:

- Intervalos de operación del ferrocarril mientras cargan o descargan mercancía, número de estaciones y distancia de la ruta, ubicación de las SET y AT.
- Intervalos de despacho de los trenes.
- Número total de locomotoras y vagones que conforman el tren con su peso total cargado.
- Curvas de tracción y potencia de la locomotora.
- Dimensiones del material rodante.
- Potencia de los transformadores de tracción y autotransformadores, pérdidas en vacío y con carga.
- Conductores de la catenaria con radio equivalente, capacidad de corriente permanente, resistencia.
- Topología del sistema eléctrico (esquema de conexión).
- Aceleración y desaceleración promedio.
- Velocidad promedio.
- Distancia entre estaciones.

### **Análisis financiero**

Se realiza una evaluación financiera de las locomotoras diésel – eléctricas, duales o híbridas y eléctricas puras, validando su justificación y viabilidad económica. Para este análisis se tiene en cuenta los costos de inversión, operación y mantenimiento a partir del primer año de explotación comercial para cada locomotora y sistema eléctrico si aplica, i.e., no se tiene en cuenta los costos iniciales de inversión en las obras civiles y demás gastos pre-operativos.

La viabilidad de este tipo de proyectos depende de gran medida de los aportes del estado y alianzas público-privadas, que se ve afectados por la voluntad de los gobiernos nacionales y departamentales. Por lo tanto, es necesario mostrar la necesidad de optar por los ferrocarriles con modo de alimentación eléctrica como medios de transporte de mercancía sostenibles y amigables con el medio ambiente.

## **CAPÍTULO 1**

### **SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICA**

En este capítulo se describen los diferentes elementos que componen un sistema de tracción eléctrica, incluyendo su configuración, topología, función, voltajes y corrientes de operación, los cuales son necesarios para el transporte de la energía eléctrica desde las SE de conexión hasta el material rodante. De acuerdo con las necesidades técnicas del proyecto, se seleccionan los componentes básicos necesarios y las condiciones de operación adecuadas para diseñar el modelo de estudio. Es importante aclarar que en este trabajo no se hace referencia a las obras civiles y edificaciones requeridas para las SET, diseño de las protecciones eléctricas y mecánicas, enclavamientos, sistemas de control, servicios auxiliares y telemando.

A continuación, se hace una descripción en detalle de los diferentes elementos que componen un sistema de tracción eléctrica.

#### **1.1 LÍNEAS DE TRANSPORTE**

La electrificación de un sistema férreo requiere de la conexión de las líneas de acometida que se encargan de transportar la energía desde el PCC o SE del operador de red existente hasta la SET respectiva. Se pueden emplear Líneas de Transmisión (LT) o de distribución trifásicas para ambos casos, que se diferencian por el nivel de tensión. Para seleccionar el tipo de línea se debe tener en cuenta la distancia y la potencia requerida para operar este tipo de sistema, puesto que éstas se encuentran limitadas por la cargabilidad y nivel de corto circuito de la SE alimentadora. Los niveles de tensión típicos en Colombia son de 11.4kV, 13.2kV, 13.8kV, 34.5 kV, 44kV, 57.5kV, 110kV, 115kV, 220kV, 230kV y 500kV.

Teniendo en cuenta estos valores típicos empleados en Colombia, la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) [18] los clasifica por niveles, en función de la tensión nominal de operación.

- Nivel 4: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 57,5kV y menor a 220kV.
- Nivel 3: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 30kV y menor de 57,5kV.
- Nivel 2: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 1kV y menor de 30kV.
- Nivel 1: Sistemas con tensión nominal menor a 1kV.

En cuanto a la IEC define los niveles de tensión de la siguiente manera.

- Baja Tensión (LV):  $V \leq 1\text{kV}$ .
- Media Tensión (MV):  $1\text{kV} < V \leq 35\text{kV}$ .
- Alta Tensión (HV):  $35\text{kV} < V \leq 230\text{kV}$ .
- Extra Alta Tensión (EHV):  $230\text{kV} < V \leq 800\text{kV}$ .

## **1.2 CATENARIA**

En esta tesis se denomina catenaria al conjunto de conductores suspendidos en estructuras o postes a lo largo y paralelo a la ruta ferroviaria, necesarios para llevar la energía desde la SET hasta el material rodante. El material rodante capta la energía por medio de un seccionador pantógrafo. Normalmente se emplean cables de cobre o aleaciones de este metal [5, p. 18] independiente si son sistemas en CA o CD. Sin embargo, es importante aclarar que la mayoría de elementos que se mencionan a continuación corresponden a los de una catenaria aérea flexible, siendo este tipo la que se emplea comúnmente para

alimentar ferrocarriles y trenes de alta velocidad, y que son de interés para los alcances de este trabajo de grado.

Los elementos principales que componen la catenaria son:

### **1.2.1 Sustentador o mensajero**

Tiene como objetivo soportar el peso de los hilos de contacto y las péndolas. Suele estar formado por varios hilos arrollados. Se emplean de cobre para líneas de CC y acero recubierto de cobre para las líneas de alta velocidad en CA [19, p. 34].

### **1.2.2 Hilo de contacto o línea aérea de contacto (LAC)**

Se encarga de hacer contacto físico con el pantógrafo, se emplean conductores de cobre electrolítico, también aleaciones de plata, cadmio y magnesio para mejorar la conductividad, las tensiones mecánicas y disminuir su coeficiente de dilatación. La sección transversal puede ser de 107, 120, 150 mm<sup>2</sup> [19, p. 35]. Cuando el hilo de contacto es alimentado en CA, se encuentra separado eléctricamente por tramos cortos sin alimentación llamados zonas neutras o aisladores de fase (conectados a tierra y separando ambos cables activos con un material aislante), estas distancias deben ser mayores a la separación entre los pantógrafos de un mismo ferrocarril para evitar conectar catenarias de diferentes fases ( $\Delta V \neq 0$ ), que son determinados por los grupos de conexión de los transformadores de potencia. Estas zonas se diseñan en terrenos planos preferiblemente para que el ferrocarril no pierda velocidad[5]. Para la línea aérea de contacto alimentadas en CD, los seccionamientos se encuentran típicamente cerrados debido a que las tensiones son iguales y permiten evitar caídas de tensión considerables en las “colas” o puntos extremos de las catenarias. La línea aérea de contacto se encuentra suspendida entre 4.8 a 7 m del riel [20, p. 283].



### **1.2.3 Péndolas**

Elemento de unión entre los hilos de contacto y el cable sustentador. Su función es mantener el hilo de contacto paralelo a la vía y a una altura determinada, garantizando una distancia mínima de contacto. Las péndolas deben estar espaciadas entre 5 y 12 m para garantizar la flecha del hilo de contacto [21, p. 21]. Se elaboran de cobre para mejorar la conductividad y flexibilidad del sistema [19, p. 36].

### **1.2.4 Alimentador (*Feeder*) positivo**

Es el cable que va en paralelo con la catenaria como refuerzo de ésta, permitiendo aumentar la sección de los conductores. Se conecta a la catenaria cada 120 m a 300 m [19, p. 36].

### **1.2.5 Alimentador (*Feeder*) negativo**

En los sistemas de CA duales, es decir, con tensión positiva y negativa con neutro común, se utiliza este último para las corrientes de retorno permitiendo de igual forma reducir las perturbaciones electromagnéticas. Se emplean conductores de aluminio con alma de acero.

### **1.2.6 Carril o vía férrea**

Aparte de guiar el recorrido y actuar como soporte del ferrocarril, conducen la corriente eléctrica. Estos elementos son hechos en acero.

### **1.2.7 Cables de retorno**

Normalmente se emplean para disminuir en gran medida la corriente que circula por el riel, evitando riegos para las personas y animales que puedan hacer contacto físico con éste. Además, reducen las corrientes que circulan por la tierra y las perturbaciones electromagnéticas que pueden producir alteraciones en los equipos de señalización, las redes de energía cercana, y en las comunicaciones. Se emplean conductores de aluminio con alma de acero.

### **1.2.8 Estructuras de soporte de catenaria**

Su función es sostener el peso del sistema y mantener la tensión mecánica de los cables conductores y sustentador [19, p. 35]. Los componentes básicos de soporte son:

#### *1.2.8.1 Poste*

Elementos encargados de soportar los esfuerzos mecánicos de la catenaria, generalmente fabricados en perfilera laminada de acero galvanizado y cimentados en una base de hormigón [21, p. 24]

Normalmente todas las estructuras o postes están aterrizados, incluyendo cercas y fundaciones, y conectados eléctricamente con los rieles en intervalos regulares, permitiendo formar un sistema de puesta a tierra con una resistencia típicamente menor de  $1 \Omega$  [20], [22].

### 1.2.8.2 Ménsula

Parte de la estructura compuesta por una varilla o cable, con un tensor, para fijar un mástil[23, p. 156], que a su vez permite sustentar la estructura de cables a los postes. Las ménsulas deben estar equipadas con elementos capaces de brindar aislamiento eléctrico entre el poste y la catenaria.

En la Figura 2 se observa una posible configuración para una catenaria incluyendo los *feeder* positivo y negativo, empleados para sistemas de alimentación dual.

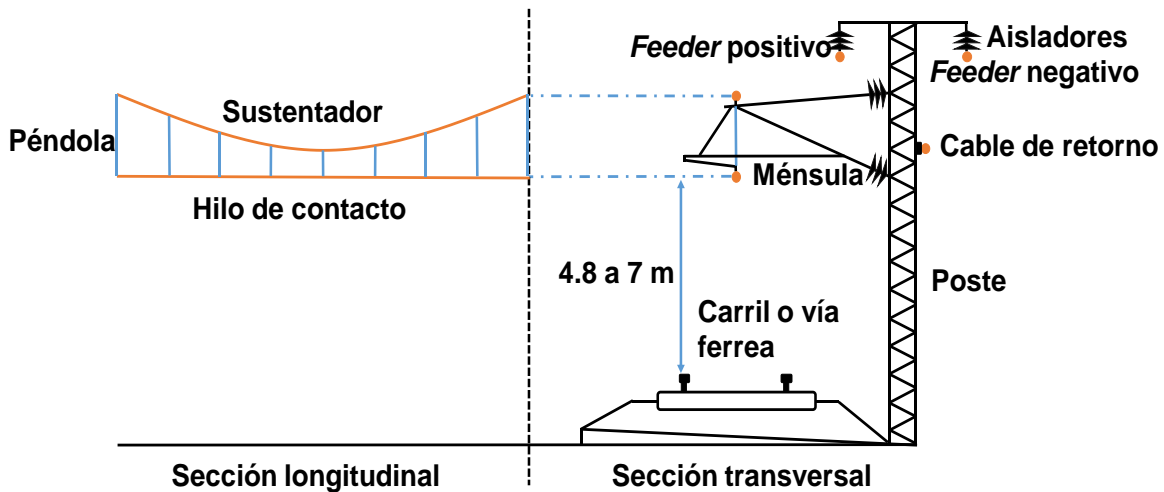


Figura 2. Esquema de una catenaria con su estructura de soporte

Los valores de impedancia son típicos de un sistema de electrificación 2x25 kV (véase p. 49). en vía sencilla, sin *feeder* positivo y asumiendo una resistividad del terreno de  $100 \Omega \cdot m$  son [24, p. 355]:

- Equivalentes de la LAC y sustentador:  $0.095 \Omega/km + j0.34 \Omega/km$ .
- *Feeder* negativo:  $0.311 \Omega/km + j1.36 \Omega/km$ .
- Cable de retorno:  $0.216 \Omega/km + j0.38 \Omega/km$ .
- Carril o vía férrea:  $0.055 \Omega/km + j0.35 \Omega/km$ .

Los conductores que conforman el grupo de cables del alimentador positivo (LAC, sustentador y *feeder* positivo) y el grupo de cables de tierra (el riel y el cable de retorno) están conectados entre ellos regularmente cada 300m. Adicionalmente, los cables de tierra están conectados frecuentemente a la tierra física [25, p. 200].

Existe otro tipo de catenaria conocido como tercer riel que se emplea para los sistemas de corriente continua con niveles de voltaje de  $600V_{CC}$  ó  $750V_{CC}$  [26, p. 433]. Está constituido de un perfil de acero laminado paralelo a la vía y colocado sobre apoyos aislados. Sin embargo, casi nunca se utiliza cuando el tren circula a nivel del suelo debido al riesgo eléctrico que puede presentar para las personas o animales por contacto físico. De acuerdo con lo expuesto anteriormente, y teniendo en cuenta la limitante en el voltaje de alimentación (que a su vez restringe la potencia necesaria para alimentar el material rodante), no lo hace una opción viable para aplicar al caso del ferrocarril de carga.

### **1.2.9 Topología de la catenaria**

Cada tramo de la catenaria alimentado por una misma SET se le denomina sector, como se observa en la Figura 1. Los sectores, a su vez, pueden estar divididos por subsectores cuando una SET tiene al menos dos transformadores, en el cual cada uno puede alimentar un subsector de acuerdo con el modo de operación (véase p. 56). En los sistemas en CC los sectores pueden estar conectados en paralelo cuando operan al mismo nivel de tensión y no hay diferencias de fases [5].

Las condiciones normales de los seccionamientos en cada sistema dependen de la corriente de alimentación de la catenaria y la configuración de cada SET.

### **1.3 SUBESTACIONES DE TRACCIÓN**

Las SET son las que se encargan de transformar y/o acondicionar la energía procedente de la red trifásica a los valores admisibles para el material rodante. La conexión de estas al PCC se realiza por lo general mediante líneas aéreas por costos de inversión.

Las SET generalmente tienen una configuración en barra simple, anillo o doble barra, siendo estas dos últimas las más recomendadas cuando se alimentan varias líneas de alimentación de una misma SE [5]. La limitante de estas dos opciones es que la inversión inicial es mucho más elevada en equipos de seccionamiento y protección en comparación con la configuración de barra sencilla, pero son mucho más confiables y flexibles.

Existen dos tipos de SE eléctrica de acuerdo con el tipo de corriente que alimenta la catenaria.

#### **1.3.1 Sistemas de electrificación en CC**

Fue el primer sistema en emplearse a nivel mundial por limitantes tecnológicas en cuanto a la electrónica de potencia, por lo cual los motores de tracción de CC eran los ideales para este fin, además considerando que el voltaje de operación de la línea y de los motores era la misma (entre 600 a 3000V) facilitaba el control de éstos (véase p. 74). Las tensiones nominales de operación de los sistemas en CC para el caso europeo son de 600V, 750V, 1500V y 3000V [23, p. 10], [27]

Los sistemas de electrificación en CC requieren de SET conformada por transformadores reductores y por grupos rectificadores compuestos de diodos (típicamente de 6, 12 ó 24 pulsos) que se encargan de transformar la energía proveniente del operador de red de CA a CC. En la Figura 3 se muestra la configuración típica de una SE de CC. En esta no se

muestran en detalle los elementos de corte, debido a que dependen de cada caso en particular.

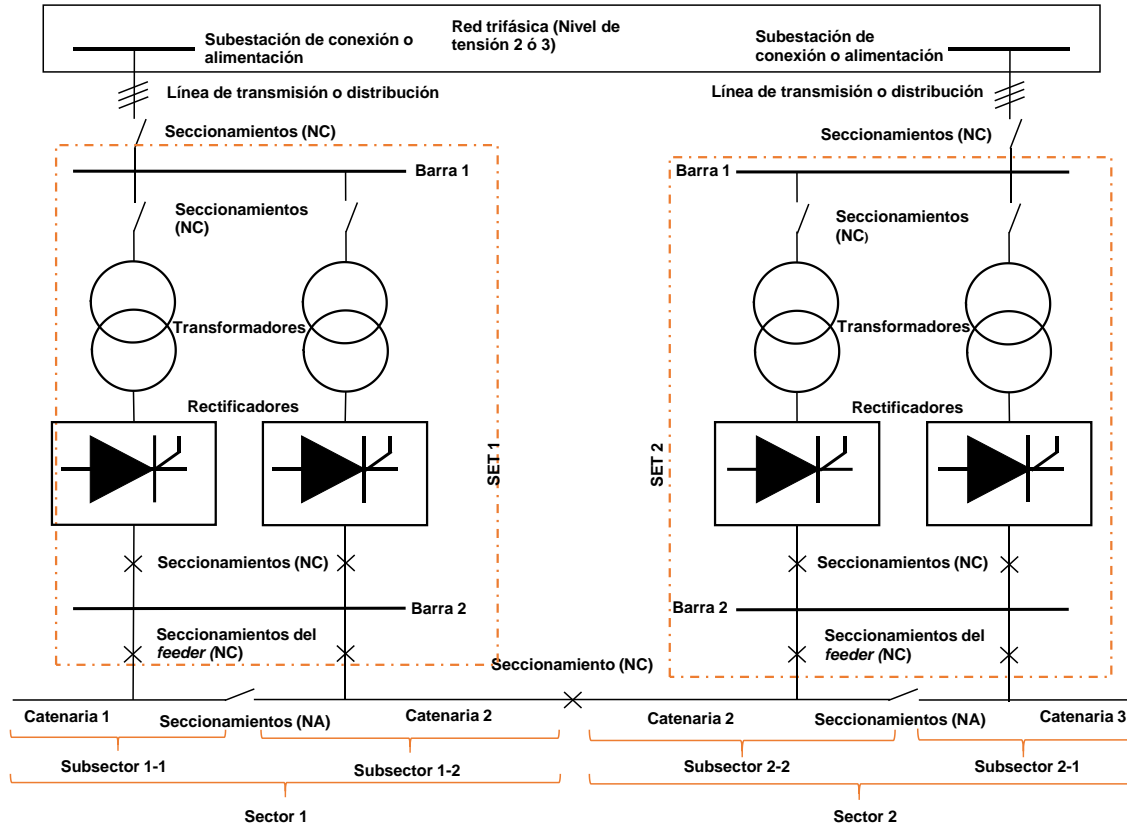


Figura 3. Configuración típica de un sistema de alimentación en CC

Es importante anotar que en la configuración de la Figura 3 se tienen dos grupos de transformadores/rectificadores en cada SET, lo que es equivalente a una rectificación de 12 pulsos con el objetivo de aumentar el orden de los armónicos y así disminuir la magnitud del mismo, lo que lo hace menos nocivo para el sistema de potencia como se indica en la Ecuación 3 [1]:

$$h = kq \pm 1$$

Ecuación 1. Orden de armónicos en rectificadores multipulso

donde  $k$  y  $q$  es algún número entero y el número de pulso del rectificador respectivamente.

En cuanto a la configuración de los rectificadores se utilizan dos puentes de seis pulsos en serie o paralelo para mejorar la confiabilidad del sistema en caso de contingencias de alguno de los grupos o en caso de mantenimientos programados, incluso se dispone de seccionamientos adicionales en las catenarias para aislar fallas y así garantizar la continuidad del suministro de energía al material rodante. Para esta configuración se requiere un transformador tridevanado, cuyos secundarios están conectados en delta y en estrella, o dos transformadores bidevanados con sus secundarios desfasados 30° de acuerdo a la Ecuación 2:

$$AD = \frac{60^\circ}{PR}$$

**Ecuación 2. Ángulo de desfase entre los voltajes secundarios**

donde  $PR$  es el número de puentes rectificadores. Dicho desfase asegura una salida simétrica de las tensiones que alimentan los dos puentes [20, p. 227], [28, p. 50], que a su vez se traduce en un voltaje de salida en CC con menor rizado por la suma de los voltajes individuales de cada rectificador en un ciclo de la onda senoidal de entrada.

El problema con este tipo de electrificación radica en que, para abastecer la potencia necesaria, las densidades de corrientes por las líneas son elevadas, lo que se traduce en una mayor sección del cable y en mayores caídas de tensión, por lo que las SET tienen que instalarse relativamente cerca para mitigar su efecto. Además, se debe asegurar la confiabilidad y disponibilidad del suministro en caso de presentarse una falla dependiendo de las capacidades mínimas de cortocircuito que pueda soportar las SET o en caso de mantenimiento. Otro factor que se tiene en cuenta son las condiciones de demanda y la densidad de tráfico que tendrá que soportar.

### 1.3.2 Sistemas de electrificación en CA

Se emplea para sistemas ferroviarios de tráfico mixto (robustos), de largas distancias (regionales) y altas velocidades, por lo cual requiere SET de mayor potencia (10 a 12MW por tren) [5], y exclusivamente transformadoras [17, p. 5], i.e., subestaciones sin grupo rectificador, lo que permite disminuir los armónicos resultantes en el PCC. Otra característica es que permite la reversibilidad [19, p. 39] (e.g., durante el frenado puede entregar energía a la red). Sin embargo, se debe tener cuidado con los desbalances que pueda producir en la red eléctrica a la cual se conecta este sistema debido a que los transformadores de tracción se alimentan generalmente de dos fases del sistema trifásico a excepción de la conexión en Delta abierto – Estrella abierta, Scott o Le Blanc (véase p. 51), sumándole la Interferencia Electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés) que pueda generarse, afectando los equipos electrónicos cercanos (a diferencia de los sistemas trifásicos balanceados donde las inducciones de cada fase se compensan con las otras dos). Además, la demanda de potencia es variable en el tiempo y el espacio de acuerdo con los parámetros operacionales del sistema ferroviario, por lo cual puede generar perturbaciones considerables al igual que los sistemas en CC.

Las tensiones nominales de operación de los sistemas en CA son de 15kV a 16.7 Hz en países escandinavos y centroeuropeos, 25 kV a 50 Hz en Europa y China y, 25kV a 60 Hz en Estados Unidos, parte de Japón y Corea del Sur [19], [5], [23, p. 10], [27].

A continuación, y como referencia para este trabajo de grado, se detallan los sistemas de alimentación empleados a 25 kV, siendo los más predominantes a nivel mundial debido a la disminución de las pérdidas de potencia y reducción de las EMI:



### 1.3.2.1 Sistema de alimentación simple

También denominados sistemas monotensión o 1x25 kV, se caracterizan por presentar una tensión de catenaria igual a la tensión de alimentación del material rodante con respecto a los conductores de neutro, como se observa en la Figura 4. En este sistema toda la corriente que consume el tren recorre todo el tramo entre la SE y el tren [29, p. 11]. Típicamente se conectan a redes de HV o EHV.

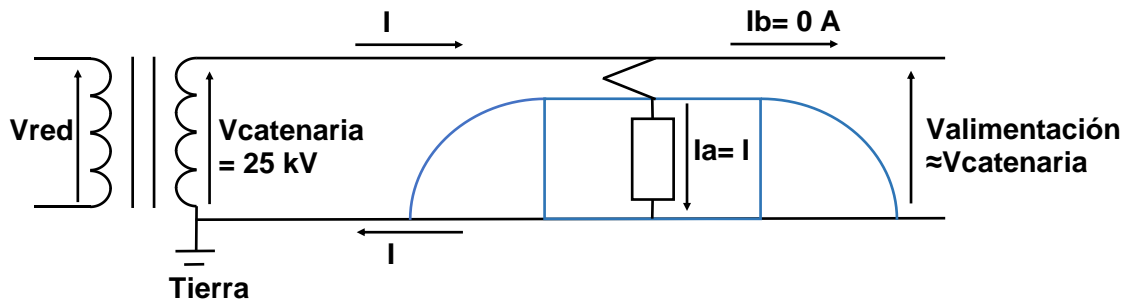


Figura 4. Sistema de alimentación directo

Las variaciones que pueden considerarse para este sistema tienen como objetivo disminuir las corrientes circulantes por tierra. Estas variaciones constan de un conductor de retorno el cual se conecta cada 5 ó 6 km al raíl, permitiendo reducir en aproximadamente un 30% la interferencia en cables de telecomunicaciones [20, p. 281]. También se puede añadir un Transformador Booster (TB) (transformador de corriente), cuyo primario está conectado en serie a la catenaria y el secundario a tierra mediante el conductor de retorno, como se observa en la Figura 5. Estos transformadores tienen una relación de transformación 1:1 y una impedancia baja que obligan a la corriente a circular por los devanados de estos transformadores, lo que disminuye aún más la corriente por la tierra y por ende el efecto de las perturbaciones electromagnéticas. Normalmente se instalan en intervalos de aproximadamente 3 a 8 km [22], [30] y una potencia que puede variar entre de 100 y 800 kVA [20], [31].

La potencia de los transformadores puede variar desde 10 hasta 26.5 MVA mediante refrigeración forzada conectado a un sistema de alimentación de 132 kV ó 275 kV, como es común en el Reino Unido. La distancia entre las SET se puede distribuir en intervalos de 30 a 60 km [22], [32, p. 37], dependiendo de los límites de voltaje permitidos por la IEC60850 [27].

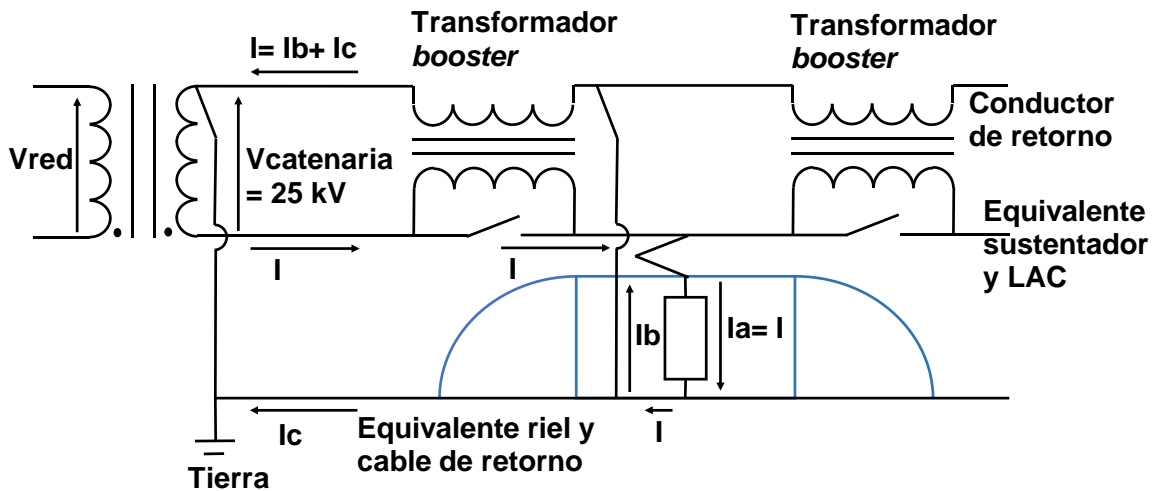


Figura 5. Sistema de alimentación con TB y conductor de retorno

La desventaja que presenta esta configuración es que los TB aumentan la impedancia de la catenaria, lo que implica mayores caídas de tensión, por lo cual es necesario disminuir la distancia entre las SET para mitigar este problema.

### 1.3.2.2 Sistemas de alimentación dual

También denominados sistemas bitensión o 2x25 kV, presentan una tensión de fuente mayor a la tensión de alimentación del material rodante. La tensión se reduce utilizando autotransformadores de relación 1:1 [20], distribuidos a lo largo de la catenaria conectando el punto medio a tierra como se observa en la Figura 6, típicamente distanciados entre 5 y 15 km [22, p. 18], [25, p. 200], [32, p. 32]. Al igual que los TB, disminuyen la corriente

circulante por la tierra y por ende la distribuyen por el *feeder* negativo, convirtiéndolo en el conductor de retorno.

La principal ventaja de este sistema es que, al ser de mayor tensión, se reduce la corriente necesaria por la catenaria para suministrar la potencia al material rodante y de este modo, se puede aumentar la distancia entre las SET sin caídas de tensión considerables. Sin embargo, requiere de otro grupo de conductores [29, p. 12].

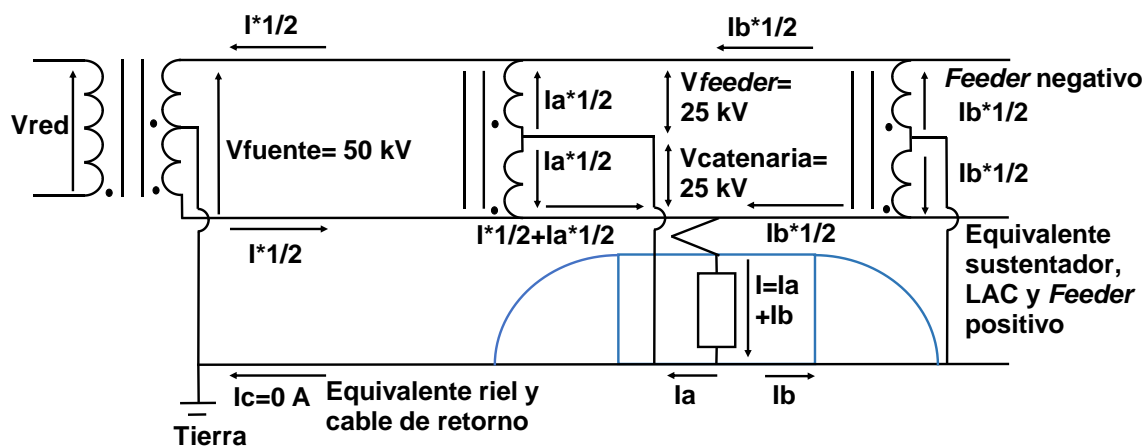


Figura 6. Sistema de alimentación dual

Este sistema posee una característica especial y es que tienen un conductor asociado a la catenaria y otro llamado *feeder*. La tensión entre estos conductores y el riel es de 25kV, cuyo desfase es de  $180^\circ$  [5, p. 28]. En la Figura 6 se observa la distribución de corrientes para un sistema donde los conductores y los autotransformadores son ideales, es por esto que la corriente de retorno por el riel y la tierra circula sólo por el tramo comprendido entre el material rodante y los autotransformadores adyacentes. Igualmente, para este caso la corriente  $I_a$  e  $I_b$  es equivalente cada una a  $\frac{1}{2}$  de  $I$  (corriente consumida por el material rodante). Así mismo, la corriente que circula por el *feeder* negativo es aproximadamente igual y contraria a la que circula por el equivalente sustentador, LAC y *feeder* positivo, por lo que el efecto de la inducción se contrarresta teniendo en cuenta que están dispuestos en paralelo a la vía.

En las condiciones reales, donde los conductores y autotransformadores no son ideales, la distribución de corrientes puede variar de forma que la corriente que se distribuye a lo largo del riel y de la tierra es diferente, por lo cual  $I_c \neq 0$ . Sin embargo, esta corriente seguiría siendo mucho menor que la corriente  $I_a$  e  $I_b$ , de igual forma estas corrientes varían de acuerdo con el punto en que se encuentre el material rodante, determinados por la impedancia equivalente de la línea y los elementos inductivos del circuito de tracción.

Los autotransformadores empleados tienen una potencia que puede variar entre 4 a 15 MVA [31], soportando una sobrecarga al 100% durante 5 minutos y al 50% durante 15 minutos. Su nivel de cortocircuito es de 2.5 kA [20], y su impedancia de cortocircuito es 5% [29, p. 133]. Estos equipos tienen la ventaja de, a diferencia de los TB, entregar más potencia con menores caídas de tensión debido a su robustez con una impedancia muy baja, su mayor voltaje de operación, y no estar conectados en serie con la catenaria.

El transformador monofásico de alimentación conectado a la red trifásica está diseñado con una potencia típica entre 10 y 60 MVA, con voltajes en vacío en el secundario de 27.5 kV ó 55 kV para que los autotransformadores compensen de este modo las caídas de tensión. Además, deben estar diseñados para soportar una corriente de cortocircuito de 12 kA como mínimo [5], [17], [20, p. 283], con una impedancia de cortocircuito entre fase y neutro de 15% y entre fases de 5% [29, p. 133], para una conexión delta abierto - Estrella abierta (véase p. 53). Según White [22], la potencia de estos puede variar entre 40 a 80 MVA, conectado a sistemas de alimentación de 400kV.

### **1.3.3 Esquemas de conexión de los transformadores de tracción en sistemas de CA**

Los sistemas de alimentación de CA requieren alimentar cargas monofásicas de mucha potencia y cambiantes en el tiempo que pueden generar desbalances considerables en la

red trifásica, afectando la CPE y ocasionando disminución en la eficiencia y mal funcionamiento de los motores, sobrecalentamiento en los equipos conectados en el PCC, y un ruido acústico significativo. Es por este motivo que se plantean varios esquemas para la conexión de los transformadores de tracción, i.e., soluciones pasivas que permitan mitigar estos desbalances y distribuir las cargas uniformemente entre las fases. Es importante tener en cuenta que la severidad de los desbalances en la red está condicionada también por el nivel de corto circuito en el PCC [33] y el voltaje de la fuente dependiendo de la ubicación, que normalmente se recomienda que sea entre 132 kV y 400 kV para el caso del Reino Unido [34, p. 13] o entre 132 kV y 220 kV para el caso de España [32, pp. 33–35]. Para su selección se tiene en cuenta factores tales como el costo de inversión, operación y mantenimiento.

Si bien las opciones que se analizan a continuación son las más comunes, no son las únicas; por ejemplo, existe una solución activa para mitigar los desbalances de potencia basados en Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC, por sus siglas en inglés) o los recientemente explorados *Voltage Source Converters (SVC Light)* [35], que no se tendrá en cuenta en el presente trabajo de grado.

#### *1.3.3.1 Conexión simple*

Esta configuración tiene un costo de inversión menor en relación a las otras alternativas ya que se puede instalar uno o dos transformadores monofásicos independientes para distribuir la carga en una misma SET, cuyos primarios están conectados a las mismas fases de la red. Es por este motivo que su impacto en el sistema de potencia es más severo con respecto a los otros esquemas. Sin embargo, esta condición permite simplicidad ante indisponibilidad de uno de los transformadores, donde el otro pueda alimentar ambas catenarias (condición N-1).

### 1.3.3.2 Delta abierto – Estrella abierta o conexión (Vv)

Esta configuración tiene la característica que el desequilibrio que produce en la red no tiene componente de secuencia cero [29], además su conexión es simple como se muestra en la Figura 7.

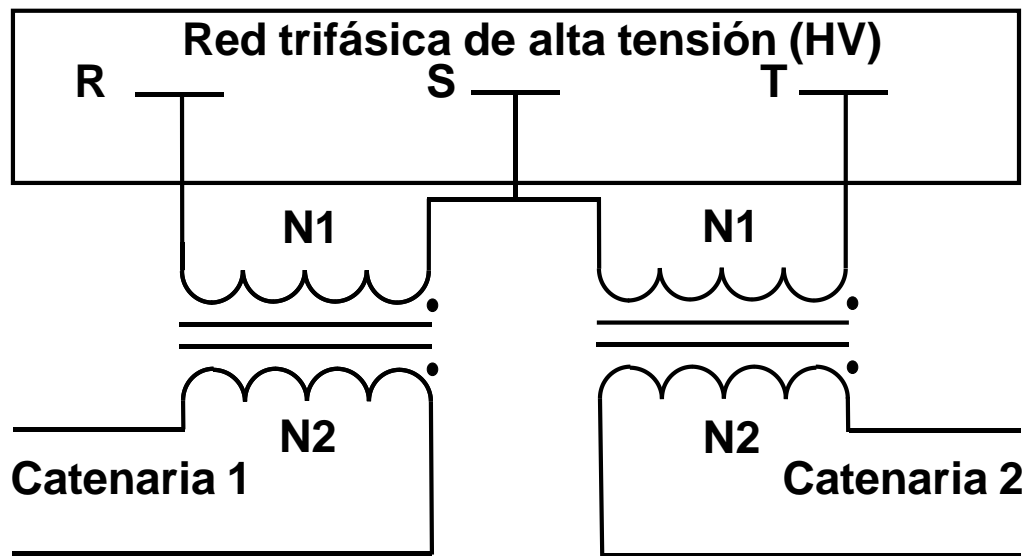


Figura 7. Conexión delta abierto- Estrella abierto o conexión (Vv)

Está compuesto por dos transformadores monofásicos donde dos terminales de los devanados primarios están conectados a una misma fase de la red trifásica, y las otras dos restantes a dos fases diferentes formando una delta abierta, lo que permite distribuir la carga y alimentar dos catenarias cuyos voltajes están desfasados  $120^\circ$  (asumiendo un sistema de potencia balanceado en voltajes y corrientes). En esta configuración los voltajes del secundario están desfasados  $120^\circ$  [36]. El desbalance se puede reducir a la mitad con respecto a la configuración simple si la carga de las dos catenarias es igual [37, p. 2245].

### 1.3.3.3 Conexión Scott

Este esquema es mucho más complicado que los anteriores y requiere que los transformadores de tracción tengan tomas intermedias para su configuración como se observa en la Figura 8.

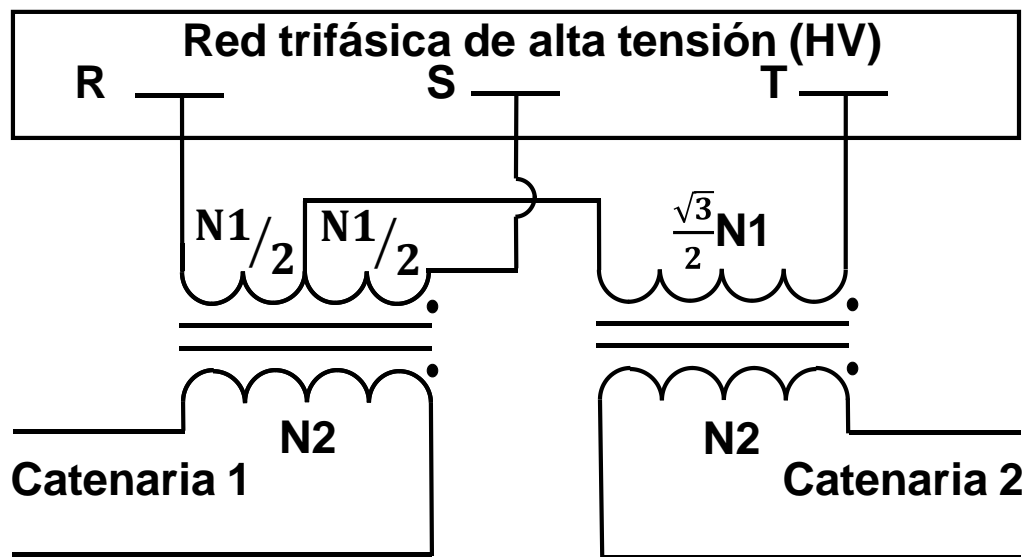


Figura 8. Conexión Scott

Este esquema tiene la ventaja que se puede obtener desbalances reducidos o incluso eliminarlos si la carga de las dos catenarias es igual [29], [33], [37].

### 1.3.3.4 Conexión de Le Blanc

Este esquema es el más complejo de los casos anteriores y requiere que los transformadores de tracción tengan tomas intermedias para su configuración como se observa en la Figura 9.

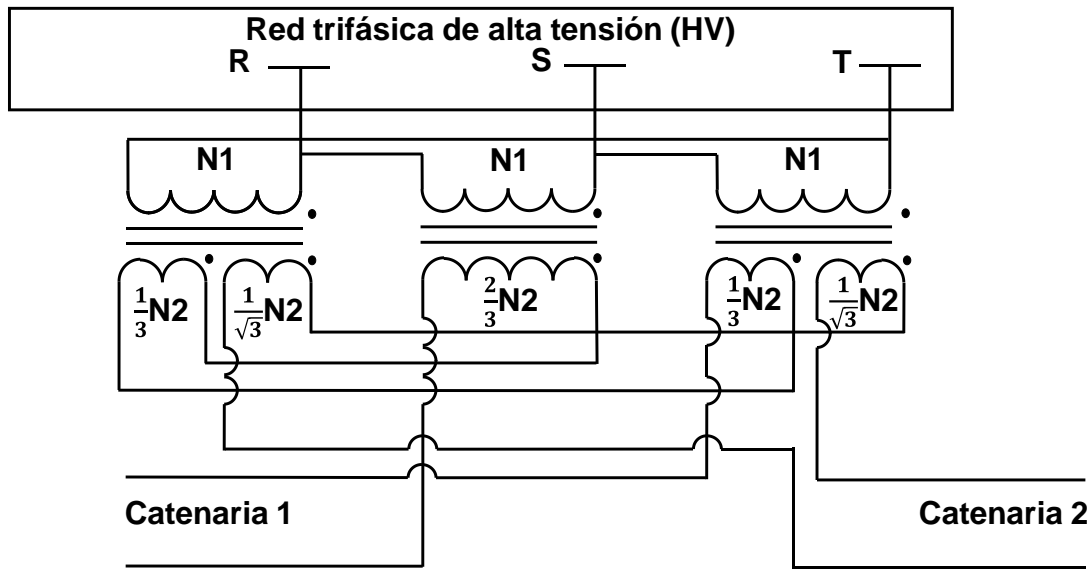


Figura 9. Conexión Le Blanc

Al igual que la conexión Scott, los desbalances pueden ser reducidos o eliminados si la carga de las dos catenarias es balanceada, i.e., convertir un sistema bifásico equilibrado en un sistema trifásico equilibrado o viceversa[33, p. 2].

La diferencia básica de esta conexión con la de Scott, es que esta última emplea dos núcleos y la de Le Blanc tiene tres núcleos, además la relación de espiras se modifica en el devanado secundario.

Los esquemas de conexión simple y delta abierto - estrella abierta son los más empleados en los casos donde la red trifásica es de tensión elevada (Nivel 4), al igual que el nivel de corto circuito, debido a que son las más económicas y simples para la operación y mantenimiento. En caso contrario, se recomienda una configuración Scott o Le Blanc, siendo mucho más costosas [37], [38, p. 114].

En la Tabla 1 se comparan las diferentes conexiones teniendo en cuenta los criterios de desequilibrio, facilidad para reconfiguración en caso de contingencias, y costo.



**Tabla 1. Comparación entre los esquemas de conexión**

<b>Criterio</b>	<b>Simple</b>	<b>Delta abierto- Yabierto</b>	<b>Scott</b>	<b>Le Blanc</b>
<b>Desequilibrios</b>	100%	50%	0% <sup>a</sup>	0% <sup>a</sup>
<b>Facilidad para la operación y mantenimiento</b>	Sí	Sí	No	No
<b>Costos</b>	Económica	-	Costo elevado	Costo elevado

<sup>a</sup> Para sistemas donde la carga de las dos catenarias es igual.

## **1.4 MODOS DE OPERACIÓN**

Las SET deben cumplir con ciertos criterios de confiabilidad para garantizar la operación del sistema sin que se vea comprometido completamente en caso de fallo de alguno o varios de los equipos que la componen. A continuación, se detallan los escenarios de operación para un sistema de CA, que se tendrán en cuenta para efectos de este trabajo y los cuales se diferencian para un sistema en estado normal y ante fallas.

### **1.4.1 OPERACIÓN NORMAL**

En el modo de operación normal, cada SET alimenta su propio sector y normalmente tiene dos transformadores de tracción para mejorar la confiabilidad y flexibilidad del sistema (para los ejemplos se emplea un esquema de conexión simple o delta abierto – estrella abierta), por lo cual dicho sector se divide en dos subsectores de aproximadamente igual distancia, cada uno alimentado de un transformador de forma independiente como se observa en la Figura 10. De acuerdo con estas condiciones, se tiene una barra a 25 kV con un interruptor de acople normalmente abierto que permite independizarlos. La conexión

de la alimentación a la catenaria se hace mediante interruptores que se tienen dispuestos para cada dirección de la vía.

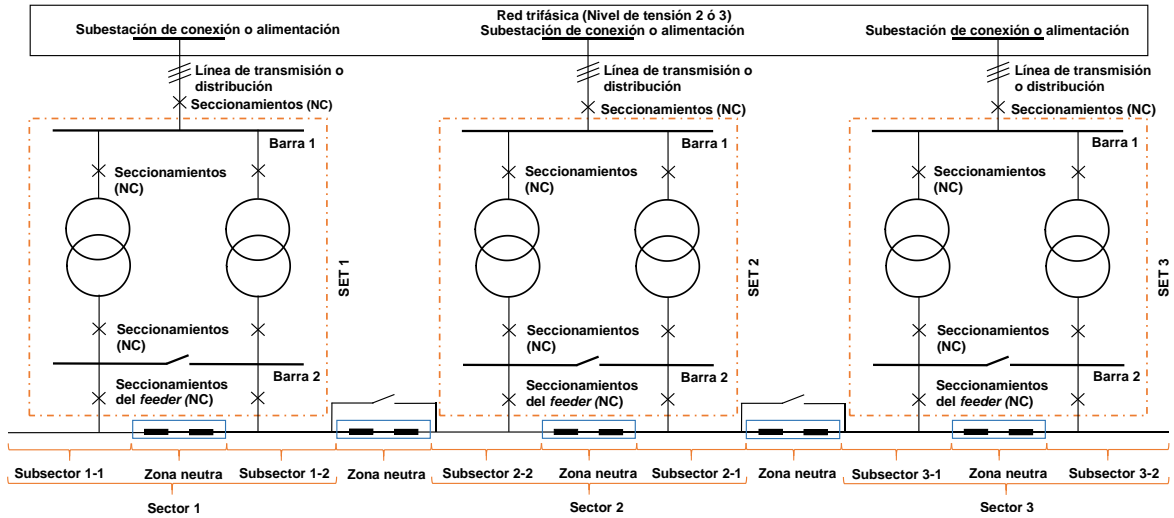


Figura 10. Esquema de operación normal en sistemas de CA

Las zonas neutras tienen los seccionadores abiertos, por lo cual cada subsector se encuentra alimentado por un transformador, reduciendo así la carga de éstos. Además, como los tramos alimentados son más cortos, las caídas de tensión son menores.

#### 1.4.2 Falla de un transformador de tracción

Considerado como el modo de operación (N-1) en donde está indisponible uno de los equipos que componen el sistema eléctrico, para este caso uno de los transformadores de tracción, el cual se aísla abriendo los seccionamientos en el lado de alta y de baja, y cerrando el interruptor de acople de barra como se observa en la Figura 11, por lo cual un solo transformador queda alimentando dos subsectores o un sector completo (Sector 2 queda alimentado desde un solo transformador de la SET2).

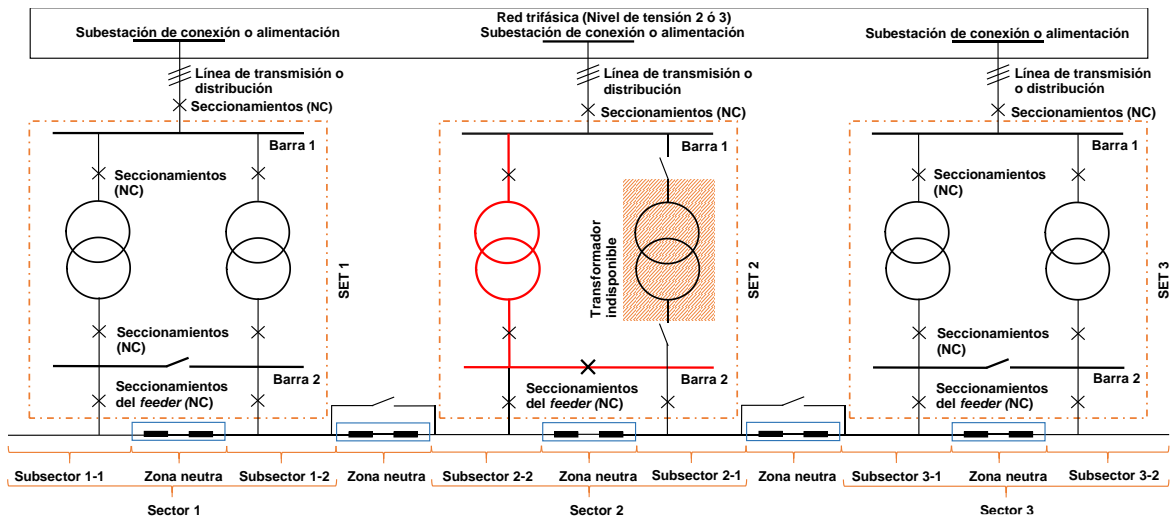


Figura 11. Esquema de operación ante falla de un transformador de tracción

El transformador disponible se carga más que en condiciones normales, lo que implica mayores pérdidas por calentamiento y un aumento en las corrientes por las caídas de tensión si la operación de los ferrocarriles continúa sin restricciones. Por otro lado, si se tiene un esquema de conexión delta abierto – estrella abierta, es muy factible que se presenten desbalances apreciables en la red trifásica debido a que la carga sólo estaría alimentada de dos fases, i.e., se asemeja a la conexión simple.

### 1.4.3 Falla de una SET

Considerado como el modo de operación (N-2) en donde están indisponibles dos de los equipos que componen el sistema eléctrico, e.g., para este caso los dos transformadores de tracción de una misma SET, implica una pérdida total de la alimentación de ese sector. Bajo esta condición se aíslan dichos transformadores abriendo los seccionamientos en el lado de alta y de baja y cerrando los interruptores asociados a las zonas neutras para alimentar cada subsector afectado como se observa en la Figura 12. En este modo las SET contiguas quedan alimentando los subsectores afectados correspondientes (subsector 2-2 alimentado desde el subsector 1-2 y subsector 2-1 alimentado desde subsector 3-1).

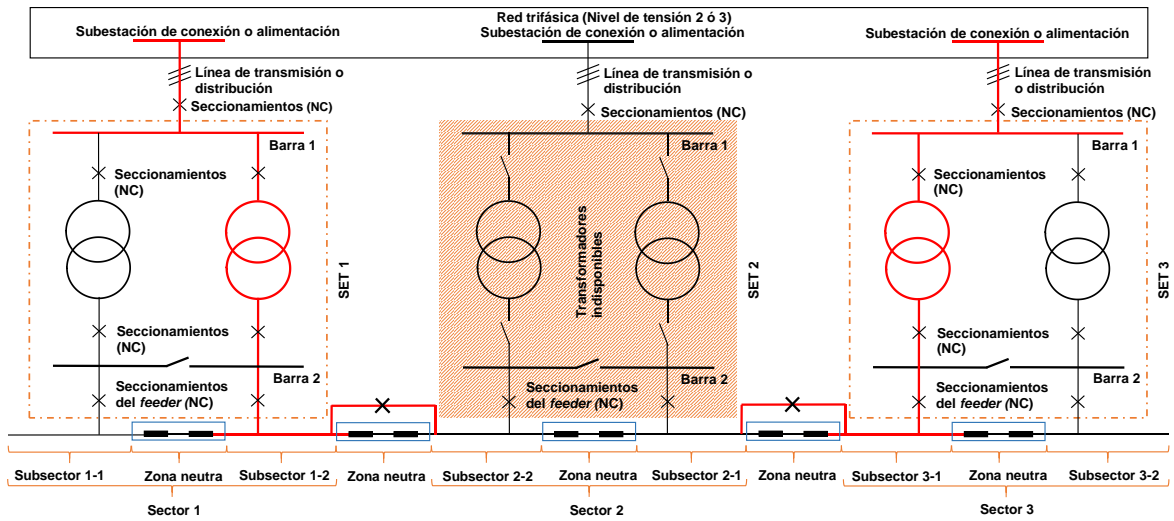


Figura 12. Esquema de operación ante falla de la SET

El transformador de la SET adyacente que queda asumiendo la carga de ese subsector se carga más que en condiciones normales, lo que implica mayores pérdidas por calentamiento y un aumento en las caídas de tensión debido al aumento en la extensión de la catenaria que queda radial, lo que también conlleva a que la corriente que circulan por el subsector asociado a la SET disponible es mayor (subsector 1-2 y subsector 3-1). Por otro lado, si se tiene un esquema de conexión delta abierto – estrella abierta, es muy factible que se presenten desbalances apreciables en la red trifásica debido a la sobrecarga de un transformador de tracción con respecto al otro.

Es importante aclarar que cuando se presenta una condición (N-1) o (N-2) donde está fallado uno o dos subsectores respectivamente, no es posible alimentar el material rodante entre esos tramos si es eléctrico puro, y en caso de que sea híbrido debe operar mediante su fuente de alimentación alterna (e.g. diésel).

## **1.5 PARÁMETROS DE OPERACIÓN**

Para que un sistema de tracción eléctrica opere de manera adecuada, se debe garantizar que variables como la magnitud de tensión, frecuencia, desbalance, forma de onda y sobrecargas se mantengan dentro de ciertos rangos sin que afecte considerablemente la vida útil de los equipos que la componen, la red eléctrica externa o los indicadores de la CPE. Es por esto que se emplean los lineamientos de algunos estándares o normativas internacionales para evaluar los parámetros de interés, los cuales se describen a continuación.

### **1.5.1 Tensiones y frecuencias de la catenaria**

En la IEC 60850 [27] o EN 50163 [39], se establecen los rangos de tensión medidos entre el LAC y el circuito de retorno. En la Tabla 2 se describen las características de las tensiones “genéricas” (parámetros operativos comunes y/o clásicos) con sus respectivos límites y duración.

Tabla 2. Tensiones permitidas según IEC 60850 [27], [39]

Sistema de electrificación	Tensión no permanente mínima $U_{min2}$ [V]	Tensión permanente mínima $U_{min1}$ [V]	Voltaje nominal $U_n$ [V]	Tensión permanente máxima $U_{max1}$ [V]	Tensión no permanente máxima $U_{max2}$ [V]
<b>CC</b>	500	500	750	900	1000
	1000	1000	1500	1800	1950
	2000	2000	3000	3600	3900
<b>CA (valores RMS)</b>	11000	12000	15000 <sup>a</sup>	17250	18000
	17500	19000	25000 <sup>b</sup>	27500	29000

<sup>a</sup> 16.7 Hz.

<sup>b</sup> 50 y 60 Hz.

Se deben cumplir los siguientes requerimientos [27, p. 9]:

- La duración de las tensiones entre  $U_{min1}$  y  $U_{min2}$  no excederá de dos minutos.
- La duración de las tensiones entre  $U_{max1}$  y  $U_{max2}$  no excederá de cinco minutos.
- La tensión de la SE en condición sin carga será menor o igual a  $U_{max1}$ . Para sistemas de CC la tensión sin carga será menor o igual a  $U_{max2}$ .
- En condiciones de operación normales, las tensiones deben estar dentro del rango  $U_{min1} \leq U \leq U_{max2}$ .
- En condiciones de operación anormales las tensiones deben estar dentro del rango  $U_{min2} \leq U \leq U_{min1}$  sin causar daño o falla en los equipos.
- Las tensiones entre  $U_{max1}$  y  $U_{max2}$  sólo se alcanzarán en condiciones no permanentes como en el frenado regenerativo o por la operación del cambiador de tomas del transformador para regular tensión.

En cuando a los sistemas de alimentación en CA en condiciones normales, el valor de la frecuencia deberá estar en los siguientes rangos para sistemas sincrónicos a un sistema interconectado:

- En sistemas a 50 Hz se admiten variaciones entre 49,5 Hz y 50,5 Hz durante un 99,5 % de un año y entre 47 Hz y 52 Hz durante el 100% del tiempo.
- En sistemas a 16.7 Hz se admiten variaciones entre 16,5 Hz y 16,83 Hz durante un 99,5% de un año y entre 15,67 Hz y 17,33 Hz durante el 100% del tiempo.
- En sistemas a 60 Hz se admiten variaciones entre 59 y 61 Hz.

### **1.5.2 Potencia de los equipos inductivos**

Los sistemas de tracción eléctrica poseen características especiales en cuanto a su operación debido a que están expuestos a sobrecargas de muy poca duración en el tiempo pero frecuentes (e.g. paradas y arranques de los ferrocarriles), y alimentan cargas no lineales (e.g. electrónica de potencia para el control de los motores de tracción), por lo cual los equipos inductivos como los transformadores y autotransformadores deben ser diseñados para trabajar bajo ese régimen sin sufrir sobrecalentamientos que excedan los límites indicados por los estándares o normativas internacionales y lo especificado generalmente por los fabricantes. Estos sobrecalentamientos reducen la vida útil o causan falla del equipo, y ocurren cuando la corriente que circula por los devanados del transformador está por encima de los valores nominales por un tiempo determinado, aumentando las pérdidas efecto Joule  $I^2R$  y las corrientes de Foucault inducidas por los flujos de fuga, las cuales son proporcionales al cuadrado del flujo que las origina [40, p. 357].

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se emplea la EN 50329 [41] para determinar los ciclos de sobrecarga a los que se puede someter un transformador de tracción sin presentarse sobrecalentamientos que pueda afectar su vida útil. Esta norma clasifica las

corrientes y condiciones de operación para cada transformador de acuerdo con la clase de servicio normalizado, como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3. Sobrecargas permitidas por clase de servicio de acuerdo a la EN 50329

Clase de servicio	Id.	Capacidad de corriente $I_B^a$ [p.u.]	Capacidad de corriente $I_N^b$ [p.u.]	Condición inicial	Duración	Intervalo	Aplicaciones típicas
<b>I</b>	-	1	1	-	Continua	-	
<b>V</b>	a	1	0.827	-	Continua	-	Transito
	b	1.5	1.240	a	2 h	3 h	rápido masivo
	c	2	1.654	a	1 min s	30 min	y trolebuses
<b>VI</b>	a	1	0.823	-	Continua	-	Líneas férreas
	b	1.5	1.234	a	2 h	3 h	principales,
	c	3	2.468	a	1 min	30 min	tránsito rápido masivo y sistema de ferrocarril ligero
<b>VII</b>	a	1	0.825	-	Continua	-	Líneas férreas
	b	1.5	1.238	a	2 h	3 h	menores,
	c	4.5	3.716	a	15 s	30 min	sistemas de ferrocarril ligero, tranvías
<b>VIII</b>	a	1	0.814	-	Continua	-	Transito
	b	1.5	1.221	a	2 h	3 h	rápido masivo



	c	2	1.628	b	1 min	30 min	
<b>IXA</b>	a	1	0.785	-	Continua	-	Líneas férreas
	b	1.5	1.177	a	2 h	3 h	principales <sup>c</sup>
	c	3	2.355	b	5 min	30 min	
<b>IXB</b>	a	1	0.658	-	Continua	-	Líneas férreas
	b	2	1.315	a	2 h	3 h	principales <sup>c</sup>
	c	3	1.937	b	5 min	30 min	

<sup>a</sup> Corriente base.

<sup>b</sup> Corriente

<sup>c</sup> Acumulativo.

### 1.5.3 Desbalances en la red trifásica

Como se explicó anteriormente, los sistemas ferroviarios alimentados en CA tienen la particularidad de producir desequilibrios en la red trifásica debido a que se emplean transformadores monofásicos para alimentar carga monofásica, donde las tensiones y ángulos consecutivos son desiguales. La severidad de éstos depende principalmente de la potencia de la carga monofásica, el esquema de conexión de los transformadores de tracción, la configuración de una red radial o mallada, las impedancias propias y mutuas entre fases de las LTs [42], el nivel de corto circuito en el PCC, etc. Los sistemas desbalanceados se deben analizar mediante componentes simétricas, que se descomponen en un sistema trifásico simétrico de la misma secuencia de fases que el original, i.e., A-B-C (secuencia positiva), otro igual al anterior, pero con secuencia contraria al original, i.e., A-C-B (secuencia negativa) y por último una de igual magnitud y fase (secuencia cero u homopolar), donde la corriente de neutro corresponde a la suma de las componentes homopolares de cada fase, i.e.,  $3 \times I_0$ .

La IEC 61000-4-30 [43] y la IEC 61000-4-27 [44, p. 16] emplean el factor de secuencia negativa para la medición del desbalance de tensión, la cual se expresa en porcentaje como

la relación entre la componente de voltaje de secuencia negativa  $U^2$  y la componente de voltaje de secuencia positiva  $U^1$  como se muestra en la Ecuación 3 [38],

$$u_2[\%] = \frac{|U^2|}{|U^1|} \times 100\% = \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6 \times \beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6 \times \beta}}} \times 100\%, \text{ siendo } \beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2}$$

**Ecuación 3. Medición del desbalance de tensión**

donde  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  y  $U_{CA}$  corresponden al conjunto desbalanceado de voltajes de línea Valor eficaz de una señal (RMS, por sus siglas en inglés).

La componente fundamental de la señal de entrada de tensión se mide cada doce ciclos para sistemas de 60 Hz [43, p. 28].

Adicionalmente, se puede determinar el factor de secuencia cero, el cual se expresa en porcentaje como la relación entre la componente de voltaje de secuencia cero  $U^0$  y la componente de voltaje de secuencia positiva  $U^1$ . Por su parte, la IEC aclara que el desequilibrio de secuencia cero es nulo cuando se miden voltajes de fase a fase. Pero en este caso, los voltajes de fase a neutro o de fase a tierra todavía pueden contener sí pueden contener la componente de secuencia cero [43, p. 28]. No obstante, la propagación del voltaje de desbalance de secuencia cero se detiene para transformadores conectados en delta o sistemas trifásicos con neutro aislado como es el caso de estudio, donde la conexión del transformador de tracción a la red primaria es en delta o delta abierto, dependiendo de la configuración (véase p. 51).

En cuanto a la IEC 61000-2-12 [45, p. 19], se plantea la Ecuación 4 para determinar el voltaje de desbalance obteniendo resultados con precisión razonable.

$$u_2 = \sqrt{\frac{6(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)}{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}} - 2}$$

**Ecuación 4. Medición del desbalance de tensión opcional de la IEC 61000-2-12**

Por su parte la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA, por sus siglas en inglés) MG1 [46] propone un método alternativo al planteado por la IEC, donde no se requiere componentes simétricas para determinar las componentes de voltajes de secuencia, sino que emplea los voltajes de línea RMS, con las cuales se calcula la relación entre la desviación máxima de voltaje y el voltaje promedio de los voltajes de línea, como se indica en la Ecuación 5 [47].

$$PVU[\%] = \frac{\text{Max}\{|V_{AB} - V_{prom}|, |V_{BC} - V_{prom}|, |V_{CA} - V_{prom}|\}}{V_{prom}} \times 100,$$

$$\text{siendo } V_{prom} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{3}$$

**Ecuación 5. Porcentaje del desbalance de tensión de acuerdo a la NEMA**

Así mismo, la IEEE 141 [48] emplea el mismo concepto de la NEMA para expresar el desbalance de voltaje, con la única diferencia que establece como referencia los voltajes de fase RMS [49].

Tanto la IEC 61000-2-12 [45, p. 25] como la EN 50160 [50] determinan el nivel de compatibilidad para el desbalance mediante factor de secuencia negativa, el cual debe ser menor o igual al 2%. En algunas áreas donde se conectan grandes cargas monofásicas pueden presentarse valores hasta del 3%. No obstante, esta última norma plantea que la medición se debe hacer durante un periodo de una semana, donde el 95% de los valores RMS de cada diez minutos, no superen dicho nivel de compatibilidad aplicado a redes de Baja Tensión (LV, por sus siglas en inglés) y MV. Por otra parte, según Burchi et al. [38, p. 114], para el caso de trenes de alta velocidad en Francia, se propone que el factor de secuencia negativa sea menor o igual al 1% para períodos mayores o iguales a quince

minutos, y menores o iguales al 1.5% para períodos menores de quince minutos aplicado a las redes de HV.

#### 1.5.4 Fluctuaciones de Voltaje y *Flicker*

Según el estándar de la IEC61000 3-7 [51], los problemas relacionados con fluctuaciones de voltaje se pueden presentar por el *flicker* en fuentes de iluminación que puede causar inestabilidad en la sensación visual y por las fluctuaciones de tensión que puedan sobrepasar los límites aceptados [52, p. 108]. Para la evaluación de emisión fluctuaciones de tensión de cargas fluctuantes en HV y MV, se emplea el método descrito en la Figura 13.

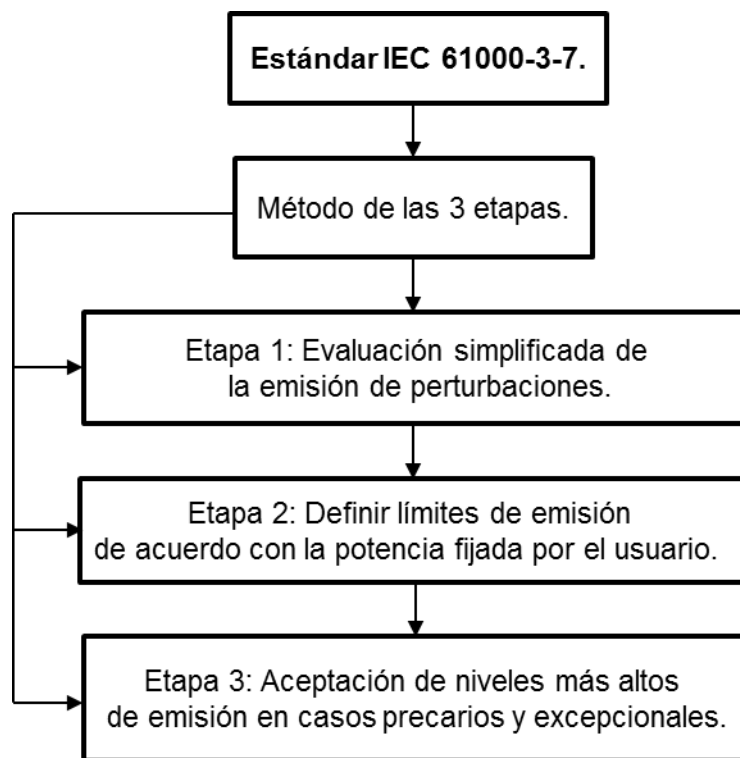


Figura 13. Mapa de la norma para evaluación y límites de emisión fluctuaciones de tensión de cargas fluctuantes en alta y media tensión de acuerdo con la IEC 61000 3-7 [2]

Estas etapas pueden ser seguidas en secuencia, empezando por la etapa uno, o empleadas de manera independiente.

#### 1.5.4.1 Etapa 1. Evaluación simplificada de la emisión de perturbaciones

La IEC 61000 3-3 [53] define el método analítico para la evaluación. En la Figura 14 se muestra el esquema para el análisis de acuerdo con este estándar. Es importante anotar que estos criterios pueden aplicar para fluctuaciones de tensión en general.

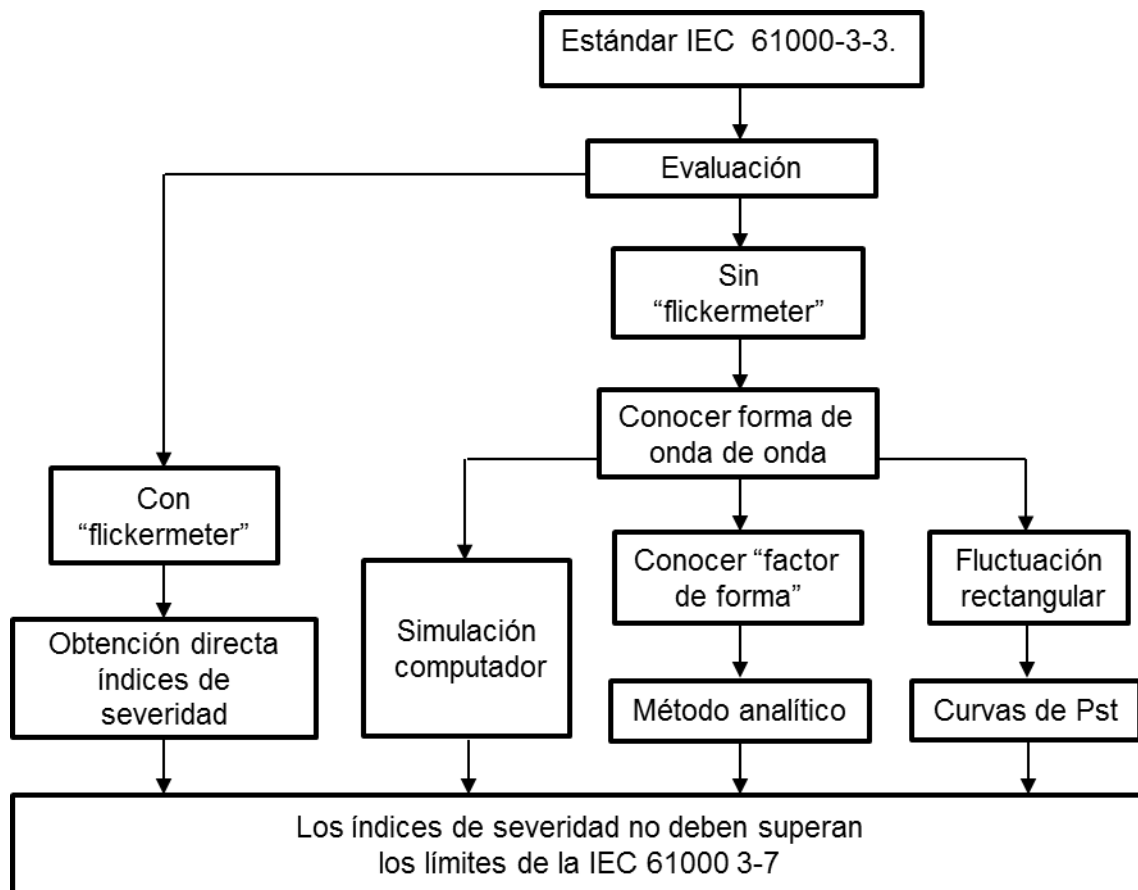


Figura 14. Mapa de la norma para evaluación de emisión fluctuaciones de tensión y flicker de acuerdo a la IEC 61000 3-3 [2]

De acuerdo con la IEC 6100 3-7 [51, p. 15], el nivel de compatibilidad de Percepción de Corto Plazo ( $P_{ST}$ , por sus singlres en inglés) para niveles de planeación en MV no debe ser mayor a 0.9, y para el caso de HV ó EHV se acepta hasta 0.8. Para el estudio se emplea el método de

evaluación sin *flickmeter* en donde al conocer la forma de onda, se puede emplear el método analítico y las curvas de  $P_{ST}$ , las cuales se describen a continuación.

- Método analítico: De acuerdo con el cambio relativo de tensión en Por Unidad (p.u.),  $d$  se halla el tiempo de impresión de *flicker*  $t_f$  en segundos, como se indica en la Ecuación 6:

$$t_f = 2.3(F \times d[\text{p.u.}] \times 100)^{3.2}$$

**Ecuación 6. Función de tiempo de impresión**

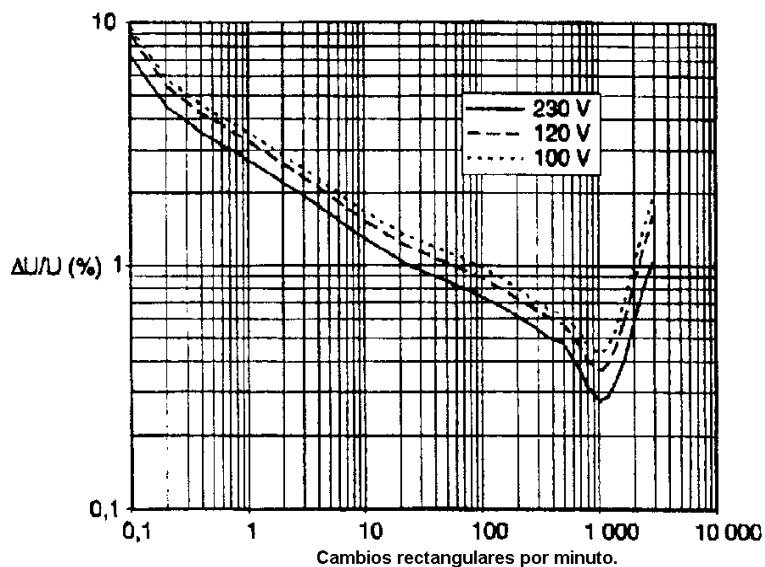
donde  $F$  es el factor de forma, el cual convierte una fluctuación de una forma dada a una rectangular mediante una serie de curvas.

Finalmente, la sumatoria de los tiempos de impresión durante el tiempo de muestreo  $T_p$  que es de 600 s, permite hallar el  $P_{ST}$  mediante la Ecuación 7. Este es un indicador adimensional.

$$P_{ST} = \left( \frac{\sum t_f}{T_p} \right)^{\frac{1}{3.2}}$$

**Ecuación 7. Función de  $P_{ST}$**

- Curvas del  $P_{ST}$ : Aunque la medida del  $P_{ST}$  se haga en el PCC de la carga fluctuante, el objetivo de los límites es evitar que haya molestias en niveles de baja tensión donde hay conexión de lámparas [2, p. 109]. En la Figura 15 se presenta la curva de  $P_{ST}$  igual a uno, para cada tipo de lámpara de acuerdo con la IEC 61000 3-7, y que coincide con la IEEE 519 [1].



Dos cambios rectangulares consecutivos (uno positivo y el otro negativo) en 1 segundo, corresponden a una fluctuación de 1Hz.

Curvas de Pst=1 para cada tipo de lámpara.  
Figura 4 std IEC 61000-3-7

Figura 15. Curva del PST=1 para diferentes tipos de lámparas [51, p. 34]

De acuerdo con la Figura 15, las lámparas que se conectan a mayor tensión son más sensibles al *flicker* que las de menor voltaje, siendo las de 100 V las menos sensibles.

Para lámparas de 120 V a 60 Hz, la frecuencia mínima de fluctuaciones de tensión es de 0.05 Hz y la máxima es de 42 Hz para análisis de  $P_{ST}$ , debido a que pueden causar efectos visuales considerables

- Variaciones máximas por minuto: Otro método para evaluación de emisión para cargas fluctuantes en media tensión, de acuerdo con la relación entre la variación de la potencia aparente ( $\Delta S$ ) y la potencia de corto circuito del sistema ( $S_{sc}$ ) expresada en porcentaje, con el cual se puede identificar la cantidad de variaciones por minuto máximas permitidas, como se observa en la Tabla 4.

**Tabla 4. Límites para variaciones relativas de potencia en función del número de variaciones por minuto de acuerdo con el estándar de la IEC 61000 3-7 [51, p. 22]**

<b>r (variaciones por minuto)</b> <b>[min<sup>-1</sup>]</b>	<b><math>\Delta S/S_{sc}</math></b> <b>[%]</b>
<b>r&gt;200</b>	0.1
<b>10&lt;r&lt;200</b>	0.2
<b>r&lt;10</b>	0.4

#### *1.5.4.2 Etapa 2. Definir límites de emisión de acuerdo con la potencia fijada por el usuario*

Esta etapa se aplica si la carga no cumple con el criterio de la etapa 1. Para distribuir los niveles de planeación entre cada consumidor individual en media tensión se deben considerar las fluctuaciones de los sistemas de mayor tensión [52, p. 116]. Esta etapa se podría aplicar si se alimentan otros sistemas de tracción eléctrica y mirar las emisiones de cada uno. Adicionalmente, en principio los transformadores de tracción están conectados directamente a la red de HV y no van a emplearse para alimentar a usuarios residenciales o industriales, ni tampoco hacen parte del alcance de esta tesis.

Los niveles de *flicker* presentes en un sistema de mayor tensión son transferidos al de menor tensión con un coeficiente de transferencia menor de uno. En el caso contrario este coeficiente es prácticamente despreciable.

#### *1.5.4.3 Etapa 3. Aceptación de niveles más altos de emisiones en casos precarios y excepcionales*

En circunstancias especiales, cuando los usuarios conectados emiten niveles de perturbación que superan los límites básicos permitidos en la segunda etapa, se debe buscar una manera de conectarse en condiciones especiales mediante un estudio detallado



del sistema actual y condiciones futuras [52, p. 117]. Sin embargo, esta etapa tampoco se aplica por tratarse de una sola carga fluctuante.

## **1.6 MATERIAL RODANTE**

El material rodante o también llamado tren, está compuesto por las locomotoras y vagones o equipos de arrastre que, de acuerdo con el servicio que prestan, pueden ser de carga, de pasajeros, de servicios o mixtos. Normalmente los vagones se encuentran acoplados entre sí y remolcados por una o varias locomotoras.

### **1.6.1 Locomotora**

La locomotora está compuesta de uno o varios motores que convierten la energía eléctrica o energía química primaria contenida en combustibles fósiles en energía mecánica para el movimiento del material rodante o trenes, y en energía calorífica. Es por esto que las locomotoras se pueden clasificar de acuerdo con su modo de operación y energético en eléctrica, diésel e híbrida.

#### *1.6.1.1 Locomotora eléctrica*

Estas locomotoras captan la corriente del LAC para alimentar los motores de tracción mediante el pantógrafo, pasando por las protecciones y posteriormente por el sistema de control que permite acelerar y desacelerar la marcha. Las primeras locomotoras que se alimentaban en CC, regulaban la marcha del motor conmutando resistencias que actuaban como divisores de voltaje para una corriente de inducido determinada, pero tenían la desventaja que producían grandes pérdidas de energía. No obstante, para el caso de los ferrocarriles alimentados en CA, estaban dotados en su interior de un transformador con diferentes voltajes de salida, que alimentaba los motores de tracción de CC luego de

rectificar el voltaje mediante transistores de potencia [54, p. 152]. Anteriormente era más común emplear motores de CC debido a que tienen un par de arranque elevado y el control de la velocidad; sin embargo, su mantenimiento es complejo y costoso por el desgaste mecánico de sus partes (e.g., las escobillas o carbones).

En la actualidad, con el desarrollo de la electrónica de potencia, que se traduce en la disminución del tamaño, mayor eficiencia energética, aumento en el voltaje y la potencia de operación, y menor costo de convertidores, se permite una distribución adecuada de todos los componentes eléctricos y electrónicos hasta el punto de llegar a las locomotoras multisistema, las cuales se pueden conectar a diferentes sistemas de alimentación (véase p. 44) [55].

El uso de motores asíncronos de CA monofásicos y trifásicos es común para la tracción de las locomotoras eléctricas, siendo estos últimos más robustos, menos costosos y más ampliamente utilizados desde los años ochenta [56, p. 24]. El control de estos motores se logra variando la amplitud del voltaje y la frecuencia aplicada en el estator con el fin de que la magnitud del par motriz sea similar al que se obtiene con la frecuencia nominal [57, p. 316].

Finalmente, esta locomotora se puede considerar como una opción atractiva para los estudios de un proyecto ferroviario por los siguientes aspectos:

- Eficiencia: Típicamente ronda entre el 85% y 87%.
- Ahorro de energía por regeneración: puede estar entre el 5% y 7% en terreno plano y entre el 20 y 30% en terreno montañoso [55, p. 3].
- Reducción considerable en las emisiones gaseosas y particulados, suponiendo que las fuentes de alimentación provienen de energías limpias o renovables.
- Aumento de la velocidad de operación.

- Reducción en los costos de mantenimiento de hasta un 33% respecto a otras tecnologías.
- Costos del combustible típicamente hasta un 45% menores que otros modelos.
- Menor peso.
- Menor ruido.
- Mayor velocidad.
- Mayor aceleración [30], [58, p. 22].

Sin embargo, la locomotora antes mencionada tiene la limitante de que todo el trayecto debe estar electrificado, lo que se traduce en un aumento en los costos iniciales de inversión y una limitada flexibilidad del sistema ante interrupciones del servicio eléctrico.

Los trenes de alta velocidad son eléctricos debido a que resulta poco práctico y muy costoso emplear motores diésel para entregar la misma potencia que un motor eléctrico [58, p. 25]

#### *1.6.1.2 Locomotora diésel*

Este tipo de locomotoras tienen un motor de combustión interna o ciclo diésel que por sí solos no son útiles para fines de tracción ferroviaria debido a que no pueden generar el par motor necesario para arrancar y adicionalmente, por estar limitados para mantener la potencia y velocidad al consumo mínimo de combustible. Por ende, es necesario emplear una transmisión que controle el par de esfuerzo a diferentes velocidades, conservando la potencia del motor diésel [59, p. 137]. Las transmisiones empleadas para locomotoras robustas son la eléctrica e hidráulica, las cuales se describen a continuación.

- Transmisión eléctrica: Es la más empleada en la actualidad y representa en si una versión de la locomotora eléctrica, compuesta de un generador eléctrico acoplado al motor diésel, que alimenta mediante energía eléctrica varios motores de tracción de CD o CA

(normalmente tiene un motor por cada eje), los cuales se encargan de controlar la fuerza tractora en los ejes mediante el uso de electrónica de potencia. Vale tener en cuenta que una locomotora eléctrica es alrededor de tres veces más eficiente en potencia que una locomotora moderna de peso similar a diésel. [60, p. 1].

La configuración de la transmisión eléctrica ha cambiado en el transcurso del tiempo, empezando primero con generadores de CD que alimentan los motores de tracción de CD controlados mediante resistencias conmutables; posteriormente con alternadores de CA que, mediante rectificadores, alimentan los motores de CD; y finalmente, alternadores de CA que luego de rectificar el voltaje en CD, emplean inversores basados en Transistores Bipolares de Compuerta Aislada.(IGBTs, por sus siglas en inglés) para alimentar y controlar los motores trifásicos de CA [60].

- Transmisión hidráulica: Se compone de un convertidor hidrodinámico de par que tiene en su interior dos rodets de álabes enfrentados e inmersos en aceite, donde el primer álabe es manejado por el motor diésel a una velocidad y torque constante, y acelerado como una bomba centrífuga que acciona el segundo álabe, el cual se encuentra acoplado en la salida a un inversor reductor engranado a los ejes. Como explica Sanz *et al.* [54, p. 154] este sistema además permite el frenado dinámico e invertir la marcha mediante el llenado y vaciado de sus convertidores de par lo que la hace óptima para locomotoras de maniobras. Sin embargo, las potencias son limitadas, el mantenimiento es complejo y tienen restricción para mover cargas muy pesadas, por lo cual no se tienen en cuenta como una opción para los análisis de esta tesis, al igual que la transmisión mecánica convencional que sólo se emplea para locomotoras pequeñas.

Los motores diésel más empleados son los lentos de dos tiempos, los cuales son muy robustos, tienen una vida útil extensa, su configuración es en V, alcanzan potencias de hasta 4.47 MW, y en ralentí pueden girar a 260 rpm. También se emplean los motores rápidos de

cuatro tiempos los cuales son más eficientes, se construyen en línea o en V, producen menos emisiones gaseosas y particuladas, pero requieren de dispositivos electrónicos precisos para el control de diferentes parámetros (e.g., la inyección), son más delicados, y en ralentí pueden girar a 600 rpm [54, p. 153].

### *1.6.1.3 Locomotoras híbridas o duales*

Este tipo de locomotoras pueden operar ya sea mediante tracción eléctrica pura, i.e., captando la corriente del LAC como una locomotora eléctrica, o transformando la energía de un motor diésel para alimentar los motores de tracción eléctrica en tramos no electrificados. Los beneficios de este tipo de locomotoras son el uso mínimo de combustibles fósiles y una asignación económica y flexible para la ruta [61], por lo cual lo hacen una alternativa atractiva para la electrificación gradual de acuerdo con los ingresos y capacidad de amortización del proyecto.

Los desarrollos en la electrónica de potencia, el diseño de motores ligeros, y reducción en el peso de las estructuras ha hecho posible el desarrollo de este tipo de locomotoras. Adicionalmente se pueden adicionar baterías y/o ultracapacitores permitiendo el flujo de potencia bidireccional que hace posible el ahorro de energía [62], (e.g., en el arranque del propio tren u otro que se encuentre subsiguiente).

En la Figura 16 se ilustra un ejemplo de la configuración que actualmente se emplea para integrar los modos de operación. Por lo tanto, para la alimentación mediante catenaria en CA, se emplea un transformador de tracción monofásico que reduce el voltaje a niveles compatibles para el convertidor rectificador e inversor configurable, (empleado en sistemas de potencia bidireccional) como el controlador de cuatro cuadrantes,, cuya salida rectificada está conectada a una fuente común en CC mediante filtros para suavizar o aplanar el rizado. Para el caso de alimentación mediante el motor diésel se emplea el mismo

convertidor pero como rectificador trifásico mediante un contactor (selector de modo), conectado al generador asincrónico trifásico. También es posible emplear convertidores independientes con un contactor en la salida rectificada. Cuando la locomotora está en frenado regenerativo (si aplica), los motores de tracción pueden funcionar como generadores cuya energía se exporta al sistema mediante la fuente común en CC, lo que permite almacenarla en las baterías y/o ultracapacitores, exportarla a la catenaria mediante el convertidor inversor configurable, y/o disiparla en las resistencias de frenado mediante convertidores CD-DC. Finalmente, los servicios auxiliares de la locomotora se alimentan de la fuente común en CC mediante un convertidor auxiliar trifásico [61], [62], [63].

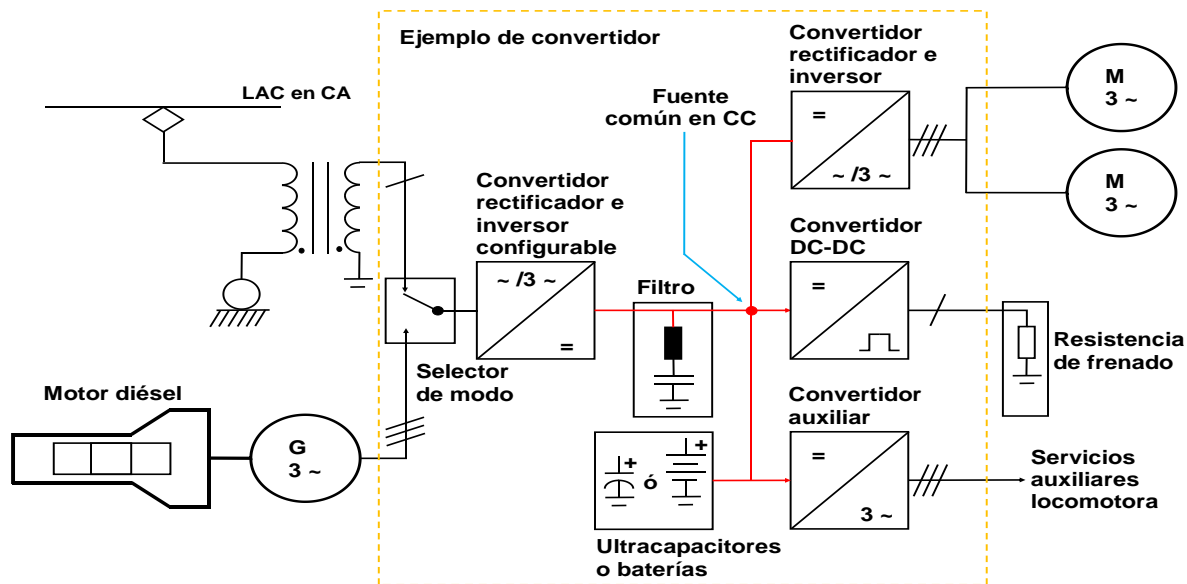


Figura 16. Convertidor de tracción para locomotoras duales

La ventaja de emplear baterías como almacenador de energía es que permiten arrancar el motor diésel por medio del alternador cuando la locomotora se encuentra estacionada y en un tramo no electrificado. Por otro lado, los ultracapacitores tienen la ventaja que pueden entregar grandes densidades de energía en un corto período de tiempo, siendo útiles para suplir parte de la corriente el arranque de los motores de tracción y así disminuir el impacto negativo que éstas pueden producir en la CPE.

El voltaje de la fuente común en CC está delimitada por la tensión nominal de bloqueo de los tiristores IGBT. Por lo tanto, para los tiristores de 3.3 kV, el voltaje de la fuente común es entre 1.4 a 1.7 kV y para los tiristores de 4.4 kV entre 2.4 a 2.8 kV, siendo este último el que emplean las locomotoras de mayor potencia [59], [62, p. 3].

En las locomotoras duales generalmente los motores diésel tienen una potencia menor en relación a los motores de tracción eléctrica por lo cual, hace que el empleo de estos últimos sea óptimo para los arranques, donde además cuentan con un elevado torque, permitiendo acelerar rápidamente. En los tramos no electrificados que normalmente son los menos congestionados y alejados de los centros de consumo, se emplean los motores diésel para mantener una velocidad constante (dependiendo de la pendiente) [62, p. 4].

### **1.6.2 Vagones**

El vagón es la parte del material rodante que se compone de dos o más ejes o *bogies* y su función es soportar la mercancía y/o viajeros, que en conjunto y remolcado por la locomotora forman el tren. De acuerdo con Pita [64], citado por Sanz *et al.*, los vagones para el transporte de mercancías se clasifican de acuerdo al tipo de productos que se transportan:

- Plataforma: Productos siderúrgicos y manufacturados de gran tamaño.
- Tolva: Balastro, cereales, carbón, minerales y pulverulentos.
- Cisterna: Líquidos, gases licuados a presión.
- Cerrados: Productos agrícolas, transporte de detalle.
- Góndola: Carga de gran tamaño.

La Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC, por sus siglas en francés) creó la ficha UIC 438-2 [65], que diferencia los tipos de vagones mediante una notación única de doce dígitos y un marcado en letras que varía su significado según sea vehículos motores, automotores, para el transporte de mercancía o de pasajeros. A continuación se explican los diferentes dígitos agrupados para el material remolcado y los vagones de mercancía, los cuales son de interés para este trabajo.

- Dígitos 1-2, régimen de cambio: El primer dígito (excepto del 5 al 7, reservado para vagones de pasajeros, y el 9, reservado para la locomotora) está determinado por la configuración de las ruedas (ejes o *bogies*) y el régimen de explotación (conjunta o no conjunta según el Reglamento Internacional de Vagones (RIV, por sus siglas en italiano)). El segundo dígito está determinado por el intercambio de ejes (fijo o variable), la propiedad (de la red, particular, alquilado a particular o combinación de red y alquilado a particulares), y tráfico (Interior, de servicio a fábricas, red, etc.).
- Dígitos 3-4. Código del país de matrícula (véase ANEXOS).
- Dígitos 5-7. Serie del vagón. El quinto dígito representa el tipo de vagón de mercancías que tiene asociado una letra de clase, donde los vagones planos de mercancías ordinarias están clasificados con las letras de categorías K, O y R, y los vagones de mercancías con letras de categoría L y S. La UIC estandarizó los vagones planos mediante las fichas: UIC 571-1 (vagones estándar – vagones ordinarios de dos ejes), UIC 571-2 (vagones estándar - vagones de *bogies* normales), UIC 571-3 (vagones estándar – vagones especiales) y UIC 571-4 (vagones estándar – vagones para transporte combinado). El sexto y séptimo dígito se relacionan con letras minúsculas de índice que define las características especiales para cada tipo (véase ANEXOS).
- Dígitos 8-11. Número del vehículo dentro de su serie.
- Dígito 12. Dígito de autocontrol. Se multiplican los doce números individualmente de derecha a izquierda de forma alternada por dos y uno, luego se suman todos los dígitos



de acuerdo con el algoritmo de Luhn, y el número de autocontrol corresponde a la diferencia entre el resultado de la suma y el múltiplo de diez inmediatamente superior.

## CAPÍTULO 2

### CASO DE ESTUDIO

Durante los últimos años en Colombia se ha incrementado el interés por parte de los gobiernos departamentales y nacional por rehabilitar los ferrocarriles como una necesidad para el transporte de mercancía y viajeros, que permita reducir la congestión y minimizar la dependencia de los sistemas tradicionales como los tractocamiones y buses interurbanos que desgastan de manera acelerada las vías nacionales, pues muchas de éstas no están diseñadas para soportar ese tipo de tracción. Los ferrocarriles, por su parte, tienen bajo costo de operación al no pagar peajes, presentan menor desgaste mecánico, y en algunos casos, emplean diversas fuentes de energía. Pueden viajar a mayor velocidad y con grandes volúmenes de carga en recorridos largos, permitiendo acortar los tiempos de viaje y agilizar los procesos de intercambio comercial. Con este modo de transporte se puede transportar gran diversidad de productos, haciéndolo una alternativa flexible. Además, son más eficientes en el consumo de energía y su mantenimiento es más económico y práctico.

Algunos de los proyectos que se vienen ejecutando en la actualidad son la concesión del corredor Chiriguaná- Sociedad Portuaria de Santa Marta, con una extensión de 245 km y una inversión de Dólares Estadounidenses (USD) 216,200,000; el corredor La Dorada-Chiriguaná (ya finalizado), con una extensión de 558.3 km y una inversión de pesos colombianos (COP) 114,155 millones [66]; y el corredor Bogotá- Belencito (ya finalizado), con una extensión de 318.3 km y una inversión de COP 113,281 millones[67]. De igual forma, se pretende reactivar el ferrocarril de Antioquia con un tren multipropósito que recorrerá 80 km desde Caldas hasta Barbosa y, un costo aproximado a COP 1,800,000 millones [68].

## 2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el presente trabajo se estudia la ruta propuesta por el ingeniero Gabriel Sanín Villa y complementada por el Dr. Gabriel Poveda Ramos, comprendida desde el municipio de Envigado hasta Arboletes con una distancia de aproximadamente 442 km. Esta ruta es más corta en comparación con otras alternativas para el transporte de mercancías desde el área metropolitana del Valle de Aburrá (como segunda área urbana más poblada del país), siguiendo de manera natural las cuencas de los ríos Medellín, Porce y Nechí, hasta llegar a Cauca y allí continuar en línea recta prácticamente, pasando por el sur de Montería hasta llegar a Arboletes en la costa Atlántica. Otra ventaja de esta ruta, no menos importante, es que al seguir las cuencas de los ríos mencionados anteriormente, 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 relativamente pequeñas y cumpliendo así con el límite máximo permitido del 3% para sistemas ferroviarios.

La ruta está compuesta por nueve estaciones de parada para el intercambio de mercancías como plantea Roldan [69], 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.

- Estación terminal (ET) Envigado: Ubicada en la abscisa km 0 + 000, es un punto donde se genera aproximadamente el 70% de las actividades económicas de Antioquia, conformado principalmente por la producción textiles, sustancias químicas, alimentos, bebidas y metalúrgicos.
- Estación Intermedia (EI) con taller y patio Bello: Ubicada en la abscisa km 20 + 000. Allí se encuentran las antiguas instalaciones del taller y del ferrocarril de Antioquia. Su

industria se basa principalmente en la producción de textiles, madera, papel, sustancias químicas; extracción de carbón, caucho y minerales no metálicos.

- El Barbosa: Ubicada en la abscisa km 47 + 600. Se propone construir en el mismo punto donde se encontraba la antigua estación del ferrocarril de Antioquia. Sus actividades económicas se centran en la extracción de carbón, producción de cartón, papeles, textiles, productos químicos, alimentos, panela, cultivos de caña, café, maíz, yuca, plátano y frijol.
- El Amalfi: Ubicada en la abscisa km 134 + 500, próxima al municipio de Amalfi, cuyas actividades económicas están basadas en la extracción de oro, piedra caliza feldespatos, cuarzo, mármol; producción ganadera y energética; y cultivos de café, caña de azúcar, cacao, maíz, frijol, plátano, yuca, tomate, repollo, pimentón, piña, zapote, mango, naranja y mandarina.
- El el Pato: Ubicada en la abscisa km 209 + 000, correspondiente a este corregimiento del municipio de Zaragoza. Las actividades económicas se basan en la extracción de oro; la producción ganadera y de madera; y cultivos de yuca y maíz.
- Estación Intermedia Multimodal (EIM) Cauca: Ubicada en la abscisa km 269 + 000. Basa sus actividades económicas en la producción ganadera y piscícola, extracción de oro y plata, y la producción de madera. Esta estación permitiría el intercambio fluvial para llegar a las ciudades de Cartagena y Barranquilla siguiendo el cauce del río Cauca y Magdalena.
- El Planeta Rica: Ubicada en la abscisa km 334 + 000. Sus actividades económicas son la producción ganadera y la extracción minera.
- EIM Montería sur: Ubicada en la abscisa km 380 + 000. Permitiría el intercambio por vía terrestre para llegar a la ciudad de Montería.
- ET Arboletes: Ubicada en la abscisa km 400 + 000. Allí se construirá un muelle flotante.

En la Figura 17 se ilustra el trazado de la ruta de estudio mediante *Google Earth*, con sus respectivas estaciones terminales, intermedias y multimodales.



Figura 17. Ruta Sanín – Poveda con sus respectivas estaciones

De acuerdo con el trazado se puede obtener el perfil de elevación mediante *Google Earth*, el cual se suaviza mediante promedios de altitudes y distancias conservando las cotas, para obtener así pendientes menores o iguales al 2%, que son un referente óptimo para esta ruta como se muestra en la Figura 18, allí también se ubican las estaciones de parada identificadas con “cero”. Es importante aclarar que durante el trazado puede ocurrir que entre puntos cercanos se obtengan diferencias de alturas considerables debido a puntos irregulares o por la geografía de la zona (e.g., acantilados). Adicionalmente, en las estaciones se consideran pendientes del 0% durante un tramo mayor al largo del tren para garantizar un arranque suave y evitar sobreesfuerzos mecánicos en el material rodante.

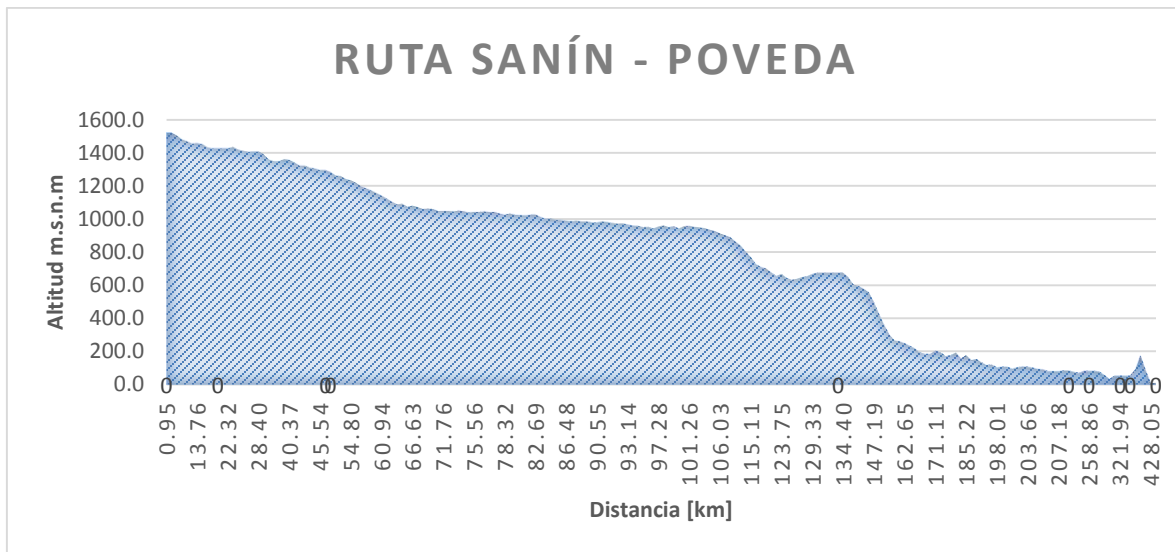


Figura 18. Perfil de elevación de la Ruta Sanín – Poveda (suavizada)

De acuerdo con el estudio realizado por Roldán [69] basado en datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), se espera que el sistema férreo pueda transportar 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 [70, p. 16]. Se espera que la carga pagada por tren sea de 1525 Tn.

## 2.2 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.

### 2.2.1 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 [71] 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.

### 2.2.2 Selección de la locomotora

Para hallar un estimativo de la potencia 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 8. Este valor está dado en términos de [J].

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

Ecuación 8. Ecuación de energía cinética

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  $0.11 \text{ m/s}^2$ . Este valor no sobrepasa la máxima aceleración no amortiguada permisible para

un tren de mercancías ( $\pm 0.3 \text{ m/s}^2$ ), que permite reducir la intensidad del desgaste del lado del carril por los peraltes, como sugiere [72, p. 124]. Por otra parte, el manual de normatividad férrea de Colombia [73, p. 11] expone que para líneas exclusivas de mercancías, se permite una aceleración máxima de  $3 \text{ m/s}^2$  sin peralte. Se emplea entonces la ecuación de movimiento rectilíneo uniforme como indica la Ecuación 9:

$$t = \frac{v_f - v_0}{a}$$

**Ecuación 9. Tiempo en función de la velocidad y aceleración**

donde  $v_0$  es velocidad inicial que se asume en cero, i.e., la locomotora inicialmente está en reposo,  $v_f$  es la velocidad final en [m/s], y  $a$  es la aceleración en [ $\text{m/s}^2$ ]. Por lo cual, para este caso se obtiene un tiempo estimado de 300 s. Finalmente se halla la potencia de arranque como se indica en la Ecuación 10:

$$P = \frac{E_k}{t}$$

**Ecuación 10. Potencia en función de la energía cinética**

obteniendo un resultado de 3.98 MW en el riel. Es importante aclarar que, al adicionar el peso de la locomotora la potencia mínima requerida aumenta, además, si en las especificaciones técnicas de la locomotora sólo se indica la potencia neta generada por el motor diésel (sea diésel – eléctrica o dual), se debe considerar las pérdidas en el generador y motor de tracción, y la potencia necesaria para los servicios auxiliares. Generalmente las locomotoras eléctricas especifican la potencia en la rueda.

Hoy en día prácticamente todas las locomotoras de alta potencia son alimentadas en CA o bajo esquema de multisistema que opera en los cuatro niveles de tensión empleados en Europa (i.e., 25 kV, 15 kV, 3 kV y 1.5 kV) [55]. En la Tabla 5, se hace una breve revisión



tecnológica de algunas locomotoras diésel – eléctricas (a modo informativo), y algunas duales y eléctricas puras que se podrían considerar para el caso de estudio.

Tabla 5. Comparativa entre diferentes fabricantes de locomotoras [55, pp. 1–4], [63, p. 2], [74, pp. 15–17], [75, p. 16], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91]

Locomotoras	Modo de operación	de	Velocidad máxima [km/h]	Potencia [kW]	Fuerza tractora de arranque [kN]	Comentarios
<b>Series</b> TRAXX AC <b>Bombardier</b>	Eléctrica pura: 15 kV <sub>CA</sub> @ 16.7 Hz y 25 kV <sub>CA</sub> @ 50 Hz		140	5600	300	La TRAXX AC3 LM con “Last Mile Diesel Engine” que permite la operación en las del tren en las últimas millas, ya sea para llegar a parqueaderos y terminales no electrificados a baja velocidad.
<b>Series</b> TRAXX DC <b>Bombardier</b>	Eléctrica pura: 3 kV <sub>CC</sub>		160	5400	300	Empleadas para el transporte de carga y pasajeros. Se han ordenado para Italia, España con la TRAXX F140

							DC y y en Polonia la TRAXX P160 DC.
<b>Series MS de Bombardier</b>	<b>TRAXX</b>	Eléctrica pura: 1.5 kV <sub>CC</sub> , 3 kV <sub>CA</sub> @ 16.7 Hz y 25 kV <sub>CA</sub> @ 50 Hz	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.
<b>Series DE de Bombardier</b>	<b>TRAXX</b>	Diésel eléctrica	- 140, 160 o 200	2200 2400	- 270		Locomotoras TRAXX P160 DE y TRAXX F140 DE.
			(dependiendo de la configuración)				
<b>Series ALP 46 de Bombardier</b>		Eléctrica pura: 12.5 kV <sub>CA</sub> @ 25 Hz,	160	5300	316		La ALP 46 opera desde 1996 para el <i>New Jersey Transit</i> ,
<b>Series ALP 46A de Bombardier</b>		12.5 kV <sub>CA</sub> @ 60 Hz y 25 kV <sub>CA</sub> @ 60 Hz	201	5600	316		y la ALP 46A opera desde 2008 como una versión mejorada.
<b>Series ALP 45DP de Bombardier</b>		Híbridas duales: 25 kV <sub>CA</sub> y 12.5 kV <sub>CA</sub> @ 60 Hz	o 160 (diésel) 201(eléctrica)	2700 (diésel) 4000 (eléctrica)	316		Puede emplearse para el transporte de mercancías

---

							ligeras y de peso medio.
<b>IORE</b>	<b>de</b>	Eléctrica	80		10800	1200	Transporte carga de aproximadamente 8200 Tn en pendientes de 10% a velocidades mínimas de 35 km/h.
<b>Bombardier</b>		pura: 15 kV <sub>CA</sub> @ 16.7 Hz					
<b>Vossloh/Stadler</b>		Híbridas	o 50 (diésel)	700	317		Existen en versión para transporte de pasajeros y de carga.
<b>clase 88</b>		duales: 25 kV <sub>CA</sub> @ 50 Hz	160 (eléctrica)	(diésel) 4000 (eléctrica)			
<b>Euro 4000</b>	<b>de</b>	Eléctrica	120 (ambos modos)	2800 (diésel)	475		Empleadas para el transporte de mercancía.
<b>Vossloh</b>		pura: 1.5 kV <sub>CC</sub> , 3 kV <sub>CC</sub> , 15 kV <sub>CA</sub> @ 16.7 Hz y 25 kV <sub>CA</sub> @ 50 Hz		5000 (eléctrica)			
<b>DE 12</b>	<b>de</b>	Diésel	- 120	1200	300		Locomotoras de cuatro ejes con un peso entre 80 y 90 Tn.
<b>Vossloh</b>		eléctrica					
<b>DE 18</b>	<b>de</b>	Diésel	- 120	1800	300		
<b>Vossloh</b>		eléctrica					

---

<b>PRIMA M4 de Alstom</b>	Eléctrica pura: 1.5 kV <sub>CC</sub> , 3 kV <sub>CA</sub> @ 16.7 Hz y 25 kV <sub>CA</sub> @ 50 Hz	140	(transporte de carga) 200	6400	350	Locomotoras modulares y reconfigurables adaptada a las necesidades de cada operador.
<b>PRIMA T8 de Alstom</b>	Eléctrica pura: 3 kV <sub>CC</sub> y 25 kV <sub>CA</sub> @ 50 Hz	120		10000	833	Capaces de mover hasta 9000 Tn. Pueden funcionar en clima extremo (-50 °C a +50 °C).
<b>Dash 9-40BBW de General Electric (Dash 9 Series)</b>	Diésel eléctrica	-	-	Motor diésel de 4100 HP	316	Están equipadas con un motor diésel de dieciséis cilindros y se emplean
<b>AC44i de General Electric (AC4400 Series)</b>	Diésel eléctrica	-	-	Motor diésel de 4500 HP	738	principalmente para el transporte de carga pesada.
<b>ES43BBi de General Electric (Evolution Series)</b>	Diésel eléctrica	-	-	Motor diésel de 4500 HP	-	Están equipadas con un motor de doce cilindros producen la misma potencia que con uno de dieciséis, reduce las emisiones de óxido nitroso y optimiza
<b>ET44AC de General Electric (Evolution Series)</b>	Diésel eléctrica	-	112	Motor diésel de 4400 HP	-	

---

						el consumo de combustible.
<b>PH37ACi (L620)</b>	Diésel	- 120		Motor	450	Diseñadas para
<b>de General Electric (Powerhaul Series)</b>	eléctrica			diésel de		operar en
				3700 HP		Alemania y Turquía
						cumpliendo con
						todos los
<b>PH37ACi (L621)</b>	Diésel	- 120		Motor	544	estándares
<b>de General Electric (Powerhaul Series)</b>	eléctrica			diésel de		europes, como la
				3700 HP		UIC 505-1.
<b>PH37ACmi (L621)</b>	Diésel	- 120		Motor	544	Diseñadas para
<b>de General Electric (Powerhaul Series)</b>	eléctrica			diésel de		cumplir con las
				3700 HP		regulaciones del
						Reino Unido.
<b>Vectron series Siemens</b>	<b>MS de</b>	Eléctrica	200	6400	300	Empleadas en
		pura: 1.5 kV <sub>CC</sub> ,				Europa para el
		3 kV <sub>CC</sub> , 15				transporte de
		kV <sub>CA</sub> @ 16.7				mercancía y
		Hz y 25 kV <sub>CA</sub>				pasajeros.
		@ 50 Hz				
<b>Vectron series Siemens, high power</b>	<b>AC de</b>	Eléctrica	200	6400	300	
		pura: 1.5 kV <sub>CC</sub> ,				
		3 kV <sub>CC</sub> , 15				
		kV <sub>CA</sub> @ 16.7				

---

<b>Vectron series Siemens, medium power</b>	<b>AC</b>	Hz y 25 kV <sub>CA</sub> @ 50 Hz	160	5600	300	
<b>Vectron series Siemens</b>	<b>DC</b>	Eléctrica pura: 3 kV <sub>CC</sub>	200	5200	300	
<b>Vectron series Siemens</b>	<b>DE</b>	Diésel eléctrica	- 160	2400	275	
<b>Amtrak Sprinter ACS-64 de Siemens</b>	<b>Cities</b>	Eléctrica pura: 25 kV <sub>CA</sub> y 12.5 kV <sub>CA</sub> @ 60 Hz y 12 kV <sub>CA</sub> @ 25 Hz	201	6400	320	Desarrolladas para el transporte de pasajeros, ordenada por la Corporación Nacional de Ferrocarriles de Pasajeros de los Estados Unidos, en octubre de 2010. El sistema de freno eléctrico que permite ahorrar entre el 10-15% de energía al año.

Como se pudo evidenciar en la búsqueda tecnológica, los fabricantes estadounidenses centran sus esfuerzos en la construcción de locomotoras diésel –eléctricas y en desarrollar

mejoras sustanciales en la eficiencia de los motores diésel y la transmisión, mientras que los fabricantes europeos se enfocan en el desarrollo de las locomotoras eléctricas puras o duales. Tal como asegura Vitins [62], el desarrollo de la tracción eléctrica cesó en Estados Unidos en los años 70, al punto que operadores ferroviarios como es el caso del *New Jersey Transit* cubren sus necesidades de locomotoras eléctricas en el exterior.

Los siguientes elementos son considerados para la selección de la locomotora que se utilizará en los análisis posteriores:

- Como primera consideración no se tienen en cuenta las locomotoras diésel – eléctricas debido a que este proyecto se basa en la electrificación de la ruta Sanín – Poveda, por esta razón se excluyen las locomotoras de la *General Electric*, las DE 12 / DE 18 de *Vossloh*, las TRAXX DE de *Bombardier* y las Vectron DE de *Siemens*.
- En segundo lugar, aunque para los estudios técnicos se considera la electrificación completa de la ruta, en realidad un proyecto de este tipo puede demorar más en su construcción inicial por la infraestructura requerida para un sistema de este tipo. Adicionalmente, los costos de inversión inicial son más altos si se tiene en cuenta que no hay retorno de la inversión sino hasta el momento que entre en explotación comercial. Por otra parte, las locomotoras eléctricas puras dependen de la continuidad del servicio eléctrico para operar, aunque se empleen esquemas de operación hasta N-2 (véase p. 58), por lo que puede ser necesario disminuir la frecuencia de despacho de trenes para evitar sobrecargas o voltajes por debajo de lo permitido por los estándares. También, al ser una tecnología que no se ha implementado en Colombia, es recomendable que su inclusión sea por partes, de modo que genere confianza e interés en los operadores ferroviarios. Por estas razones, se excluyen las locomotoras PRIMA de *Alstom*, las IORE, ALP 46, 46A, TRAXX AC, TRAXX DC, TRAXX MS de *Bombardier*, Vectron eléctricas y ACS-64 de *Siemens*.

- En tercer lugar, se espera que la locomotora pueda operar largas distancias, tanto en modo diésel como eléctrico, a una velocidad adecuada, por lo cual se descarta la TRAXX AC3 LM de *Bombardier*.
- En cuarto lugar, considerando que las locomotoras deben operar a una frecuencia de 60 Hz, los requerimientos técnicos pueden ir de la mano con los acuerdos de la AAR, se descartan las *Stadler class 88* y EURO4000 de *Vossloh*, por lo cual la alternativa más adecuada es la ALP 45DP de *Bombardier*, que además cuenta con una potencia ajustada a las necesidades del caso de estudio. Es importante aclarar que, aunque esta locomotora puede trabajar en modo múltiple hasta dos, gracias a la operación en modo *push-pull* [92, 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.
- Finalmente, aunque esta locomotora sólo se puede alimentar mediante catenaria en CA (25 kV a 60 Hz, 12.5 kV a 60 Hz, y 12 kV a 25 Hz), es la solución para electrificar un sistema de este tipo, la cual se aborda en el dimensionamiento del sistema de electrificación (véase p. 95).

### **2.3 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ELECTRIFICACIÓN**

De acuerdo con los voltajes de operación ya estandarizados para la electrificación de sistemas ferroviarios (véase p. 60), y teniendo en cuenta tanto el criterio de varios autores como experiencias de otros países en donde ya se encuentra aplicado este tipo de tecnologías, se hace una comparación entre los sistemas de corriente CC y CA, que permita seleccionar el más adecuado para el presente trabajo, como se indica en la Tabla 6. Es importante aclarar que de entrada no se tienen en cuenta los sistemas de electrificación en CA de 15 kV a 16.7 Hz debido a que su uso se limita en la actualidad para algunos países europeos donde ya se encuentra instalada la infraestructura. Este sistema se empleaba para



reducir las pérdidas de los motores de tracción debido a la alta reactancia de los bobinados, lo cual causaba arco en el conmutador y altas corrientes parásitas debido a las piezas polares magnéticas no laminadas diseñadas para CC (motor universal) [58]. Sin embargo, su mayor desventaja es que el peso de los transformadores a bordo de las locomotoras era mucho mayor con un cambiador de tomas.

Tabla 6. Análisis comparativo entre los sistemas de corriente continua y alterna [17], [19], [20], [22], [31], [93], [94]

Características	600 V <sub>CC</sub> 750 V <sub>CC</sub>	ó	1500 V <sub>CC</sub>		3000 V <sub>CC</sub>		1x25 kV <sub>CA</sub>		2x25 kV <sub>CA</sub>
<b>Clase de servicio</b>	Tranvías y metros urbanos	y	Metros interurbanos y regionales ferrocarriles		Ferrocarriles y líneas convencionales	y	Ferrocarriles y líneas de alta velocidad		Ferrocarriles y líneas de alta velocidad
<b>Tráfico</b>	Pasajeros		Pasajeros y mixto		Mixto		Mixto		Mixto
<b>Velocidad de circulación [km/h]</b>	70-100		70-140		≤220		≤350		≤350
<b>Líneas de alimentación recomendado</b>	Nivel de tensión 2. MV.	de	Nivel de tensión 3.	de	Nivel de tensión 3.	de	Nivel de tensión 4. HV.	de	Nivel de tensión 4. HV- EHV
<b>Potencia SET [MVA]</b>	1.5-10		1.5-10		1.5-10		10-60		10-80
<b>Distancia entre SET<sup>a</sup> [km]</b>	1.5 (600 V) y 3 (750 V <sub>CC</sub> )		3-10		6-20		30-60		30-80

<sup>a</sup> Las distancias pueden variar de acuerdo a las condiciones de demanda y frecuencia de operación, diseño de la catenaria y la disponibilidad de las fuentes.

Como se puede evidenciar en la tabla anterior, 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 [93]. Según Nyberg y Pollard [30], 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 Reino Unido y 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 [58].

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, 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. Por otro lado, a modo de ejemplo, asumiendo que las SET tienen la misma potencia y que por lo menos se requieran dos locomotoras en modo *push – pull* para mover la carga necesaria (i.e., 8 MW en la rueda), la corriente máxima que se requiere en el pantógrafo con una eficiencia del 87% [55], es de 409 A mediante alimentación CA con Factor de Potencia (FP) de 0.9, y de 3065 A mediante alimentación en CC a 3000 V con corrientes de retorno mayores, por lo cual, los cables para alimentar el sistema en CC deben soportar 7.5 veces más corriente que en CA, lo que se traduce en sobrecostos de los conductores y la infraestructura requerida para soportar el peso de éstos. La ventaja de la alimentación en CC es que las pérdidas son menores (sólo influye el componente resistivo), sin inducción de corrientes y acople entre fases. Por lo tanto, teniendo en cuenta las razones expuestas anteriormente, el sistema a 3000 V queda descartado para el presente estudio.

Al comparar entre los sistemas 1x25 kV y 2x25 kV, este último tiene la ventaja que la distancia entre las SET puede ser mucho mayor y los autotransformadores pueden estar separados hasta 15 km a diferencia del primero, donde los TB pueden estar distanciados hasta 8 km (véase p. 47), con un potencia mucho menor e instalados en poste, lo que se traduce en menores costos, pero sacrificando los niveles de EMI, Campos Electromagnéticos (EMF, por sus siglas en inglés), voltajes riel – tierra y mayores caídas de tensión por estar conectados en serie (aumenta la impedancia equivalente). Por lo cual, es precisamente allí donde juega un papel importante los sistemas 2x25 kV, donde aparte de aumentar la potencia en el LAC y mejorar los perfiles de tensión, los campos magnéticos tienden a cancelarse mutuamente [30, p. 10], [94, p. 13] (*feeder* positivo y *feeder* negativo). Sin embargo, el costo de la catenaria aumenta debido a que tiene *feeder* negativo, pero se compensa en cierta medida con el sistema 1x25 kV debido a la distancia entre SET, por lo cual no es un factor decisivo.

De acuerdo con Barcenilla [32, p. 36], para los rutas cuyas distancias son mayores de 100km, el sistema 2x25 kV es más económico en comparación con el sistema 1x25 kV, haciendo la claridad de que depende en gran medida de las fuentes de alimentación necesarias y las distancias que hay a éstas.

Teniendo en cuenta la distancia de la ruta Sanín – Poveda de aproximadamente 442km, sería más rentable la electrificación en 2x25 kV, con un costo aproximado de Euros (EUR) 220.000.000 al 2010.

En síntesis, para el caso de estudio, la electrificación de sistemas ferroviarios en CA a 2x25 kV es la más adecuada por las razones expuestas anteriormente y que se resumen a continuación:

- Debido a la extensión del sistema ferroviario proyectado (442 km aproximadamente) se disminuyen las pérdidas en la catenaria y los calibres de los conductores debido a que se opera a un nivel de tensión más elevado, lo que se traduce también en menores caídas de tensión.
- Soporta altas densidades de tráfico y mayores velocidades de operación [95].
- Sistema adecuado para la robustez del proyecto y las potencias requeridas (transporte de mercancías).
- Tiene menor impacto ambiental debido a que requiere menos SET y LT.
- Las SET son más económicas, debido a que no requieren grupos rectificadores.
- Las líneas de alimentación a la SET se pueden derivar directamente del SIN.
- La electrificación ferroviaria implica grandes inversiones, pero los costos operativos son más bajos que el diésel, debido a que el mantenimiento es más barato [33].
- En las zonas rurales, las fuentes de alimentación en HV o EHV son limitadas o alejadas, particularmente entre Amalfi y Caucasia, por lo cual instalar LT desde las fuentes más cercanas a varias SET (si fuera para sistemas menores de 2x25 kV), aumentaría considerablemente el costo del proyecto teniendo en cuenta las Bahía de Línea (BL) respectivas.

### CAPÍTULO 3

#### CASO BASE

La propuesta es que el diseño inicial se base en el cálculo analítico de la potencia requerida en la rueda para alimentar el sistema ferroviario planteado, considerando la pendiente, la cantidad de locomotoras y vagones, así como la velocidad máxima de operación. Por lo tanto, para determinar la potencia requerida en el pantógrafo, se debe considerar la eficiencia de la locomotora en conjunto y el consumo en servicios auxiliares. A partir de estos resultados se obtiene un insumo para determinar la potencia de las subestaciones y los calibres de las catenarias.

Como se evaluó en el capítulo anterior, la locomotora empleada para el caso de estudio es la ALP 45DP (véase p. 86) y los vagones de categoría L de acuerdo a la UIC 571-4, cuyas características se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Especificaciones del material rodante [79], [63], [92], [96]

	Modo eléctrico	Modo diésel	Vagón UIC 571-4
Potencia en el riel [MW]	4000.0 (5360 HP)	2684.5 (3600 HP)	-
Fuerza de tracción al arranque [kN]	316.0	316.0	-
Peso [Tn]		130.6	12
Sección transversal [m <sup>2</sup> ]		12.98	11.61 <sup>a</sup>
Largo del vehículo		21.8	12.52
Número de ejes por vehículo		4	4

<sup>a</sup> Se obtiene a partir de la ficha técnica de la locomotora ALP 45DP (véase ANEXOS).

<sup>b</sup> Se obtiene a partir de las tablas de constantes de la *National Canadian* 1990 (véase p. 103). ANEXOS.

Para emplear el método analítico se debe tener en cuenta varios conceptos previos asociados a la capacidad de arrastre de las locomotoras y que permitirán construir la curva de fuerza tractora en función de la velocidad.

### 3.1 FUERZA DE TRACCIÓN

La fuerza de tracción es donde el par de torsión del motor se convierte en la fuerza de empuje disponible para mover un tren en el punto de contacto entre la rueda y el riel, y que es paralela a la dirección de movimiento [97], [98]. La fuerza de tracción en fuerza de arranque o inicial, continua y máxima.

#### 3.1.1 Fuerza de tracción inicial

Determina la fuerza inicial en [N] de que dispone una locomotora determinada para mover un tren partiendo de un punto muerto, i.e., velocidad igual a cero. La fuerza de tracción máxima es la que puede ser aplicada sin que la rueda se deslice y se calcula mediante la Ecuación 11 [99].

$$TE_{max} = \mu \times W$$

Ecuación 11. Fuerza tractora máxima

donde  $\mu$  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 [63, 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 si se considera la misma fuerza tractora para ambas locomotoras. Se

considera que a menor factor de adhesión se puede lograr una mejor aceleración [92, p. 58]. Otra consideración y no menos importante es que la fuerza de tracción inicial no depende directamente de la potencia de los motores de tracción.

### 3.1.2 Fuerza de tracción máxima

Es la fuerza de tracción más alta en [N] que se pueda generar bajo condiciones normales sin sobreesfuerzos de la locomotora. Se presenta a bajas velocidad 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,  $F_{adhsión} = F_{Tracción}$ . La fuerza de tracción máxima se puede describir mediante la Ecuación 12 [98]:

$$\frac{\mu_0}{1 + 0.01 \times v} \times W = \frac{P \times \eta \times 3.6}{v}$$

$$v = \frac{1}{\frac{\mu_0 \times W}{3.6 \times \eta \times P} - 0.01}$$

Ecuación 12. Velocidad de cambio de régimen

donde  $\mu_0$  es el factor de adhesión (fricción) estático que depende de la rigidez de los materiales en contacto,  $W$  es la sumatoria de pesos en el eje en [N],  $P$  es la potencia nominal de los motores en [W],  $\eta$  es la eficiencia de los motores (Potencia útil en la ruedas/Potencia nominal de los motores) y  $v$  es la velocidad en [km/h]. 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.

### 3.1.3 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  $P$  en [W] y la velocidad  $v$  en [km/h], como se define en la Ecuación 13.

$$F = \frac{P}{v} \times \eta \times 3.6$$

Ecuación 13. Fuerza tractora continua

La fuerza de tracción a plena potencia varía inversamente con la velocidad a una potencia constante [100, p. 166]. Esta ecuación es útil cuando hay equilibrio dinámico, i.e., aceleración igual a cero.

### 3.2 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 puede determinar mediante la Ecuación 14,[97], [101].

$$R = A + Bv + Cv^2$$

Ecuación 14. Ecuación de W. J. Davis

donde  $A$  es la componente de resistencia a la rodadura, la cual es independiente de la velocidad del tren y se relaciona con la fricción entre la rueda y el riel,  $B$  es la resistencia del tren, la cual es dependiente de la velocidad y se relaciona con la fricción producida por las partes móviles internas del motor,  $C$  es el coeficiente de arrastre basado en forma del frente de tren y otras características afectadas por la turbulencia de aire, y  $v$  es la velocidad del tren. Existen numerosas variantes de la ecuación de Davis, como la modificada y ajustada,



la *China National Railways*, *Koffman*, *Australian*, *Freight train-roller bearing-Strahl*, *Freight train-roller bearing-Strahl*, *Freight train-eight wheels Russia*, etc. [98], donde se hacen ajustes a las constantes de acuerdo con los resultados experimentales, e.g., midiendo el esfuerzo de tracción en el enganche de la locomotora y el dinamómetro, obteniendo las constantes mediante el método de mínimos cuadrados [102, p. 290], aplicados para cada país o asociación ferroviaria en particular. En este caso, por recomendación del ingeniero Pedro Botero de la SAI y por ser una ecuación aplicada para el caso americano, que se asimila a la locomotora seleccionada y donde la carga axial por eje es elevada, se emplea la *Canadian National* de 1990 [103], que es una versión reciente de la ecuación de Davis, presentada en la Ecuación 15 expresada en [N/t]

$$R_r = 7.36 + 80.09 \frac{N}{w} + \frac{v}{10.94} + \frac{C \times A \times v^2}{540.75 \times w}$$

**Ecuación 15. Ecuación de la Canadian National 1990**

donde:

- $w$ : Peso total de la locomotora o vagón en [Tn].  $C$ : 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 (véase ANEXOS).
- $v$ : Velocidad en [km/h].
- $A$ : Área de la sección transversal de la locomotora o vagón en [m<sup>2</sup>]. Para el caso se consideran vagones cargados, como se especifica en la Tabla 7, (si se requiere analizar con los vagones vacíos se debe modificar la sección del vagón a 2.32m<sup>2</sup>).
- $N$ : Número de ejes por locomotora o vagón.

Para calcular la fuerza de resistencia total del tren en [N], en función de la velocidad  $v$ , se emplea la Ecuación 16.

$$F_{r(total)}(v) = R_{r(L)} \times w_L + R_{r(LR)} \times w_{LR} \times n_{LR} + R_{r(v)} \times w_v \times n_v$$

**Ecuación 16. Suma de fuerzas de resistencia a la rodadura**

donde  $R_{r(L)}$ ,  $R_{r(LR)}$  y  $R_{r(v)}$  es la resistencia a la rodadura de la locomotora líder, remolques, y vagones en [N/t] respectivamente,  $w_L$ ,  $w_{LR}$  y  $w_v$  es el peso de la locomotora líder, remolques y vagones respectivamente en [Tn],  $n_{LR}$  y  $n_v$  es la cantidad de locomotoras remolques y vagones respectivamente. Nótese que cuando sólo se tiene una locomotora, la cantidad de locomotoras remolques es cero, pero si se tiene más de una en acople (modo *push – pull* o unidades múltiples), la líder es sólo una y las demás se consideran remolques.

Partiendo de una sola locomotora acoplada a cincuenta vagones, que equivale a un peso total de 2255.6 Tn, asumiendo la eficiencia  $\eta$  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 19.

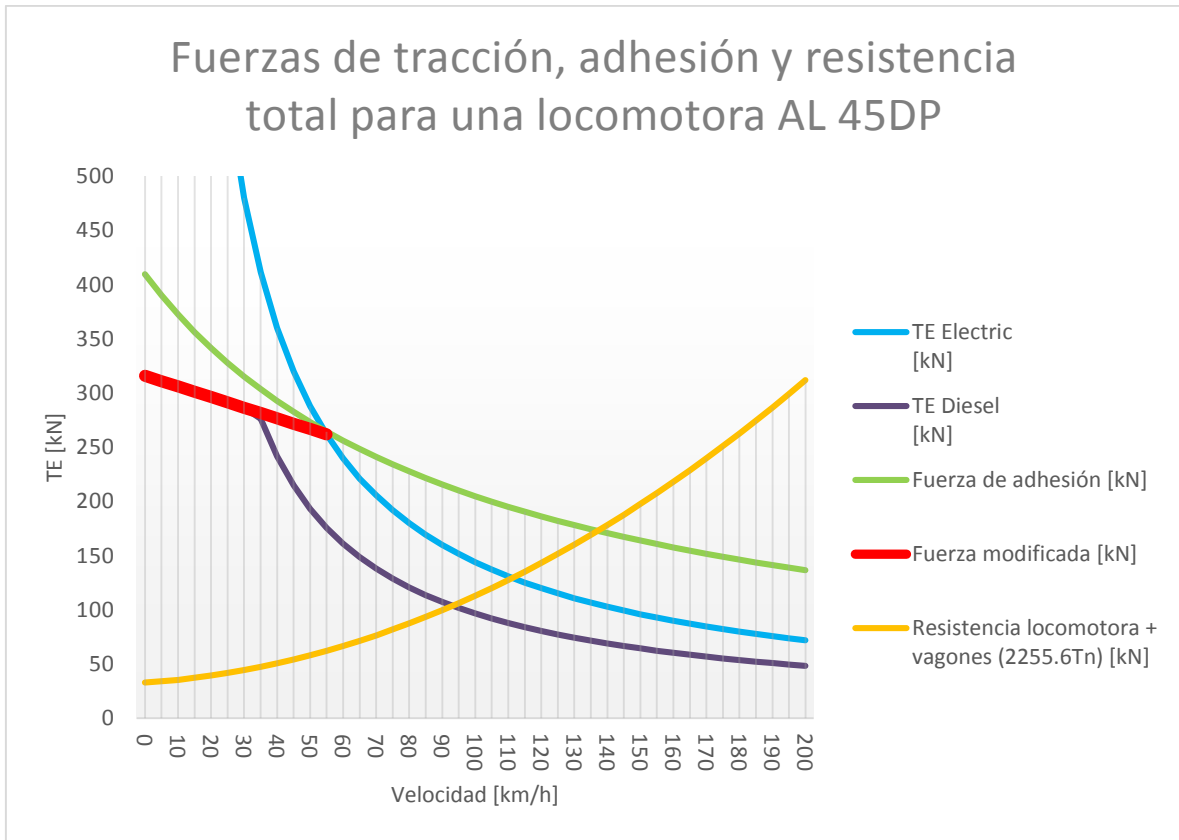


Figura 19. Fuerzas en función de la velocidad para una locomotora ALP 45DP

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 [97]. 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 (véase p. 139).

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.

### 3.3 RESISTENCIA POR PENDIENTE LONGITUDINAL

La resistencia por pendiente longitudinal depende de la masa del tren y la pendiente, como se expresa en la Ecuación 17 en [N/kg], 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 (aparte del frenado regenerativo), para el posterior arranque o ascenso de ese mismo u otro tren.

$$R_p = g \times \sin(\alpha)$$

Ecuación 17. Ecuación de la resistencia por pendiente longitudinal

donde  $g$  es la aceleración originada por la tierra en [m/s], y  $\alpha$  es el ángulo de inclinación en radianes. Como en sistemas ferroviarios ese ángulo debe ser pequeño, entonces  $\sin \alpha$  es aproximadamente igual a  $\tan \alpha$ , por lo tanto se puede expresar en términos de porcentaje de pendiente de la vía  $p$ , i.e., una pendiente del 2% es equivalente a decir que en un tramo de 100 m se incrementa la altura en 2 m. Luego, como se quiere expresar en [N/t], se obtiene una aproximación mediante la Ecuación 18 [98].

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

**Ecuación 18. Ecuación aproximada de la pendiente longitudinal**

Finalmente, se puede evaluar la fuerza sobrante del tren en función de la velocidad  $v$  de acuerdo a la Ecuación 19, expresada en [N].

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

**Ecuación 19. Ecuación de fuerza sobrante en función del tiempo**

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  $n_{LT}$  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.

En la Tabla 8 se evalúan los posibles escenarios cuando se tiene hasta cuatro locomotoras en modo de unidades múltiples para transportar la misma carga pagada (de acuerdo a las características de operación determinadas por el fabricante), lo que equivale a una potencia total en la rueda de 16 MW, que sirve como un estimativo de la cantidad óptima requerida para mantener una velocidad aproximada a la requerida durante toda la ruta, incluso cuando se tenga pendientes del 2% sin afectar considerablemente el cronograma de despacho y frecuencia. No obstante, el ideal serían siete locomotoras para garantizar la velocidad durante todo el recorrido, con una potencia en el riel de 25.56 MW, pero incurriendo en sobrecostos de todo tipo.

Tabla 8. Pendiente máxima para mantener una velocidad de 120km/h

Cantidad de locomotoras	Modo eléctrica [%]	Modo diésel [%]
<b>ALP 45DP</b>		
<b>2</b>	0.39383	0.0563
<b>3</b>	0.8412	0.36119
<b>4</b>	1.244446	0.635999

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, la cual se considera que hace parte de la ingeniería de detalle.

Partiendo del hecho de que esas mismas cuatro locomotoras puedan cumplir con las condiciones más exigentes del caso del estudio, 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 como máximo. Pero si adicionalmente hay un tren viajando en sentido contrario con pendiente negativa máxima del -2% y conectado del mismo subsector bajo condiciones normales, (regenerando mínimo el 20% de energía para países montañosos [55]), la potencia mínima que puede estar entregando a la red es aproximadamente 2.3 MVA, la cual puede ser de ayuda para el tren que está en ascenso.

## CAPITULO 4

### CASO COMPLETO

Con la información obtenida en los capítulos anteriores, se puede construir el modelo eléctrico del sistema 2x25 kV que permita seleccionar los conductores de la catenaria, las SET, los AT, y las LT con sus respectivos niveles de tensión, de acuerdo con las posibles fuentes de conexión.

En la actualidad existen diferentes aplicativos para calcular el comportamiento en el tiempo de la tensión, corrientes, flujos de potencia, FP, energía, etc., debido a lo complejo que sería realizar estos cálculos de forma manual mediante métodos numéricos, particularmente para sistemas en CA por el tamaño de las matrices. Para el presente trabajo se emplea *OpenTrack* como simulador de operación ferroviaria mediante un cálculo de paso de tiempo constante. El aplicativo se compone de dos herramientas computacionales, los cuales están sincronizados en una co-simulación. Estos son el *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 [104]. Para la formulación del sistema electrificado, se deben conocer las variables de diseño necesarios que sirven de insumo para la simulación. Estas variables son la frecuencia de despacho, la ubicación de las SET y AT, incluyendo las características eléctricas, el tipo de catenaria, la sección de cada conductor, y el trazado de una sola vía o doble vía.

#### **4.1 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 [69], 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 Envigado – Arboletes, 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 7.19 tren/día para una carga pagada de 1525 Tn/tren repartida en cincuenta vagones (véase p. 103). 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.

#### **4.2 UBICACIÓN DE LAS SET, ATI Y ATM**

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 especificaciones de la Tabla 6 (distancia entre SET), pero limitadas preferiblemente a 60 km, con el objetivo de distribuir tres 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, sin embargo, no se considera para el alcance del presente estudio.

La ubicación de los AT se hace conservando una distancia igual entre ellos para SET subsecuentes. Están compuestos por un 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 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 [22].

Tabla 9. Ubicación de las SET, ATI y ATM para la ruta Sanín - Poveda

Nombre	Distancia [km]	Distancia entre SET [km]	Distancia entre ATI [km]	Estaciones de parada
ATI1 Envigado	0		0	ET Envigado
ATI2 Universidad	10		10	
<b>SET1 Bello</b>	20	20		El con taller y patio Bello
ATI3 Girardota	34		14	
Grupo ATM4 Barbosa	47		13	El Barbosa (47.6km)
ATI5 Pradera	60		13	
<b>SET2 Porcecito</b>	69	49		
ATI6 Hojas Anchas	80		11	
Grupo ATM7 La Leona	90		10	
ATI8 Guacabe	100		10	
<b>SET3 Porce II</b>	110	41		
ATI9 Malabrigo	123		13	
Grupo ATM10 Amalfi	136		13	El Amalfi (134.5km)
ATI11 Altamira	149		13	
<b>SET4 Madreseca</b>	164	54		
ATI12 Galilea	175		11	
Grupo ATM13 El bosque	186		11	
ATI14 Buenos aires	197		11	

<b>SET5 El Pato</b>	209	45		El el Pato
<b>ATI15 Bellavista</b>	224		15	
<b>Grupo ATM16 Cacerí</b>	239		15	
<b>ATI17 Guarumo</b>	254		15	
<b>SET6 Caucasia</b>	269	60		EIM Caucasia
<b>ATI18 La Apartada</b>	285		16	
<b>Grupo ATM19 Buenavista</b>	301		16	
<b>ATI20 Plaza Bonita</b>	317		16	
<b>SET7 Planeta Rica</b>	334	65		El Planeta Rica
<b>ATI21 El Higuito</b>	350		16	
<b>Grupo ATM22 El pozón</b>	365		15	
<b>ATI23 Montería Sur</b>	380		15	EIM Montería Sur
<b>SET8 Montería Sur</b>	395	61		
<b>ATI24 El Tambo</b>	410		15	
<b>ATI25 Norina</b>	425		15	
<b>ATI26 Arboletes</b>	440		15	ET Arboletes

Como se puede observar en la Tabla 9, los ATI18, 20, 21 y ATM19, no cumplen con las distancias recomendadas en la literatura consultada; sin embargo, las distancias se exceden sólo por un kilómetro, que mediante la simulación se podría concluir si es necesario adicionar otro AT. Por otra parte, 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 45km, 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.

Partiendo del hecho que un tren cargado en su totalidad, sobre una pendiente del 2%, demanda la potencia máxima por tren y que, adicional a esto, se considera que hay varios trenes conectados de un mismo subsector, la potencia máxima requerida para suplir este circuito de tracción puede aumentar o disminuir dependiendo de si el otro tren está un tramo plano, de ascenso o de descenso. Es por esto que si un tren sale cada 1.83 h, y asumiendo que el trazado es de una sola vía, excepto en las estaciones de parada donde es doble vía, por razones económicas y recomendación de los ingenieros de la SAI, 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. De esta manera, para determinar su potencia es necesario evaluar algunos escenarios entre ellos el más demandante en cuanto a requerimientos de potencia, asumiendo un FP de 0.9 y eficiencia de locomotora del 87%. Es importante aclarar que en ningún caso se consideran las pérdidas en la catenaria.

#### **4.2.1 Ambos trenes en terreno plano**

Dos trenes que viajan en sentido contrario pueden estar alimentados de un mismo transformador de tracción cuando este no coincide con una estación de parada y están transitando en un tramo con pendiente del 0%. En este caso la potencia total requerida es de 11.35MVA.

#### **4.2.2 Un tren en ascenso y otro en descenso**

Se cumple las mismas condiciones que el caso anterior, pero con pendientes diferentes de cero. Considerando entonces que hay un tren en ascenso en sentido Arboletes – Envigado sobre una pendiente del 2%, cargado en su totalidad, 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 un tren en descenso Envigado – Arboletes sobre una pendiente del -2%, cargado con 953.125 Tn pagadas (correspondiente a las 2500000 Tn/año de exportaciones), equivalente a treinta y dos vagones cargados totalmente, y dieciocho descargados, podría entregar a la red una potencia aproximada de 1.5 MW (considerando el 20% de energía regenerada por frenado), la cual puede ser de ayuda para el tren que está en ascenso.

#### **4.2.3 Ambos trenes en ascenso**

En este caso se cumplen las mismas condiciones que el caso anterior para el tren en sentido Arboletes – Envigado, pero el otro que se encuentra en sentido Envigado – Arboletes también está en ascenso sobre una pendiente del 2%, cargado con 953.125 Tn pagadas (en total el material rodante pesa 2098.4 Tn). Bajo estas condiciones se requiere una potencia en el pantógrafo de 18.23 MVA como máximo, i.e., que la potencia requerida por el transformador de tracción en este escenario es de 38.66 MVA considerado el caso más crítico. Otro escenario sería que este último se encuentre sobre una pendiente del 1%, demandando una potencia en el pantógrafo de 12.52 MVA, lo que equivale a una potencia total de 32.95 MVA.

#### **4.2.4 Un tren en ascenso y otro en terreno plano**

Para este escenario se considera el mismo tren transitando en sentido Arboletes – Envigado sobre una pendiente del 2% y el segundo tren se transitando en terreno plano con una carga pagada de 953.125 Tn, requiriendo una potencia en el pantógrafo de 4.66 MVA, lo que equivale a una potencia en el transformador de tracción de 25.1 MVA.

Aunque el escenario donde ambos trenes están en ascenso es el más crítico, en cuanto a la potencia requerida no es común debido a que debe darse que ambos se encuentren sobre pendientes iguales en diferentes puntos del tramo asociado al mismo subsector (30.5 km como máximo para uno de los transformadores de tracción asociados a la SET8 Montería Sur) y tener una distancia mayor a la longitud del tren (715 m).

Por lo tanto, teniendo en cuenta las condiciones analizadas anteriormente, 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 Tabla 3, para líneas férreas principales puede durar máximo 2h.

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 de la EN50329 al igual que los transformadores de tracción.

En la Tabla 10 se resume entonces las características de los transformadores de tracción y los AT seleccionados. Las impedancias de estos se especifican de acuerdo a Pilo [29, p. 133], las pérdidas en vacío (hierro) del 1% y con carga (cobre) del 2% para una eficiencia del 97%.

Tabla 10. Características de los transformadores y AT empleados para el caso de estudio [5], [17], [20], [29]

	Transformador	AT
<b>Potencia [MVA]</b>	30	10
<b>Tensión primaria [kV]</b>	110 ó 220 <sup>a</sup>	55
<b>Tensión secundaria [kV]</b>	55	25
<b>Pérdidas en vacío [kW]</b>	300	100
<b>Pérdidas con carga [kW]</b>	600	200
<b>Impedancia de cortocircuito</b>	Entre fase y neutro: 15%. Entre fases de 5%.	5%
<b>Nivel de cortocircuito [kA]</b>	12	2.5

<sup>a</sup> La selección depende de la fuente de alimentación más cercana y que esta cumpla con los requerimientos de los estándares de la IEC 61000-2-12 como la EN 50160.

### 4.3 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. Por ejemplo, donde hay un tren en ascenso y otro en terreno plano la demanda de corriente es 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 [105], usando el procedimiento para optimización multi-criterio descrito en [106] como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Conductores empleados para el caso de estudio [105]

Catenaria	Caso 1 (C5)
Hilo de contacto	Bz 150mm <sup>2</sup>
Sustentador	Bz 100mm <sup>2</sup>
Feeder positivo	-
Feeder negativo	LA-110
Cable de retorno	LA-110
Péndolas	Bz-16

En este caso donde no se tiene *feeder* positivo con el costo de catenaria más económico. La capacidad de corriente permanente a 80 °C distribuida entre el LAC y el sustentador es de 920 A, como se indica en la Tabla 12.

El radio equivalente en [mm] se calcula mediante la Ecuación 20, el cual es necesario para los datos de entrada de la simulación

$$r_{eq} = a' \times \sqrt{\frac{A'}{\pi}}$$

Ecuación 20. Ecuación del radio equivalente

donde  $a'$  es el factor que se selecciona de [4, p. 231] (véase ANEXOS),  $A'$  es la sección transversal del conductor en [mm<sup>2</sup>]. La especificación de los conductores se hace empleando información de varios fabricantes (véase ANEXOS).

Tabla 12. Características de los conductores empleados [107], [108], [109]

Tipo de conductor	Capacidad a 80 °C [A]	Sección nominal [mm <sup>2</sup> ]	Número de conductores	Radio equivalente [mm] <sup>a</sup>	Resistencia a 20 °C [Ω/km]	Material
Cu-ETP 95 (sustentador)	380	95	19	4.2	0.193	Pletina de Cobre o cobre electrolítico
AC 150 (Hilo de contacto)	540	150	1	5.4	0.12	Platina de Cobre o

<b>LA-110</b>	330	116.2	30 Al, 7 ST	5.0	0.3066	cobre electrolítico Cu-ETP Aluminio con alma de acero galvanizado
<b>Bz-16</b>	100	16	1	2.3	-	Bronce, magnesio
<b>Riel</b>				79.5	0.0339	Acero

<sup>a</sup> Se toma la referencia de [21].

La ubicación geométrica de los conductores de la catenaria para la vía principal y secundaria (en las estaciones de parada solamente) se indican en la Tabla 13 y Tabla 14 respectivamente, a partir de [110, p. 207]. Se toma como referencia en “x” la tierra física y, en “y” la posición del primer riel de izquierda a derecha. Otras consideraciones adicionales es que las zonas neutras tienen una distancia de 402 m para garantizar la separación entre los pantógrafos [29, p. 18].

**Tabla 13. Ubicación geométrica de los conductores de la vía principal**

<b>Posición</b>	<b>x</b>	<b>Y</b>
<b>Sustentador [m]</b>	0.7175	7.41
<b>Hilo de contacto [m]</b>	0.7175	6.26
<b>Riel [m]</b>	0	0.96
<b>Feeder negativo [m]</b>	4.635	7.46

**Tabla 14. Ubicación geométrica de los conductores de la vía secundaria**

<b>Posición</b>	<b>x</b>	<b>Y</b>
<b>Sustentador [m]</b>	-4.2175	7.41
<b>Hilo de contacto [m]</b>	-4.2175	6.26
<b>Riel [m]</b>	3.5	0.96



---

<b>Feeder negativo [m]</b>	Se emplea el mismo de la catenaria principal
----------------------------	--

---

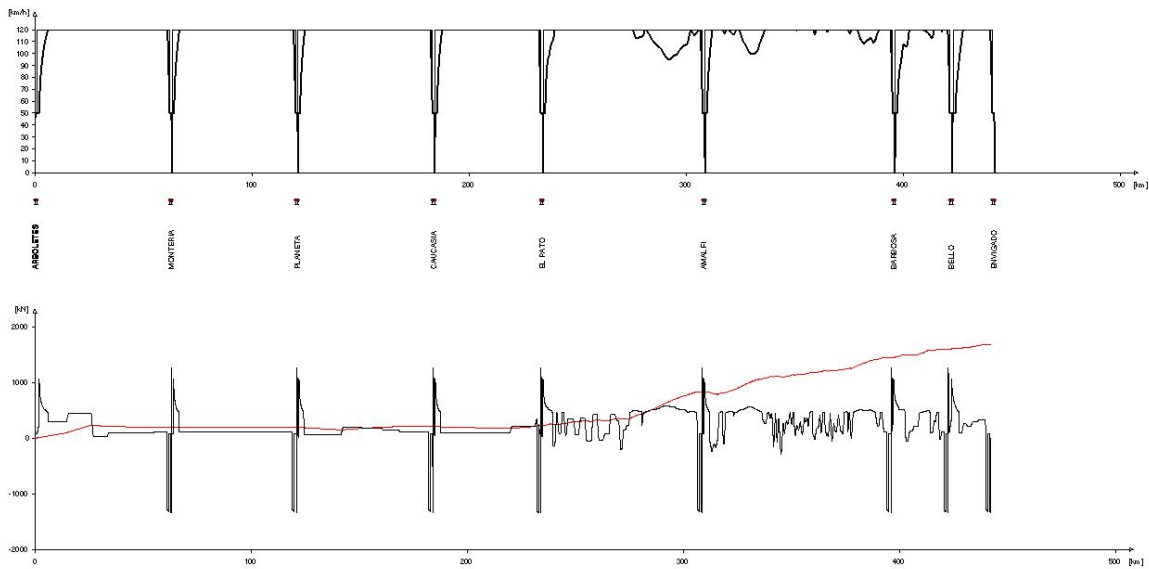
La desaceleración teórica se estima igual a la aceleración calculada para alcanzar la velocidad objetivo de 120 km/h. i.e.,  $0.11 \text{ m/s}^2$  (véase p. 86).

#### **4.4 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN**

A continuación se hacen algunos comentarios respecto a los resultados arrojados por la simulación de dos escenarios distintos. El trazado se considera en línea recta, i.e., no se tiene en cuenta las curvas.

##### **4.4.1 Simulación del caso de mayor demanda de potencia.**

Escenario de un solo tren en el trayecto Arboletes – Envigado, donde el consumo de energía es mayor. En la Figura 20 se observa el comportamiento de la velocidad y fuerza empleada por el tren a lo largo del recorrido.



**Figura 20. Velocidad y fuerza 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 100km/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.

La fuerza requerida en el arranque es de aproximadamente 1200 kN, la cual se podría suplir en su mayoría por la fuerza generada durante la desaceleración; sin embargo, aunque no se puede aprovechar en su totalidad, la energía almacenada durante el frenado regenerativo sería de gran ayuda para su arranque empleando acumuladores de energía como los ultracapacitores.

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  $0.11 \text{ m/s}^2$ , optimizando la operación en modo diésel – eléctrico sin sobreesfuerzos de los motores diésel.

#### 4.4.2 Simulación del caso de 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 15 se observa la potencia instantánea máxima requerida por cada SET para una simulación de 4 h, 45 min y 22 s, correspondiente al tiempo que demora el último tren en llegar a la estación final y que en este caso es el asociado a la ruta Arboletes - Envigado, debido a que tiene mayores pendientes positivas, aumentando los tiempos de viaje. Los tiempos de parada en las estaciones son de 5 s, sólo para efectos de simulación del sistema eléctrico y no del tráfico ferroviario.

Tabla 15. Potencia instantánea máxima por cada SET

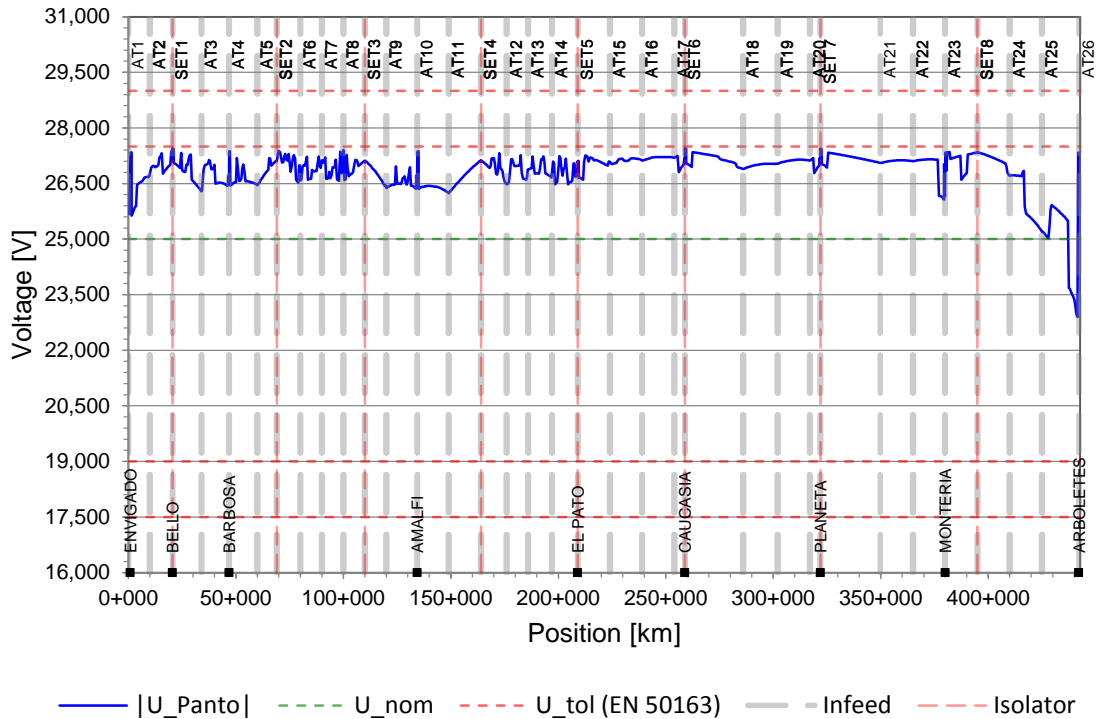
	P [MW]	Q [MVar]	S [MVA]
<b>SET1 Bello</b>	15.59	2.53	15.79
<b>SET2 Porcecito</b>	12.02	1.07	12.07
<b>SET3 Porce II</b>	11.95	1.16	12.00
<b>SET4 Madreseca</b>	12.24	1.05	12.29
<b>SET5 El Pato</b>	23.89	1.80	23.96

<b>SET6 Caucasia</b>	13.18	1.05	13.22
<b>SET7 Planeta Rica</b>	13.57	1.20	13.62
<b>SET8 Montería Sur</b>	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 (véase p. 115). 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). Otro aspecto interesante es que el FP para estas medidas instantáneas estuvo entre 0.953 y 0.997.

Por otro en la Figura 21 se observa el comportamiento del voltaje respecto a la posición del pantógrafo en el trayecto, y se delimitan las zonas neutras en cada SET con sus respectivos AT.

**Pantograph Voltage (min), Ruta Sanín - Poveda, Track Principal, km 0+000 to 442+700, 00:00:00 - 04:45:23**



**Figura 21. 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 de acuerdo con la Tabla 2. 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 *feder* positivo).

#### 4.4.3 Simulación en DigSILENT

Para esta simulación se tiene en cuenta varias consideraciones, las cuales se nombran a continuación.

- Todas las cargas asociadas a los transformadores de tracción se consideran de potencia constante, i.e., no varían con los cambios en la magnitud del voltaje, lo cual se asemeja al comportamiento de un motor. La tecnología empleada es dos fases en conexión estrella neutro (YN), como se observa en la Figura 22.
- Entre las SET1 y 4 se considera una potencia instantánea de 32.95 MVA (véase p. 115), 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 (véase p. 115), equivalente a 22.585 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 15.
- Los parámetros de las LT a 110 kV que llegan a las SET desde las fuentes de alimentación, se consideran iguales a las de la LT Cocorná – La Sierra de circuito sencillo en Cable de Aluminio con Refuerzo Central de Acero. (ACSR, por sus siglas en inglés) 477 HAWK. Para el caso de las LT a 220 kV se consideran iguales a las del Salto IV – Guadalupe IV en ACSR 1113 BLUEJAY, circuito sencillo como se indica en la Tabla 16

Tabla 16. Parámetros de las LT empleadas

	LT a 110 kV	LT a 220 kV
<b>Resistencia de secuencia 1 y 2 a 20 °C [<math>\Omega</math>/km]</b>	0.118	0.0585
<b>Reactancia de secuencia 1 y 2 [<math>\Omega</math>/km]</b>	0.4882	0.4913
<b>Resistencia de secuencia cero [<math>\Omega</math>/km]</b>	0.2924	0.3215
<b>Reactancia de secuencia cero [<math>\Omega</math>/km]</b>	1.8135	1.4574
<b>Susceptancia de secuencia 1 y 2 [<math>\mu</math>S/km]</b>	3.3949	3.3698

<b>Susceptancia de secuencia cero [<math>\mu\text{S}/\text{km}</math>]</b>	1.9475	1.0267
<b>Corriente nominal [A]</b>	613	777

- Se emplea el ModeloElectricoMP\_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 de la Tabla 10. 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 kV<sub>LL</sub> y 27.5 kV<sub>LN</sub> nominal, con tecnología de fase “bifásica” neutro (BI-N), el cual se aterriza.

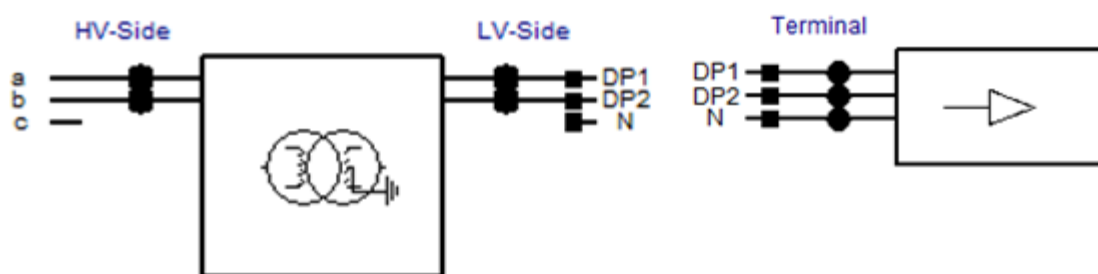


Figura 22. Topología del transformador de tracción en DigSILENT

- Los desbalances se miden en los PCC. Por lo cual no se puede garantizar que las Barras de 110kV en las SET se puedan emplear para alimentar cargas rurales, por ejemplo.
- Los resultados de la simulación evaluados para cada SET se discuten a continuación como un insumo para determinar el nivel de tensión adecuado para alimentar estos sistemas sin violar los límites de desbalance recomendados por los estándares de la IEC 61000-2-12 y EN 50160 durante todo el tiempo en barras de HV y EHV, es por esta razón que se consideran posibles escenarios de demanda máxima instantánea. Se aclara que las barras del SIN ya tienen un desbalance inherente a la conexión de las SET, las cuales se consideran para la simulación.
- Las SE candidatas para alimentar las SET se seleccionaron de acuerdo con su ubicación usando *Google Earth* y Gobierno Digital Colombia [111], y el nivel de tensión se seleccionó con datos del ModeloElectricoMP\_04-2017\_Agentes como se observa en la Figura 23.

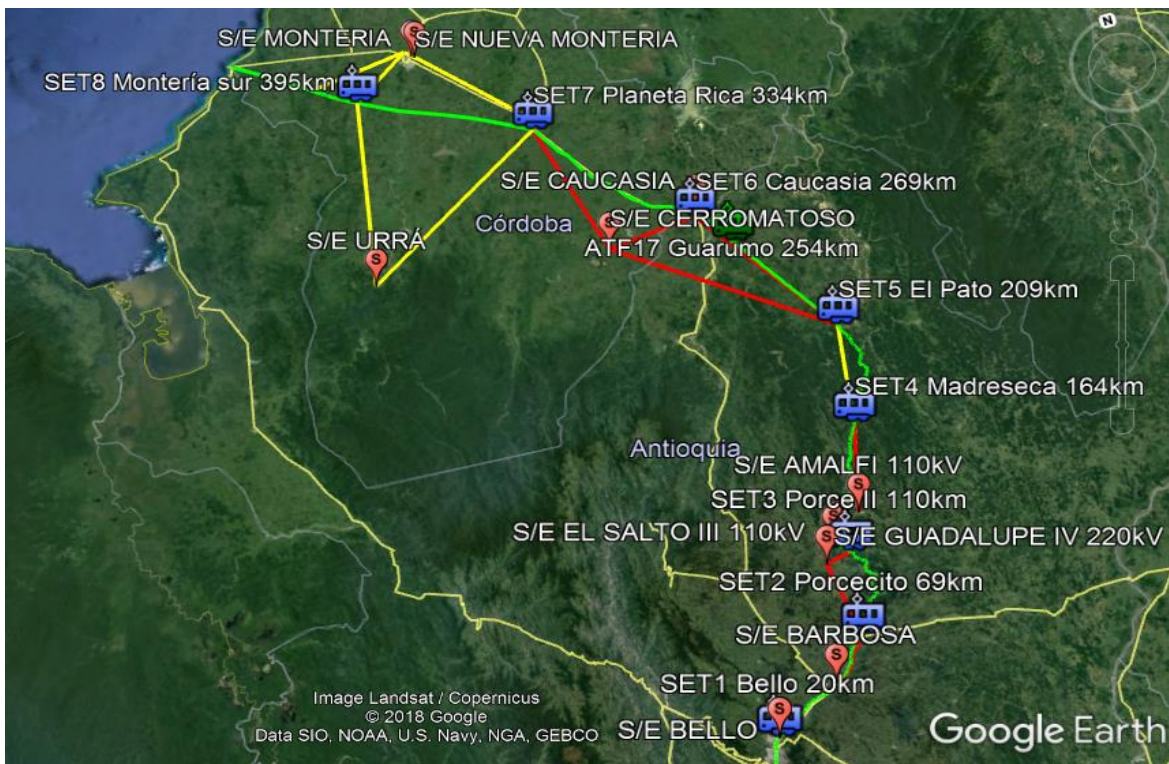


Figura 23. Ubicación de las posibles SEs para alimentar las SET



En la figura anterior se identifican 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.

#### *4.4.3.1 Evaluación SET1 Bello*

En el caso de la conexión de la SET Bello a la SE Bello 110kV no se tienen restricciones con un desbalance del 1.45%. Para este caso se debe construir un LT de aproximadamente 0.15 km.

#### *4.4.3.2 Evaluación SET2 Porcecito*

Para el caso de la conexión de la SET Porcecito se considera que es más conveniente alimentarla desde SE Barbosa 110 kV, donde el desbalance es del 2.29 % y las caídas de tensión son aceptables sin considerar sobrecargas. Para este caso se debe construir una LT de aproximadamente 19.6 km. Se evaluó la posibilidad de alimentarla desde SE Porcecito 110 kV, pero los desbalances en este caso son mayores al 3% independiente del modo de rotación de las conexiones de los transformadores de tracción. La solución a este desbalance sería, entre otras, emplear una conexión Scott, o cerrar el anillo mediante la SE El Salto, pero finalmente la inversión saldría más costosa en comparación con la solución ya planteada por la longitud de la LT.

#### *4.4.3.3 Evaluación SET3 Porce II*

En el caso de la conexión de la SET Porce II a la SE El Salto 110 kV se tiene un desbalance menor al 1.65%. Para este caso se debe construir un LT de aproximadamente 9.1 km.

#### *4.4.3.4 Evaluación SET4 Madreseca*

Para el caso de la conexión de la SET Madreseca se debe de tener en operación la LT Amalfi – La Cruzada 110 kV para garantizar que el desbalance sea menor al 3%. Sin embargo, se podría considerar la conexión Scott como alternativa para no depender de esta interconexión. De igual forma, cada transformador de tracción se debe conectar siguiendo esta configuración: uno desde las fases R y S y el otro desde las fases R y T para que no coincidan con la conexión de los transformadores de tracción de la SET Porce II alimentado de la fase R y S y la S y T, por ejemplo. Lo anterior quiere decir que se debe garantizar la rotación de las fases a las cuales se conectan los transformadores de tracción en el lado de alta para garantizar que los desbalances sean lo más bajo posible, lo que al final afectaría la barra de 110 kV en la SE El Salto.

#### *4.4.3.5 Evaluación SET5 El Pato*

Para la conexión de la SET El Pato se tuvieron en cuenta varias consideraciones:

- Cerca de ésta no hay fuentes cercanas, siendo la SET Madreseca una alternativa con una distancia aproximada de 35.7 km en línea recta. Sin embargo, debido a que la fuente no es robusta (SE Amalfi), la demanda pico instantánea que debe asumir la fuente es aproximadamente 120 MVA por lo que, considerando la distancia de la LT en 110 kV la cual asciende a más de 67 km, se descarta esta opción.
- Otra alternativa es alimentar desde la SE Caucasia mediante una LT de 61 km. Sin embargo, al tener conectada ya la SET Caucasia ocasionaría sobrecarga en las LT a 110 kV Cerromatoso - Caucasia 1 y Cerromatoso – Caucasia 2, que de igual forma conllevan a tener desbalances mayores al 3%.
- Finalmente, una alternativa sería alimentarla desde SE Cerromatoso mediante una LT en 110 kV de aproximadamente 79.4 km con un desbalance menor del 2%.

#### *4.4.3.6 Evaluación SET6 Caucasia*

Al revisar este caso se considera que es más conveniente alimentarla desde la SE Caucasia 110 kV, aunque se evidencia que el desbalance es mayor al 3% y la fase que se encuentra más descargada para este caso es la T. Por lo tanto, se recomienda conectar un transformador de tracción de las fases R y T y el otro a de las S y T, llevando el desbalance al 0.91%.

#### *4.4.3.7 Evaluación SET7 Planeta Rica y SET8 Montería Sur*

Para la conexión de la SET Planeta Rica, se plantea alimentar desde la SE Nueva Montería 110 kV mediante una LT de aproximadamente 51.7 km, en la cual uno de los transformadores de tracción se alimenta de las fases R y S, y el otro de la S y T. Sin embargo, para obtener un desbalance menor del 3% se debe cumplir que la SET Montería Sur alimentada desde la SE Montería 110 kV, mediante una LT de aproximadamente 29 km, conecte uno de sus transformadores de tracción de las fases R y T y el otro de la S y T. Es importante aclarar que aún mediante esta configuración se tiene una sobrecarga del 103% en la fase T de la LT Nueva Montería – Montería 110 kV.

#### *4.4.3.8 Recomendaciones adicionales para conexión a fuentes de 220 kV*

Debido a las restricciones que se tiene con la fuente de la SET El Pato a 110 kV y la distancia de la LT Cerromatoso - SET5 El Pato, se plantea alimentar mediante la SE Porce II 220 kV que adicionalmente serviría como fuente de la SET Madreseca mediante una LT de aproximadamente 80 km, sin restricciones de carga y garantizando un desbalance en el PCC de 1.22%, donde la desventaja sería el costo de inversión. Igualmente, se recomienda alimentar las SET Planeta Rica y Montería Sur desde la SE Montería 220 kV mediante dos LT

de aproximadamente 51.7 km y 30.2 km respectivamente, obteniendo desbalances del 2.08% mediante rotación de fases no coincidentes entre ambas SET, para que cargue equitativamente a través de la red eléctrica. El esquema de conexión eléctrico para el sistema de alimentación 2x25kV se encuentra en ANEXOS.

#### 4.4.3.9 Análisis de Flicker

En la Tabla 17 se muestran los resultados de la relación entre la variación de la potencia aparente ( $\Delta S$ ), considerando las máximas instantáneas de cada SET (véase p. 125) y las potencias de cortocircuito en la barra ( $S_{sc}$ ) de cada fuente, que se simula en DigSILENT mediante el método de la IEC 60909 [112] para una falla monofásica franca a tierra con tiempo de aclaración de 1s.

Tabla 17. Variaciones de potencia por SET de acuerdo a las fuentes

	Fuente	Fuente opcional	$\Delta S/S_{sc}$ [%]
<b>SET1 Bello</b>	Bello 110kV		1.99
<b>SET2 Porcecito</b>	Barbosa 110kV		3.59
<b>SET3 Porce II</b>	El Salto 110kV		1.86
<b>SET4 Madreseca</b>	Porce II 220kV		1.29
<b>SET5 El Pato</b>	Porce II 220kV		0.94
		Cerromatoso 110kV	2.06
<b>SET6 Caucasia</b>	Caucasia 110kV		9.65
<b>SET7 Planeta Rica</b>	Montería 220kV		4.88
		Nueva Montería 110kV	6.06
<b>SET8 Montería Sur</b>	Montería 220kV		4.88
		Montería 110kV	6.47

Empleando el método analítico mediante las variaciones máximas por minuto de acuerdo con la Tabla 4, 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.

Se propone como trabajo futuro el análisis detallado del *flicker* cuando se tengan los diseños básicos del sistema electrificado.

## CAPITULO 5

### 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 [113] que desarrolla una velocidad máxima de 150 km/h [114, p. 50]. La potencia en la rueda puede estar alrededor de los 3400 HP, asumiendo un 85% de eficiencia [97].
- 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.

Las consideraciones que se tienen en cuenta para este análisis cuantitativo son las siguientes:

- Solamente se tiene en cuenta la potencia equivalente necesaria para transportar la misma carga pagada en relación con la locomotora ALP 45DP que se emplea para el estudio técnico (véase p. 86), i.e., las restricciones en cuanto a la cantidad de vagones que pueda transportar cada ferrocarril, ni las curvas de tracción. De igual forma, con los resultados obtenidos en la frecuencia de despacho (véase p. 111), se deduce que la cantidad de

locomotoras que se requieren para cumplir con la operación deseada para el primer año es una flota de veintinueve locomotoras.

- La tasa representativa del mercado del dólar se hace con respecto al 14 de enero de 2018 con un valor de COP 2,855.56 y la tasa de cambio COP/EUR igual a 3,443.
- Como el alcance de este trabajo se centra en evaluar la pre-factibilidad financiera de un sistema ferroviario eléctrico, se parte del hecho de que ya el proyecto comienza la explotación comercial en el año uno, por lo tanto no se tiene en cuenta los costos iniciales de inversión en las obras civiles (vía, estaciones, talleres, sistemas de comunicaciones, muelles, gastos pre-operativos, etc.), administración y control, imprevistos, etc. No obstante, el sistema eléctrico se debe asumir desde este mismo año debido a que no tiene sentido considerar esta alternativa para un sistema con locomotoras diésel – eléctrica.
- En ninguno de los escenarios se evalúa la opción de emplear una mezcla de diferentes tipos de locomotoras, incluso se respeta que sean del mismo fabricante y referencia por facilidad, aunque se podría considerar para futuros proyectos evaluar la posibilidad de iniciar con locomotoras diésel – eléctricas e ir migrando gradualmente a las duales o eléctricas puras conforme se vaya electrificando la ruta.
- En ninguno de los escenarios se incluyó el costo de inversión en los vagones y los gastos de administración, operación y mantenimiento asociados a éstos, debido a que en todos es igual y no depende directamente del tipo de locomotora. En otras palabras, se requiere transportar la misma carga pagada en los tres casos de acuerdo con el período a evaluar.
- En todos los escenarios los trenes tienen la capacidad para alcanzar la velocidad máxima de operación, sin embargo, no se considera la tasa de aceleración donde es menor para la locomotora diésel – eléctrica en comparación con la dual en modo eléctrico y la eléctrica pura, que podría representar algún retraso en los programas de despacho y entrega, lo que implicaría en teoría un aumento adicional en la flota.

## 5.1 PARÁMETROS INICIALES

Para iniciar la evaluación económica que permita determinar la viabilidad entre las tres alternativas se determina los datos del material rodante, financiación y operativos adicionales.

### 5.1.1 Datos del material rodante

De acuerdo con la relación de las locomotoras diésel – eléctrica y la eléctrica pura se obtiene que la flota en el año uno se encuentra entre 21 y 46 locomotoras respectivamente, con una inversión aproximada de acuerdo con la Tabla 18.

Tabla 18. Costos de cada locomotora [114], [115], [116], [117], [118]

Referencia	Vida útil [años]	Cantidad de locomotoras al inicio	Costo unitario de Locomotoras [Millones de COP]	Costo total Locomotoras [Millones de COP]
MP40PH-3C	20	46.00	\$15,465	\$711,370
ALP 45DP dual	30	29.00	\$28,177	\$817,140
ALP 46A	30	21.00	\$31,168	\$654,523

Para todos los escenarios se asume un valor de salvamento igual a cero, aunque al final de la vida útil estimada por el fabricante se podría hacer un reacondicionamiento de la locomotora diésel eléctrica de alrededor del 60% del costo de una nueva, lo que puede incrementar su vida útil entre 15 y 20 años [119]. Comparado con un valor de salvamento del 5% aplicado para este mismo caso [114, p. 33], lo hace una alternativa bastante atractiva para cualquier operador ferroviario.



Aunque la información de la vida útil de cada locomotora en específico se tomó de diferentes referencias, esta puede ser menor o mayor de acuerdo con las condiciones ambientales, perfiles de inclinación, sobreesfuerzos, rigurosidad en los mantenimientos, y modo de operación más frecuente para la locomotora dual, por ejemplo. Lo mismo ocurre con los precios que dependen mucho de cada proyecto y de la cantidad de locomotoras solicitadas.

Para determinar el precio en COP al año actual, se empleó el Índice de Precios del Productor (IPP) anual (véase ANEXOS) por uso o destino económico de los bienes de acuerdo con el Banco de la República [12]. Por otra parte, es bastante complicado conseguir información referente a los precios de algunas locomotoras, lo cual cierra la posibilidad de analizar otras alternativas de locomotoras diésel – eléctrica de mayor potencia, lo cual disminuiría la flota inicial requerida y por ende sería una alternativa de mejores opciones en comparación con la competencia.

### **5.1.2 Información financiera**

Para obtener los diferentes indicadores de rentabilidad de cada uno de los escenarios se tienen en cuenta los siguientes datos de entrada para el estudio financiero:

- Se emplea el indicador de inflación básica de 3.68% correspondiente a enero de 2018, de acuerdo con información del Banco de la República [120], y el cual se utiliza para calcular el factor de inflación  $FI_n$  a partir del segundo periodo de acuerdo a la Ecuación 21, expresada en [%].

$$FI_n = (1 + TI)^{n-1}$$

**Ecuación 21. Cálculo del factor de inflación por periodo**

donde  $TI$  es la tasa de inflación básica que se mantiene constante [%] debido a que no hay forma de predecir el desequilibrio producción y la demanda que causa un aumento generalizado de los precios de los productos y servicios, e  $n$  es el periodo correspondiente. Se considera este indicador para el precio del flete, el costo de la energía empleada por las locomotoras eléctricas y diésel, y los gastos de mantenimiento de las locomotoras y del sistema eléctrico.

- La depreciación de las locomotoras y el sistema eléctrico es igual en todos los períodos y se determina mediante la Ecuación 22, expresada en [\$].

$$DP = \frac{CT - VS}{VU}$$

- **Ecuación 22. Cálculo de la depreciación de los activos**

donde  $CT$  es el costo total de la flota o electrificación en el año uno en [\$],  $VS$  es el valor de salvamento al final de la vida útil en [\$].y  $VU$  corresponde a la vida útil que aplique para cada caso expresada en años. Para las locomotoras el valor del salvamento es cero como se explicó en los datos del material rodante (véase p. 135).

- La tasa de interés empleada para el préstamo del proyecto es del 3.7 % con cifras del Banco de la República [121, p. 31], empleando la tasa de interés fija promedio ponderado de los nuevos créditos contratados de la deuda externa.
- De acuerdo con la ley 1607 de 2012 [122], una empresa debe pagar impuestos de renta del 25% y el impuesto sobre la renta para la equidad del 9% durante los dos primeros años, a partir del tercer año se reduce al 8%.
- Al momento en que el proyecto termine obras civiles, se invierte en la flota de locomotoras y sistema eléctrico (dependiendo del caso) para el año uno, donde el 40% del capital se obtiene mediante préstamos, y el otro 60% en capital de socios mediante alianzas público privadas, por ejemplo [69, p. 21]. Estos aportes pueden variar de acuerdo con el capital disponible de los socios, por eso puede estar sujeto a cambios.

- Se espera un crecimiento constante de las importaciones y exportaciones del 3% y 5%, respectivamente, después de primer año de operación [69, p. 63].

### 5.1.3 Información operativa

Para los datos operativos adicionales a los ya calculados en la frecuencia de despacho, se hacen las siguientes estimaciones en el año uno:

- El consumo de energía eléctrica en el pantógrafo corresponde al calculado en la simulación en *OpenTrack* del tren en el trayecto Arboletes – Envigado (representa el escenario de mayor demanda de energía) sin tener en cuenta el frenado regenerativo, con un total de 32.594 kWh. Este valor, dividido por la distancia de la ruta y el número de locomotoras que compone el tren, da como resultado 18.44 kWh/km. En consecuencia, se emplea la misma metodología para estimar la energía necesaria de combustible diésel, mediante el resultado de la energía requerida en la rueda para la misma simulación con un valor de 16.54 kWh/km por locomotora, que dividido por la eficiencia total de la locomotora diésel – eléctrica (asociando las componentes del motor diésel, generador, inversor, motor de tracción, engranajes y servicios auxiliares), asciende a 32.7% [74, p. 28], para un consumo de 50.59 kWh/km. Es importante aclarar que este valor se considera igual para ambas locomotoras que emplean motor diésel o dicho de otra manera la energía necesaria en la rueda es el mismo para todas las locomotoras sin tener en cuenta las curvas de tracción respectivas en vista de que implicaría hacer simulaciones para cada caso.
- El consumo en galones de combustible diésel se determina con referencia a los resultados del cálculo anterior, donde un galón americano de combustible equivale a 40.7 kWh, por lo tanto, para la ALP 45DP y MP40PH-3C se estima un consumo de 3.34 gal/km y 3.15 gal/km por tren, respectivamente.
- El precio de referencia del Aceite Combustible Para Motores (ACPM) en Medellín para enero de 2018 fue de COP 8,238 por galón [123], y el precio de referencia para la

energía eléctrica se toma del contrato CN2011-0102 [124, p. 81] entre Empresas Públicas de Medellín E.S.P y Empresa de transporte Masivo Valle de Aburrá LTDA suscrito en abril de 2011 para la conexión en nivel IV, el cual tiene un valor de COP 235.39 por kWh, actualizado a enero de 2018 mediante el IPP mensual.

- El precio del flete establecido es de 0.035USD/km-Tn de acuerdo con información de empresas transportadoras [69, pp. 63–64], que actualizado al IPP de enero de 2018 y TMR del 14 de enero del mismo año, equivale a 110.55 COP/km-Tn.

En la medida que la locomotora eléctrica disminuya la dependencia del ACPM para su operación, se abaratan los gastos por el costo de la energía eléctrica en comparación con el diésel y los mantenimientos de las locomotoras, inclusive, se puede ahorra energía por regeneración, que en países montañosos puede llegar al 30% [55, p. 3]

#### 5.1.4 Sistema eléctrico

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 la Ecuación 23, 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/s<sup>2</sup>, como se consideró en el dimensionamiento del material rodante (véase p. 85).

$$D = v_0 \times t + \frac{1}{2} a \times t^2$$

Ecuación 23. Ecuación de distancia para un sistema uniformemente acelerado

donde  $v_0$  es velocidad inicial es cero, i.e.,  $v_f$  es la velocidad final en [m/s],  $a$  es la aceleración en [m/s<sup>2</sup>] y  $t$  es el tiempo en [s].

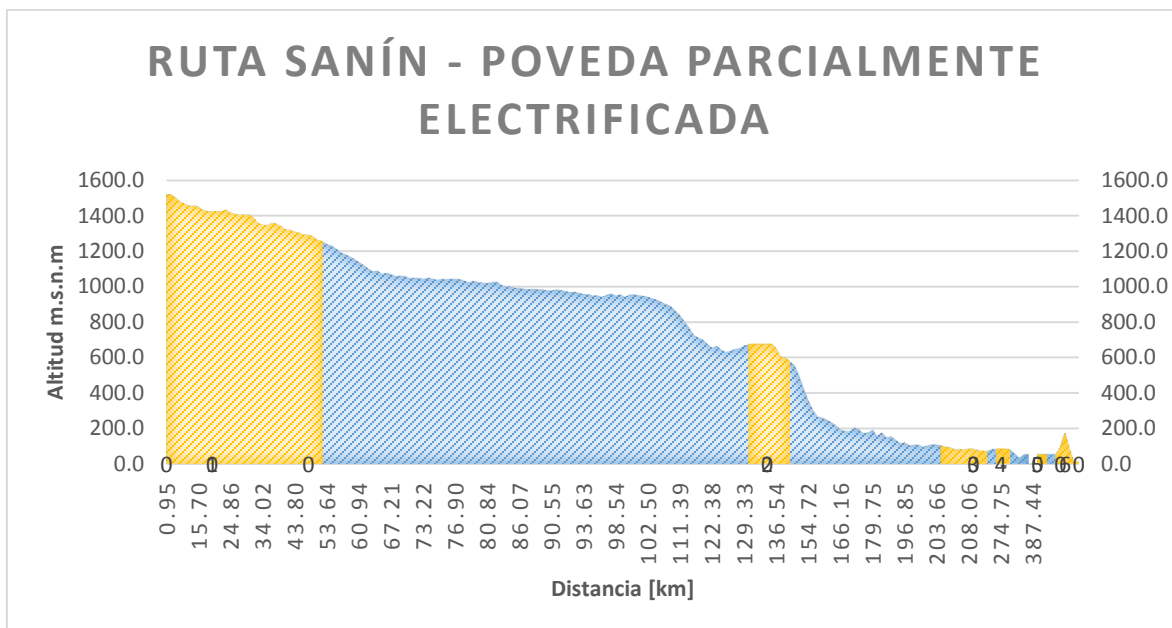
Para el caso de las estaciones terminales de Envigado e intermedia de Barbosa, éstas se alimentan mediante catenaria desde la SET que se propone instalar en la EI con taller y Patio de Bello, con el fin de aprovechar la distancia que hay entre estas y la regulación de tensión, que no justificaría la 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 19 se expone la propuesta de ubicación de las SET con sus respectivos ATI (si los requiere).

Tabla 19. Ubicación de las SET y ATI la ruta Sanín – Poveda parcialmente electrificada

Nombre	Distancia [km]	Distancia ATI [km]	entre Estaciones de parada
ATI1 Envigado	0	0	ET Envigado
ATI2 Universidad	10	10	
<b>SET1 Bello</b>	20		El con taller y patio Bello
ATI3 Girardota	34	14	
ATI4 Barbosa	47	13	El Barbosa (47.6km)
ATI5 La Herradura	52	5	
ATI6 Malabrigo	131	5	
<b>SET2 Amalfi</b>	136		El Amalfi (134.5km)
ATI7 Altamira	141	5	
ATI8 Buenos aires	204	5	
<b>SET3 El Pato</b>	209		El el Pato
ATI9 Bellavista	214	5	
ATI10 Guarumo	264	5	
<b>SET4 Caucasia</b>	269		EIM Caucasia

<b>ATI11 La Apartada</b>	274	5	
<b>ATI12 Plaza Bonita</b>	329	5	
<b>SET75 Planeta Rica</b>	334		El Planeta Rica
<b>ATI13 El Higuito</b>	339	5	
<b>ATI14 El pozón</b>	375	5	
<b>ATI15 Montería Sur</b>	380	15	EIM Montería Sur
<b>ATI16 Leticia</b>	395	15	
<b>SET6 El Tambo</b>	410		
<b>ATI17 Norina</b>	425	15	
<b>ATI18 Arboletes</b>	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 sobre costos 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. En la Figura 24 se observa el perfil de elevación, indicando en amarillo los tramos electrificados, con la respectiva ubicación de las SET numeradas y las estaciones de parada identificadas con “cero”.



**Figura 24. Perfil de elevación de la Ruta Sanín – Poveda con tramos electrificados.**

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.

En la Tabla 20 se especifican las distancias de las LT a partir de *Google Earth* para cada caso parcial y totalmente electrificado, con el objetivo de obtener un insumo para el costo de estas de acuerdo con el nivel de tensión.

**Tabla 20. Distancia de las LT.**

LT	Totalmente electrificado[km]	Parcialmente electrificado [km]
<b>Bello / SET Bello 110kV</b>		0.15
<b>Barbosa / SET Porcecito 110 kV</b>	19.6	-
<b>Salto / SET Porce II 110 kV</b>	9.1	-
<b>Porce II / SET Madreseca 220 kV</b>	43.6	-

<b>SET Madreseca / SET El Pato 220 kV</b>	35.7	-
<b>Caucasia / SET Caucaasia 110 kV</b>		2.65
<b>Nueva montería / SET Planeta Rica 220 kV</b>		51.7
<b>Nueva montería / SET Montería sur 220 kV</b>	30.2	
<b>Porce II / SET Amalfi 220 kV</b>	-	14.4
<b>SET Amalfi / SET El Pato 220 kV</b>	-	63.1
<b>Montería Sur / SET El Tambo 220 kV</b>	-	39.4

Por último, en la Tabla 21 se estiman los costos del sistema eléctrico total y parcialmente electrificado con base en los estudios presupuestales realizados por Llavina [5, 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 55kV, seccionadores, aisladores, barras), el costo de la catenaria por kilómetro de acuerdo a Keen y Phillpotts [34, p. 5], y el costo de las LT de acuerdo con las resoluciones CREG 026 de 1999 [125] y 097 de 2008 [126], considerando una configuración en circuito sencillo, módulo común tipo 1 convencional, y BL y Bahía de Transformador (BT) en configuración barra sencilla a y, para en el Sistema de Transmisión Regional (STR) se hace conforme a lo descrito en la. Todos estos precios son actualizados de acuerdo al IPP que aplique en cada caso.



Tabla 21. Costos de los activos eléctricos

	Electrificación completa		Electrificación parcial	
	Cantidad unidades o km	Costo total [Millones de COP]	Cantidad unidades o km	Costo total [Millones de COP]
SET	16	\$ 108,468	6	\$ 40,675
AT	33	\$ 18,190	18	\$ 9,922
Catenaria	451	\$ 473,916	156	\$ 163,926
LT STN	161.2	\$ 48,822	168.6	\$ 51,064
Módulo común STN <sup>a</sup>	4	\$ 29,227	4	\$ 29,227
BL del STN	8	\$ 29,477	8	\$ 29,477
BT del STN	8	\$ 21,847	8	\$ 21,847
LT STR <sup>c</sup>	31.5	\$ 8,801	2.8	\$ 782
Módulo común STR <sup>b</sup>	4	\$ 498	2	\$ 249
BL del STR	8	\$ 7,054	4	\$ 3,527
BT del STR	8	\$ 6,218	4	\$ 3,109
<b>Total electrificación</b>		<b>\$ 752,518</b>		<b>\$ 353,806</b>
<b>liquidación al final de la vida útil</b>		<b>\$ 125,420</b>		<b>\$ 58,968</b>

<sup>a</sup> SE con 6 o menos bahías [125]

<sup>b</sup> SE de 1 a 3 bahías [126].

<sup>c</sup> línea rural circuito sencillo en torre metálica N4L38. Conductor D-N4-2 “para conductores en aluminio mayores que el 336 MCM y menores o iguales que el 477 MCM” [126].

La vida útil esperada para todos los activos del STN y STR se obtiene de acuerdo con las mismas resoluciones CREG que sirven de insumo para estimar el costo del sistema de tracción eléctrica. Por consiguiente, las LT son de cuarenta años, y para los demás activos son de treinta años, incluyendo la catenaria, la cual se encuentra expuesta a mayor desgaste por la fricción con el pantógrafo y esfuerzos mecánicos en comparación con las LT. El valor de liquidación al final de la vida útil corresponde a una sexta parte de su valor inicial.

### **5.1.5 Comentarios respecto a la electrificación**

Según Vitins [55] la electrificación puede representar tan sólo el 5% de la inversión total. Además, los cables de la catenaria tienen una capacidad para soportar hasta diez millones de pasos de locomotoras, y las SET tienen una vida útil que oscila entre cincuenta y cien años, lo cual, sumado a que los costos de mantenimiento para los sistemas modernos son más bajos, lo hacen una alternativa atractiva. No obstante, al comparar con datos de Roldán [69], donde el costo total de la ruta Sanín – Poveda es de COP 2,223,120 millones al 2017, con los datos de la Tabla 21 para la electrificación total y parcial, la electrificación representa un 34% y 16% de los costos respectivamente, por lo cual la alternativa de electrificación parcial sigue siendo relativamente más económica y por ende representa mayor viabilidad financiera. La amortización de un sistema electrificado de alta frecuencia de operación es financieramente viable, considerando que el precio de los combustibles está aumentando en promedio y son más costosos en comparación con la energía eléctrica en términos de \$/kWh, incluso requiere más combustible en términos energéticos (1 gal de diésel equivale a 40.7 kWh) para mover la misma carga si estuviera en modo eléctrico por la eficiencia y el peso del motor diésel.

Algunos fabricantes como *Bombadier* [61] plantean esquemas de electrificación graduales desde las zonas céntricas de la ciudad ya electrificadas hacia las afueras para el transporte

de pasajeros, donde los usuarios se benefician con tiempos de viaje más cortos y una mayor seguridad. En la Figura 25 se ilustra un ejemplo del esquema de cobertura eléctrica gradual.

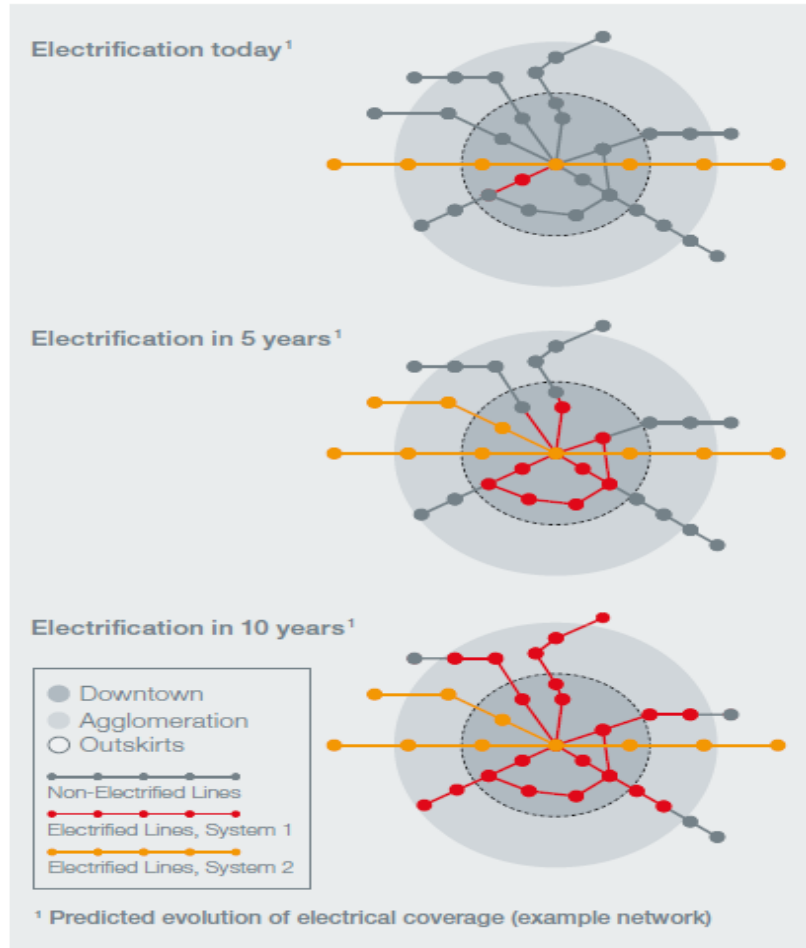


Figura 25. Ejemplo de electrificación gradual en un sistema eléctrico múltiple (e.g., 1500V<sub>CC</sub> y 25kV<sub>CA</sub>) [61]

## 5.2 BALANCE INICIAL

En la Tabla 22 se muestra el balance inicial con los costos de las locomotoras para cada escenario con los activos eléctricos necesarios para operar (si así se requiere) en el primer año.

Tabla 22. Balance general de los activos a evaluar

	Escenario 1 (Locomotoras Diésel-eléctricas)	Escenario 2 (Locomotoras híbridas)	Escenario 3 (Locomotoras Eléctricas)
<b>Electrificación</b>	-	\$353,806	\$752,518
<b>[Millones de COP]</b>			
<b>Locomotoras</b>	\$711,370	\$817,140	\$654,523
<b>[Millones de COP]</b>			
<b>Total [Millones de COP]</b>	\$711,370	\$1,170,946	\$1,407,040

En el escenario de la locomotora dual, el porcentaje de electrificación es del 35%, cuyo resultado se obtiene mediante la relación entre los kilómetros de catenaria totales para este caso y el correspondiente al escenario de la locomotora eléctrica pura, (100%), de la Tabla 21. Igualmente, para todos los años se mantiene el mismo porcentaje de electrificación.

### 5.2.1 GASTOS DE MANTENIMIENTO

En la Tabla 23 se hace el estimativo de los gastos en mantenimiento de las locomotoras diésel – eléctrica y la eléctrica en diferentes años discriminados para la revisión de la cubierta superior, mantenimiento mayor y reparación completa, basado en datos de la firma consultora de ingeniería *Hatch Mott MacDonald* [114, p. 33]. De este modo, se determina el porcentaje equivalente de las locomotoras híbridas mediante una suma de los productos porcentuales del gasto de mantenimiento en cada modo de operación para la ruta por el porcentaje de uso en dicho modo, i.e, la locomotora ALP 45DP opera el 65% del trayecto en modo diésel – eléctrico y el 35% restante en modo eléctrico puro. Para el mantenimiento eléctrico se considera un 2% anual, de acuerdo con la misma firma [114, p. 62].

Tabla 23. Gastos de mantenimiento

	Gasto revisión de la cubierta superior [%]	Mantenimiento mayor [%]	Reparación completa [%]	Mantenimiento sistema eléctrico [%]
<b>Locomotora diésel - eléctrica</b>	3%	9%	37%	
<b>Locomotora dual</b>	2.5%	7.1%	28.5%	2%
<b>Locomotora Eléctrica</b>	1%	3%	13%	2%
<b>Año revisión</b>	4	8	16	Anualmente

Por último, con los datos de financiamiento y el total de inversión, se pueden determinar los pasivos correspondientes al capital de inversionistas y el valor del crédito para cada escenario.

### 5.3 DATOS FINANCIEROS

Los costos monetarios de amortización en cada caso se obtienen con el saldo de crédito del período a evaluar. Con esta información se calcula el interés para el periodo siguiente de acuerdo a la Ecuación 24, expresada en [\$].

$$I_n = SC_{n-1} \times TF$$

Ecuación 24. Interés para cada periodo

donde  $TF$  es la tasa de financiación que se mantiene constante para todos los periodos en [%], y  $SC_{n-1}$  es el saldo de crédito calculado en el periodo anterior o el saldo inicial para el primer periodo que se calcula de acuerdo a la Ecuación 25, expresada en [\$].

$$SI = CT \times F$$

**Ecuación 25. Saldo inicial para el primer periodo**

donde  $CT$  es el costo total del sistema ferroviario en [\$.] y  $F$  es el financiamiento en [%].

El abono al capital es igual en todos los periodos y se obtiene mediante la Ecuación 26, expresada en [\$.].

$$ACP = \frac{SI}{N}$$

**Ecuación 26. Abono al capital para cada periodo**

donde  $N$  es el número de periodos a evaluar en años. Con los resultados anteriores se obtiene el valor de la cuota de acuerdo a la Ecuación 27, expresada en [\$.].

$$CU_n = I_n + ACP$$

**Ecuación 27. Valor de la cuota para cada periodo**

De igual forma se obtiene el saldo final de acuerdo a la Ecuación 28, expresada en [\$.].

$$SC_n = SC_{n-1} - ACP$$

**Ecuación 28. Valor del saldo final para cada periodo**

Para el cálculo del primer periodo  $SC_{n-1}$  es igual  $SI$ .

De lo anterior se puede deducir que la locomotora eléctrica es la que más cuota requiere pagar en todos los períodos debido al elevado costo de inversión en el primer año, seguida de la locomotora dual y la diésel – eléctrica.

Los gastos financieros totales se calculan mediante la Ecuación 29, expresada en [\$.].

$$GFT_n = I_n + \sum DP$$

Ecuación 29. Gastos financieros totales para cada periodo

Entiéndase como la sumatoria de las depreciaciones  $DP$  de las locomotoras y el sistema eléctrico. Al igual que el valor de la cuota, la locomotora eléctrica tiene un gasto financiero más alto en comparación con las otras dos alternativas evaluadas.

#### 5.4 VENTA PROYECTADA

En la Tabla 24 se calcula el precio total de flete para cada periodo, evaluado en los veinte años de operación del sistema férreo, con los datos de proyección de crecimiento de las importaciones y exportaciones (véase p. 82) y el precio del flete férreo de 0.035 USD/km-Tn, con un crecimiento anual determinada por la tasa de inflación (véase p. 138).

Tabla 24. Proyección de las ventas

Año	Proyección importaciones [Tn]	Proyección exportaciones [Tn]	Flete férreo [COP/km*Tn]	Ingresos por flete [Millones de COP]
1	4,000,000.00	2,500,000.00	110.55	\$ 635,224
2	4,120,000.00	2,625,000.00	114.62	\$ 683,424
3	4,243,600.00	2,756,250.00	118.84	\$ 735,347
4	4,370,908.00	2,894,062.50	123.21	\$ 791,284
5	4,502,035.24	3,038,765.63	127.74	\$ 851,551
6	4,637,096.30	3,190,703.91	132.45	\$ 916,491
7	4,776,209.19	3,350,239.10	137.32	\$ 986,471
8	4,919,495.46	3,517,751.06	142.37	\$ 1,061,889
9	5,067,080.33	3,693,638.61	147.61	\$ 1,143,176

<b>10</b>	5,219,092.74	3,878,320.54	153.04	\$ 1,230,797
<b>11</b>	5,375,665.52	4,072,236.57	158.68	\$ 1,325,253
<b>12</b>	5,536,935.48	4,275,848.40	164.52	\$ 1,427,087
<b>13</b>	5,703,043.55	4,489,640.82	170.57	\$ 1,536,887
<b>14</b>	5,874,134.85	4,714,122.86	176.85	\$ 1,655,285
<b>15</b>	6,050,358.90	4,949,829.00	183.35	\$ 1,782,968
<b>16</b>	6,231,869.67	5,197,320.45	190.10	\$ 1,920,675
<b>17</b>	6,418,825.76	5,457,186.47	197.10	\$ 2,069,207
<b>18</b>	6,611,390.53	5,730,045.79	204.35	\$ 2,229,431
<b>19</b>	6,809,732.24	6,016,548.08	211.87	\$ 2,402,282
<b>20</b>	7,014,024.21	6,317,375.49	219.67	\$ 2,588,773

## 5.5 GASTOS PROYECTADOS

Para estimar los gastos proyectados se parte de las siguientes consideraciones:

- Tanto el aumento por año en los precios del ACPM, como el de la energía eléctrica por contrato están calculados de acuerdo con la tasa de inflación, aunque en la realidad el costo del ACPM puede ser mucho mayor por la volatilidad del precio del petróleo.
- En el caso de la locomotora dual se hace un estimativo del gasto de la energía eléctrica y ACPM en proporción al tramo total en que opera para cada modo, i.e., 147 km en modo eléctrico y 245 km restantes para diésel – eléctrico.
- En ningún período se considera la reposición de las locomotoras diésel – eléctrica en particular, debido a que la reparación completa prolonga la vida útil de la locomotora a por lo menos los veinte años de operación, correspondiente al periodo total de evaluación.



- Los gastos de mantenimiento que aplique para cada caso de acuerdo con el año se estiman usando la Tabla 23 para la flota de locomotoras respectiva, donde además se tiene en cuenta la tasa de inflación equivalente del período a calcular.

En la Tabla 25 se estima, entre otras, la flota de locomotoras necesarias para cada año, la cual se obtiene mediante la Ecuación 30, expresado en múltiplo entero superior o significativo más próximo.

$$LN_n = \frac{PI_n \times LT \times PE}{DAO \times CMT}$$

**Ecuación 30. Cálculo estimado de las locomotoras necesarios para cada periodo**

donde:

- $PI_n$ : Proyección de importaciones para el periodo  $i$  (representa el trayecto Arboletes – Envigado, donde el tren estará más cargado para todos los periodos a evaluar de acuerdo con la Tabla 24) [Tn].
- $DAO$ : Días del año en que los trenes operan.
- $CMT$ : Carga máxima por tren [Tn].
- $LT$ : Cantidad de locomotoras por tren.
- $PE$ : Potencia equivalente para cada tipo de locomotora.

Los valores de  $DAO$ ,  $CMT$ ,  $LT$ ,  $PE$  son constantes para todos los periodos. Estos cálculos se realizan tomando como referencia la ALP 45DP eléctrica, la cual fue seleccionada para realizar los estudios técnicos, que supone además que la fuerza de tracción inicial es similar, verificado para la ALP 45DP en modo eléctrico y diésel – eléctrico y, para la ALP 46A (véase p. 86). Luego, con los resultados de la ecuación anterior se puede estimar el costo de inversión en locomotoras nuevas a partir del segundo periodo, cuya inversión es asumida en su totalidad por los inversionistas como se describe en la Ecuación 31, expresada en [\$].

$$ILN_n = (LN_n - LN_{n-1}) \times PL \times FI_n$$

**Ecuación 31. Costo de inversión en locomotoras nuevas**

donde  $PL$  es precio unitario de la locomotora que aplique para cada caso.

En el presente estudio no se consideran los días de *Overhaul* y mantenimientos completos de las locomotoras ni catenaria, y es por esta razón que se consideran operativos los 365 días del año. No obstante, la flota calculada para cada año está aproximada al múltiplo superior para tener cierta holgura en los estudios financieros.

**Tabla 25. Proyección de la flota y gastos para cada caso**

Año	MP40PH-3C		ALP 45DP		ALP 46 <sup>a</sup>	
	Flota	Gastos totales [Millones de COP]	Flota	Gastos totales [Millones de COP]	Flota	Gastos totales [Millones de COP]
<b>1</b>	46	\$151,974	29	\$430,520	21	\$781,921
<b>2</b>	47	\$160,992	30	\$89,617	22	\$17,757
<b>3</b>	49	\$174,020	31	\$95,758	22	\$18,411
<b>4</b>	50	\$209,799	32	\$124,981	23	\$27,172
<b>5</b>	52	\$199,095	33	\$109,863	24	\$20,403
<b>6</b>	53	\$210,980	34	\$117,075	24	\$20,745
<b>7</b>	55	\$226,329	35	\$124,669	25	\$22,049
<b>8</b>	56	\$324,386	36	\$207,775	26	\$49,324
<b>9</b>	58	\$258,440	37	\$143,763	27	\$24,800
<b>10</b>	60	\$279,774	38	\$152,716	27	\$24,836
<b>11</b>	61	\$292,037	39	\$162,133	28	\$27,283
<b>12</b>	63	\$315,494	40	\$172,036	29	\$28,428
<b>13</b>	65	\$335,090	41	\$182,448	30	\$27,591
<b>14</b>	67	\$359,480	43	\$197,626	31	\$30,861

<b>15</b>	69	\$382,124	44	\$209,286	32	\$32,153
<b>16</b>	71	\$863,072	45	\$622,702	32	\$174,025
<b>17</b>	73	\$447,091	47	\$254,719	33	\$39,941
<b>18</b>	75	\$483,699	48	\$267,681	34	\$36,184
<b>19</b>	78	\$512,261	49	\$282,602	35	\$44,509
<b>20</b>	80	\$555,623	51	\$304,913	37	\$47,200

Con la flota estimada por año se calcula el costo de las locomotoras adicionales a partir del año dos entre los gastos, teniendo en cuenta la tasa de inflación equivalente para el período a evaluar.

En la Tabla 25 también se calcula el gasto total proyectado para cada caso por año, a partir de la suma de los siguientes gastos (si aplica): energía a partir de ACPM, energía eléctrica, gasto electrificación, tipo de mantenimiento que requiera (revisión cubierta superior, mantenimiento mayor, o reparación completa), y mantenimiento al sistema eléctrico.

A partir de los resultados para cada caso, se evidencia que la locomotora eléctrica en el primer año de operación tiene unos gastos cinco veces más altos en relación con la locomotora diésel – eléctrica por la inversión en la electrificación completa. Sin embargo, a partir del segundo año, estos gastos se reducen considerablemente hasta dos séptimas partes en comparación con la MP40PH-3C, favorecida principalmente por el bajo costo de la energía eléctrica y el menor consumo de energía por ser una locomotora más eficiente. Este comportamiento es similar para los años posteriores, incluso con diferencias en gastos mucho más marcadas en beneficio de la ALP 46A. El mismo comportamiento se registra para la locomotora ALP 45DP en comparación con la diésel - eléctrica, pero con diferencias menos marcadas por la dependencia operativa del combustible fósil en ciertos tramos. Adicionalmente, cuando se alcanza el primer ciclo de mantenimiento, el cual es independiente del tipo y abarca toda la flota inicial de las MP40PH-3C, se obtienen unos

gastos mayores en relación con las otras tecnologías evaluadas, acentuados por la cantidad de locomotoras.

## 5.6 FLUJO DE CAJA INVERSIONISTA

El presente estudio contempla la inversión adicional en locomotoras después del primer año de operación debido al crecimiento en las importaciones y exportaciones, pero sin financiamiento, i.e., las compras de nuevos activos para atender la demanda a partir del segundo año se asumen en su totalidad con capital de los inversionistas.

En el caso del sistema mediante electrificación parcial y total, no se consideran inversiones posteriores (repotenciación de catenaria, aumento de capacidad de transformadores de tracción, SET y LT adicionales, etc.) (véase p. 146), debido a que requiere una simulación del escenario propuesto en cada período que permita evaluar los parámetros eléctricos e indicadores de la CPE contemplados en el presente trabajo (véase p. 60), para no incurrir en sobrecostos innecesarios.

Para hallar el flujo de caja libre por periodo que aplica para cada caso se inicia con el cálculo de la base gravable de acuerdo a la Ecuación 32, expresada en [\$].

$$BG_n = IPF_n - GT_n - GFT_n$$

**Ecuación 32. Cálculo de base gravable para cada periodo**

donde  $IPF_n$  y  $GT_n$  son los ingresos por flete y los gastos totales de acuerdo a los datos de la Tabla 24 y Tabla 25 respectivamente. De la ecuación anterior se obtiene el valor de los impuestos como se indica en la Ecuación 33, expresada en [\$].

$$IP_n = BG_n \times TIP$$

**Ecuación 33. Cálculo de impuestos para cada periodo**

donde *TIP* corresponde a la tasa de impuestos del 34% para los dos primeros años y 33% a partir del tercer año como se explicó en la información financiera (véase p. 136).

El margen después de impuestos se halla mediante la Ecuación 34, expresada en [\$].

$$MDI_n = IPF_n - GT_n - IP_n$$

**Ecuación 34. Margen después de impuestos para cada periodo**

Finalmente, el flujo neto efectivo en el primer periodo, correspondiente a la inversión inicial se expresa mediante la Ecuación 35, expresada en [\$].

$$FNE_1 = MDI_1 - CU_1 - SI$$

**Ecuación 35. Flujo neto efectivo en el primer periodo**

A partir del segundo periodo el flujo neto efectivo se expresa mediante la Ecuación 36, expresada en [\$].

$$FNE_n = MDI_n - CU_n - ILN_n$$

**Ecuación 36. Flujo neto efectivo después del segundo periodo**

El flujo de caja libre se presenta en la Figura 26 para los tres casos evaluados en los veinte períodos. 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 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.

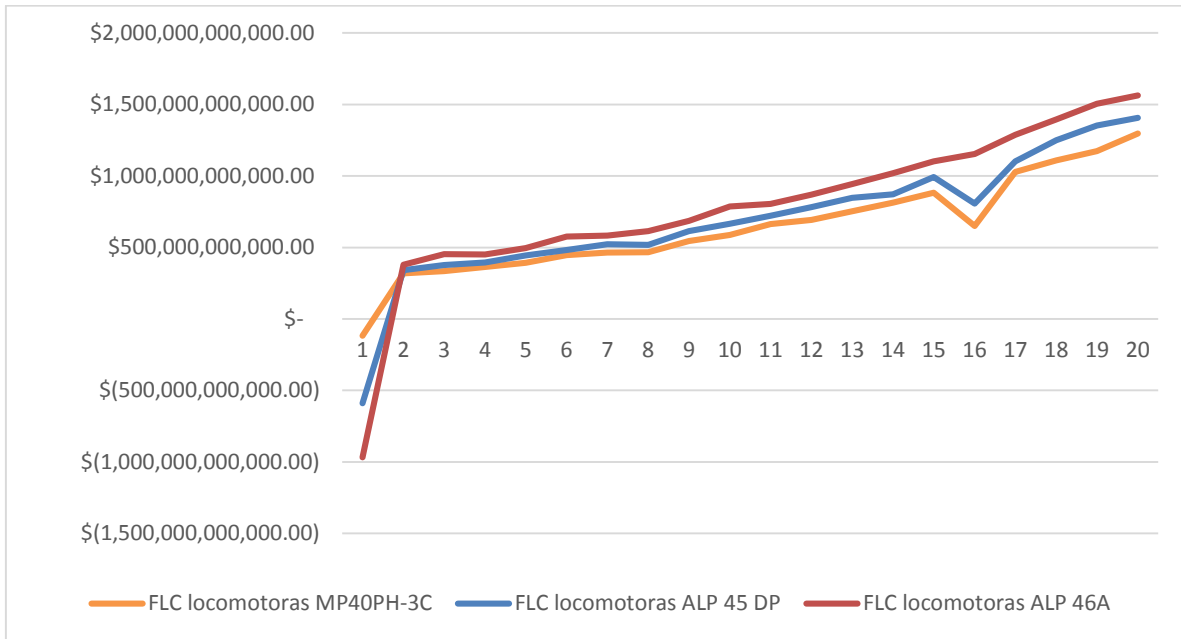


Figura 26. Flujo de caja libre del proyecto

El VPN permite conocer el valor monetario del proyecto al día de hoy, o dicho de otra manera, se emplea para determinar el valor actual en COP del dinero pagado o recibido en un periodo determinado. Por lo tanto, si el resultado es mayor a cero indica que el inversionista recupera toda la inversión, y entre mayor sea dicho valor aumenta la rentabilidad y ganancia, incluso si fuera liquidado. Este se calcula mediante la Ecuación 37, expresada en [\\$].

$$VPN = FNE_1 + \sum_{n=2}^N \frac{FNE_n}{(1+i)^n}$$

Ecuación 37. Ecuación del VPN

donde  $i$  es la tasa de descuento o la Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR), que como se mencionó anteriormente, debido a que la TIR no se puede evaluar para este caso, no se tendría referencia para comparar con la tasa de descuento o un 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 26 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 26. VPN para cada caso.

Casos	VPN [Millones de COP]
Locomotoras MP40PH-3C	\$4,503,109
Locomotoras ALP 45 DP	\$4,549,654
Locomotoras ALP 46A	\$4,945,740

## CONCLUSIONES

El empleo de alimentación mediante sistemas en AC a la frecuencia industrial y en alta tensión 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, la menor cantidad y magnitud de armónicos, la disminución del EMI y EMF, la conexión directa a las redes de HV o EHV sin necesidad de redes de distribución internas a frecuencias particulares (16.7 Hz o 25 Hz) [127], y la 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.

Para los estudios técnicos de la ruta Sanín – Poveda, se ubicaron las SET de modo equidistante de acuerdo con la experiencia de diversos autores y las mejores prácticas utilizadas en países donde ya se tiene implementado esta tecnología. Además, se buscó que las SET quedaran cerca de una SE candidata de nivel de tensión 4 o del STN, y preferiblemente ubicadas en una estación de parada. Si no se cumplía esta última condición, se buscó que por lo menos sí estuviera cerca de un AT, obteniendo de esta forma perfiles de tensión dentro de los límites permitidos por los estándares internacionales y sin sobrecargas en los transformadores de tracción bajo condiciones de operación normal. Sin embargo, se podría optimizar la ubicación de SET mediante programas computacionales como el *OpenTrack*, en aquellos puntos donde se tienen mayores pendiente ascendentes y en las estaciones de parada con el objetivo de disminuir las caídas de tensión y las pérdidas de energía.



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.

De acuerdo con las tendencias mundiales y la necesidad de reducir de las emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y azufre en áreas metropolitanas, se requiere migrar al uso de modos de transporte amigables con el medio ambiente, como es el caso de las locomotoras eléctricas puras o híbridas. Es así que para suministrar la energía a estos tipos de locomotoras en el tramo en el que transitan por el valle de Aburrá y por otras zonas más densamente pobladas, se contempla que el sistema opere mediante catenaria.

Un proyecto de este alcance tiene grandes ventajas para el desarrollo de la región Antioqueña y Cordobesa , pues permite su apertura a mercados internacionales y además puede convertirse en un foco para la integración con el resto del país mediante puertos multimodales como el de Cauca. Adicionalmente, la electrificación del sistema en áreas rurales crea implícitamente una oportunidad para alimentar cargas rurales en la subregión del Bajo Cauca, hoy dependiente casi en su totalidad de la SE Cerromatoso, reforzando así el enlace entre el área Antioquia con el Caribe.. El mismo panorama se presenta en la subregión del Río San Jorge y la Costanera de Córdoba.

Con el aumento de las importaciones y exportaciones por año, se genera un crecimiento en la flota de locomotoras y por consiguiente un aumento en la frecuencia de despachos y las potencias pico requeridas por el sistema. Por lo tanto, es necesario hacer una reevaluación a mediano plazo, como medida para mitigar los posibles impactos negativos que este tipo de sistemas podría generar en el SIN en cuanto a sobrecargas e indicadores de la CPE.

## RECOMENDACIONES

Plantear alternativas para electrificar de acuerdo con las siguientes consideraciones: primero los tramos de arranque y paradas definidas por las EIs, EIMs y ETs, segundo la facilidad para instalar LTs y la distancia desde las SEs a la SETs, y tercero la necesidad de reducir las emisiones de emisiones de gases contaminantes en áreas metropolitanas.

Considerar la electrónica de potencia contenida en la locomotora para hacer un estudio más detallado de los armónicos que puede generar el sistema férreo conectado en el PCC con fuentes más débiles.

Realizar un estudio detallado del sistema férreo teniendo en cuenta las resistencias por curvatura, tanto para el cálculo analítico como para la simulación, que podría implicar una reconfiguración de la ruta o la construcción de puentes adicionales o túneles con el fin de evitar que el tren se frene considerablemente, limitar la velocidad por los peraltes, desgastar desproporcionadamente el carril.

Evaluar la posibilidad de emplear esquemas complementarios para la conexión de los transformadores de tracción, o esquemas de SVC que permitan la conexión de éstos a fuentes más débiles en 110 kV, cumpliendo con los límites permitidos por los estándares, como en el caso de las SE Porcecito, Planeta Rica, Nueva Montería y Montería.

Evaluar locomotoras de mayor potencia a menor costo para reducir los costos de inversión inicial en las diésel – eléctricas, por ejemplo, y así reducir los gastos que acarrea el mantenimiento de estas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE, *IEEE 519-2014 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. Estados Unidos, 2014.
- [2] A. E. Díez, "Calidad de la Potencia", Medellín, Antioquia, Colombia, 2011.
- [3] "Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG". [En línea]. Disponible en: <http://www.creg.gov.co/index.php/component/glossary/Glossary-1/M/M-Oacute-DULO-COM-Uacute-N-1110/>. [Accedido: 09-mar-2018].
- [4] OpenTrack Railway Technology, "OpenTrack Railway Technology - Railway Simulation". [En línea]. Disponible en: [http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack\\_s/opentrack\\_s.html](http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_s/opentrack_s.html). [Accedido: 10-ene-2018].
- [5] J. Llavina Juan, "Diseño de las subestaciones eléctricas de tracción y centros de autotransformación asociados de una línea ferroviaria de alta velocidad", 2010.
- [6] Association of American Railroads, "About Us". [En línea]. Disponible en: <https://www.aar.org/Pages/AboutUs.aspx>. [Accedido: 06-feb-2018].
- [7] UNE, "Asociación Española de Normalización, UNE - Perfil". [En línea]. Disponible en: <http://www.aenor.es/aenor/aenor/perfil/perfil.asp#.WIWA1XibiU>. [Accedido: 10-ene-2018].
- [8] AREMA, "About", AREMA. [En línea]. Disponible en: [http://www.arena.org/AREMA\\_MBRR/About\\_Us/AREMA\\_MBRR/About.aspx?hkey=f003e95f-953e-4e21-8a23-b6db4c08c175](http://www.arena.org/AREMA_MBRR/About_Us/AREMA_MBRR/About.aspx?hkey=f003e95f-953e-4e21-8a23-b6db4c08c175). [Accedido: 11-feb-2018].
- [9] BSI, "About BSI - The business standards company that helps organizations make excellence a habit | BSI Group". [En línea]. Disponible en: <https://www.bsigroup.com/en-GB/about-bsi/>. [Accedido: 10-ene-2018].
- [10] CENELEC, "CENELEC - About CENELEC - Who we are". [En línea]. Disponible en: <https://www.cenelec.eu/aboutcenelec/whoweare/index.html>. [Accedido: 10-ene-2018].
- [11] DlgSILENT, "PowerFactory - DlgSILENT". [En línea]. Disponible en: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>. [Accedido: 10-ene-2018].
- [12] "Índice de precios del productor (IPP)", Banco de la República (banco central de Colombia), 02-nov-2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.banrep.gov.co/es/ipp>. [Accedido: 04-mar-2018].
- [13] NEMA, "About the National Electrical Manufacturers Association - NEMA". [En línea]. Disponible en: <https://www.nema.org/About/pages/default.aspx>. [Accedido: 10-ene-2018].
- [14] Renfe, "Renfe", La empresa, 1941. [En línea]. Disponible en: <http://www.renfe.com/empresa/index.html>. [Accedido: 19-ago-2011].

- [15] C. E. E. Tiempo, “Puerto Antioquia iniciaría operaciones en segundo semestre del 2020”, *Portafolio.co*. [En línea]. Disponible en: <http://www.portafolio.co/economia/infraestructura/puerto-antioquia-iniciara-operaciones-en-el-2020-511666>. [Accedido: 19-mar-2018].
- [16] 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].
- [17] Metrotenerife, “Plan Territorial Especial de Ordenación de Infraestructuras del Tren del Sur”, Cabildo de Tenerife, Tenerife, Plan Territorial Especial de Ordenación de Infraestructuras del Tren del Sur Anejo número 20.
- [18] CREG, “Glosario. Niveles de tensión”, *Glosario. Niveles de tensión*, 1994. [En línea]. Disponible en: [http://www.creg.gov.co/html/i\\_portals/index.php?&p\\_origin=plugin&p\\_name=glosario&p\\_id=N&p\\_options=verConceptos](http://www.creg.gov.co/html/i_portals/index.php?&p_origin=plugin&p_name=glosario&p_id=N&p_options=verConceptos). [Accedido: 30-ago-2011].
- [19] D. López Durán, “Estudio del aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes”, Madrid, 2010.
- [20] R. J. Hill, “Electric railway traction. Part 3. Traction power supplies”, *Power Eng. J.*, vol. 8, n° 6, pp. 275–286, dic. 1994.
- [21] A. Arellano Pulido, “Dimensionamiento del sistema de sustentación de catenarias ferroviarias”, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Madrid, España, 2011.
- [22] R. D. White, “AC/DC Railway Electrification and Protection”, en *IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems*, 2014, pp. 1–42.
- [23] IEC, *IEC 60050-811 International Electrotechnical Vocabulary - Chapter 811: Electric traction*, 1.0. Geneva, Switzerland: IEC, 1991.
- [24] M. Carmona Suárez y J. Montesinos Ortuño, *Sistemas de alimentación a la tracción ferroviaria*. Madrid: Formarail, 2013.
- [25] E. Pilo, L. Rouco, y A. Fernandez, “A reduced representation of 2x25 kV electrical systems for high-speed railways”, en *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Railroad Conference, 2003.*, 2003, pp. 199–205.
- [26] R. M. Chuquén, M. A. R. Mesías, G. A. R. López, y E. Q. Restrepo, “Sistemas de alimentación eléctrica a sistemas de transporte masivo tipo metro”, *Ing. Univ. Eng. Dev.*, vol. 13, n° 2, oct. 2010.
- [27] IEC y Tehcnical committee 9, *IEC 60850 Railway applications: supply voltages of traction systems*, 4.0. Geneva, Switzerland: IEC, 2014.
- [28] Y. Oura, H. Nagasawa, y Y. Mochinaga, “Railway Electric Power Feeding Systems”, *Japan Railway & Transport Review* 16, vol. Technology Today 3, pp. 48–58, jun-1998.
- [29] E. Pilo, “Diseño óptimo de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad”, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Madrid, 2003.
- [30] F. Nyberg y R. Pollard, “Network Rail - A Guide to Overhead Electrification”, Alan Baxter & Associates LLP, London, United Kingdom, 10, feb. 2015.
- [31] ABB, “Special transformers Railway”, Vaasa, Finland, 2012.

- [32] 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.
- [33] G. Firat, G. Yang, y H. A. H. Al-Ali, “Comparative study of different transformer connections for railway power supply-mitigation of voltage unbalance”, 2015, pp. 4 (6 .)-4 (6 .).
- [34] P. Keen y R. Phillpotts, “Low Cost Electrification for Branch Lines”, Department for Transport, DeltaRail Group Limited, Derby, United Kingdom, DeltaRail-ES-2010-003 1, jul. 2010.
- [35] R. Grunbaum, J.-P. Hasler, y B. Thorvaldsson, “FACTS: powerful means for dynamic load balancing and voltage support of AC traction feeders”, 2001, vol. vol.4, p. 6.
- [36] L. Ladniak, “Calculation of voltage unbalance factor in power system supplying traction transformers”, presentado en 18th Power Systems Computation Conference, Wroclaw, Poland, 2014, pp. 1–5.
- [37] T.-H. Chen, “Simplified models of electric railway substations for three-phase power-flow studies”, en *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1994, pp. 2245–2248 vol.3.
- [38] G. Burchi, C. Lazaroiu, N. Golovanov, y M. Roscia, “Estimation of voltage unbalance in power systems supplying high speed railway”, *Electr. Power Qual. Util. J.*, vol. Vol. 11, nº nr 2, 2005.
- [39] BSI, “BS EN 50163:2004+A1:2007 - Railway applications. Supply voltages of traction systems”, 2005.
- [40] E. E. Staff, *Circuitos magnéticos y transformadores*. Reverte, 1965.
- [41] UNE, *UNE-EN 50329: aplicaciones ferroviarias : instalaciones fijas : transformadores de tracción*. AENOR, 2004.
- [42] “Desbalance de tensiones en sistemas trifásicos”. sep-2009.
- [43] IEC y Technical Committee 77, *IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC). Compatibilité électromagnétique (CEM). Part 4-30, Partie 4-30, Part 4-30, Partie 4-30.* Geneva, Switzerland: IEC, 2015.
- [44] IEC, *IEC 61000-4-27 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-27: Testing and measurement techniques – Unbalance, immunity test for equipment with input current not exceeding 16 A per phase*, 1.1. Geneva, Switzerland: IEC, 2009.
- [45] 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.
- [46] NEMA, *NEMA MG 1-2003*. Virginia, USA, 2003.
- [47] E. C. Quispe Oqueña, “Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la operación del motor de inducción trifásico. Énfasis en la caracterización del desequilibrio de tensiones y el efecto sobre la potencia nominal.”, Tesis doctoral, Universidad del Valle, Cali, Valle del Cauca, Colombia, 2012.
- [48] IEEE, “IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”, *IEEE Std 141-1993*, pp. 1–768, abr. 1994.

- [49] E. C. Quispe Oqueña y J. A. Palacios P., “Análisis de las definiciones de desequilibrio de tensión y su influencia en la operación de motores trifásicos de inducción: la necesidad de una nueva defición”, vol. 1, p. 6.
- [50] CENELEC, “EN 50160 - Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks”, jul. 2010.
- [51] 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.
- [52] A. E. Díez, S. I. Betancur, y P. U. Gómez, “Estudio de los principales problemas que afectan la Calidad de la Potencia en Colombia (caso de aplicación en Antioquia)”, Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Antioquia, Colombia, 2002.
- [53] AENOR, *UNE EN 61000-3-3 Compatibilidad electromagnética (CEM) - Parte 3-3: Límites Limitación de las variaciones de tensión, fluctuaciones de tensión y flicker en las redes públicas de suministro de baja tensión para equipos con corriente asignada  $\leq 16$  A por fase y no sujetos a una conexión condicional*, 1.0. Madrid, España, 2009.
- [54] I. Sanz, M. Á. D. Lozano, I. Peñaranda, J. C. Enguix, y J. Mas, *Transporte ferroviario de mercancías*. MARGE BOOKS, 2013.
- [55] J. Vitins, “Electric locomotives for freight corridors”. IREE, 05-ene-2007.
- [56] Grupo Renfe, “Operador de ingreso de fabricación y mantenimiento - Temario específico para las pruebas presenciales”. 2016.
- [57] J. M. Aller, *Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la teoría general*. Baruta, Miranda, Venezuela: Equinoccio, 2008.
- [58] S. Frey, *Railway electrification systems & engineering*. Delhi: White Word Publications, 2012.
- [59] A. Steimel, *Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience*. Oldenbourg Industrieverlag, 2008.
- [60] Rajneesh Budania, “Diesel locomotive technology”, 13:07:03 UTC.
- [61] Bombardier Inc., “MITRAC Hybrid the Dual Power Propulsion Chain”. 2009.
- [62] J. Vitins, “Dual mode and new diesel locomotive developments”, presentado en TRB 2012 Annual Meeting, Zurichm, Switzerland, 2012, p. 10.
- [63] 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.
- [64] A. L. Pita, *Infraestructuras ferroviarias*. Universitat Politecnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica, 2006.
- [65] UIC, International Union of Railways, *Identification Marking For Freight Rolling Stock*, 7ª ed. 2004.
- [66] “Corredor Central - La Dorada - Chiriguana”, *Portal ANI*, 25-nov-2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.ani.gov.co/proyecto/ferreo/corredor-central-la-dorada-chiriguana-21809>. [Accedido: 22-ene-2018].

- [67] Dinero, “Así se adelantan las obras ferroviarias en el país”, *Así se adelantan las obras ferroviarias en el país*. [En línea]. Disponible en: <http://www.dinero.com/edicion-impresa/infraestructura/articulo/las-obras-del-transporte-ferroviario-en-colombia/240445>. [Accedido: 22-ene-2018].
- [68] C. E. E. Tiempo, “Lista la ruta que deberá sortear el ferrocarril para empezar a rodar”, *El Tiempo*. [En línea]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/colombia/medellin/como-va-el-proyecto-del-ferrocarril-de-antioquia-121494>. [Accedido: 22-ene-2018].
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] OOCL, Orient Overseas Container Limited, “OOCL - General Purpose”. [En línea]. Disponible en: <http://www.oocl.com/eng/ourservices/containers/containerspecifications/Pages/generalpurpose.aspx>. [Accedido: 04-feb-2018].
- [72] I. Povilaitiene y A. Laurinavičius, “Reduction of external rail wearing on road curves”, *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 10, n° 2, pp. 123–130, ene. 2004.
- [73] Ministerio de transporte, *Manual de normatividad férrea - Definición de aspectos técnicos de diseño, construcción, operación, control y seguridad*, vol. 1. Viceministerio de infraestructura - Dirección de infraestructura, 2013.
- [74] Sweden-Italy Freight Transport and Logistics Green Corridor, “Energy savings with hybrid locomotives on TEN-T corridors”, Trans-European transport Network (TEN-T), Gothenburg, Sweden, Logistics and transport in Europe 2012-EU-94167-S, dic. 2015.
- [75] Bombardier Inc., “TRAXX F140 DC”, Alemania, jun-2008.
- [76] Bombardier Inc., “MITRAC 3000 Driven by Reliability”.
- [77] “MainlineDiesels.net - TRAXX DE”. [En línea]. Disponible en: <http://www.mainlinediesels.net/index.php?nav=1000929&lang=en>. [Accedido: 08-feb-2018].
- [78] Railcolor.net, “Trains, Railways and Locomotives: Railcolor.net”, *The European Modern Electric Locomotive Database*. [En línea]. Disponible en: <https://www.railcolor.net/index.php?nav=1405723>. [Accedido: 13-mar-2018].
- [79] New Jersey Transit, “NJ Transit ALP45DP Project Status”, mar-2009.
- [80] “TRAXX - Electric Locomotive - Bombardier Transportation”. [En línea]. Disponible en: <https://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/locomotives/traxx.html>. [Accedido: 05-feb-2018].
- [81] Vossloh Locomotives GmbH, “EURO DUAL Electric and Diesel Electric powered Locomotive”, España, jul-2012.
- [82] Vossloh Locomotives GmbH, “The latest generation of diesel locomotives”, Germany, jun-2017.



- [83] D. M. UK, “Prima II prototype rolled out by Alstom”, *Railway Gazette*. [En línea]. Disponible en: <http://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/prima-ii-prototype-rolled-out-by-alstom.html>. [Accedido: 06-feb-2018].
- [84] Alstom, “PRIMA M4 Multi-purpose Locomotives”, France, jun-2016.
- [85] “AC4400 and DASH Series | GETransportation”. [En línea]. Disponible en: <http://www.getransportation.com/locomotive-and-services/AC4400-and-dash-series>. [Accedido: 07-feb-2018].
- [86] General Electric Company, “AC44i locomotive”, Estados Unidos.
- [87] “Evolution Series Locomotive | GETransportation”. [En línea]. Disponible en: <http://www.getransportation.com/locomotive-and-services/evolution-series-locomotive>. [Accedido: 07-feb-2018].
- [88] “California Dreamin’: New Locomotives Take Clean Air Tech from Theory to Reality”. [En línea]. Disponible en: [http://www.up.com/up/aboutup/community/inside\\_track/ge-tier-4-11-17-2016.htm](http://www.up.com/up/aboutup/community/inside_track/ge-tier-4-11-17-2016.htm). [Accedido: 07-feb-2018].
- [89] General Electric Company, “GE’s PowerHaul Series Locomotive”, Estados Unidos, 2014.
- [90] “Powerhaul Series Locomotive | GETransportation”. [En línea]. Disponible en: <http://www.getransportation.com/locomotive-and-services/powerhaul-series-locomotive>. [Accedido: 07-feb-2018].
- [91] Siemens AG, “Vectron”, Munich, Germany, 2016.
- [92] J. Pernička y T. Kuchta, “Railvolution - The Professional Two-Monthly Magazine Of Rail Transport Worldwide”, vol. 10, pp. 53–58, dic-2010.
- [93] M. Kumar Jain, “Selection of Traction System Voltages | RailElectrica”. [En línea]. Disponible en: <https://www.railelectrica.com/traction-distribution/selection-of-traction-system-voltage/>. [Accedido: 08-feb-2018].
- [94] 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.
- [95] O. Nenadovic, “Railway Electrification Programme - The System Design Challenge”, presentado en NetworkRail, Britain, 24-jul-2014.
- [96] Bombardier Inc., “Dual-Powered Locomotive”, Zurichm, Switzerland, sep-2008.
- [97] AREMA, “Module 5:Tractive Effort”, 15-oct-2014.
- [98] P. Botero Cock, “Capacidad de arrastre de los ferrocarriles”, presentado en Maestría en vías y transportes, Medellín, Antioquia, Colombia, 2016.
- [99] V. Jayakumar y M. Kumar, *Engineering Mechanics*. New Delhi: PHI Learning, 2013.
- [100] L. S. Marks, *Marks’ standard handbook for mechanical engineers*, Eleventh editon, [90. anniversary edition]. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [101] F. Szanto, “Rolling resistance revisited”, presentado en CORE 2016, Maintaining the Momentum, Conference on Railway Excellence, Melbourne, Australia, 2016, p. 6.
- [102] A. Radosavljevic, “Measurement of train traction characteristics”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 220, nº 3, pp. 283–291, may 2006.

- [103] AREMA, “Economics of railway engineering and operations”, en *Manual for Railway Engineering*, vol. Chapter 16, United States: AREMA, 2017.
- [104] Institut für Bahntechnik GmbH, “OpenPowerNet - User Manual”. Branch Office Dresden, 04-feb-2016.
- [105] E. Pilo, L. Rouco, y A. Fernández, “An Optimization Procedure to Determine the Topology of AC Railways Power Supply Networks”, 2007, pp. 333–340.
- [106] E. Pilo, L. Rouco, y A. Fernandez, “Catenary and autotransformer coupled optimization for 2x25kV systems planning”, 2006, vol. 1, pp. 747–756.
- [107] Siemens, “Product Catalog 2010 - Contact line equipment for mass transit and main line railways”. 2010.
- [108] NKT, “Railway catenary systems - Catalogue”. sep-2017.
- [109] HidroCantábrico Distribución Eléctrica, S.A.U, “Conductores Desnudos de Aluminio Acero para Líneas Eléctricas Aérea”. 22-jul-2011.
- [110] A. Mariscotti, “Induced Voltage Calculation in Electric Traction Systems: Simplified Methods, Screening Factors, and Accuracy”, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 12, nº 1, pp. 201–210, mar. 2011.
- [111] Gobierno Digital Colombia, “Plantas De Aguas Y Energía - EPM | Datos Abiertos Colombia”, *la plataforma de datos abiertos del gobierno colombiano*. [En línea]. Disponible en: <https://www.datos.gov.co/Funci-n-p-blica/Plantas-De-Aguas-Y-Energ-a-EPM/q6f3-ygre/data>. [Accedido: 19-mar-2018].
- [112] IEC, *IEC 60909 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents*, First edition. Geneva, Switzerland: IEC, 2001.
- [113] “GO’s MPI Series (MP40PH-3C and MP54AC) Locomotives (2007- ) - Transit Toronto - Content”. [En línea]. Disponible en: <https://transit.toronto.on.ca/regional/2512.shtml>. [Accedido: 03-mar-2018].
- [114] 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.
- [115] “NJT upping ALP-45DP fleet”, *Railway Age*, 07-dic-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.railwayage.com/passenger/commuterregional/njt-upping-alp-45dp-fleet/>. [Accedido: 04-mar-2018].
- [116] “ALP-46”, *Railfanning.org*, 23-sep-2012. .
- [117] “VIA receives first environmentally enhanced F-40 locomotive from CAD Railway Industries”, *VIA Rail*, 29-oct-2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.viarail.ca/en/about-via-rail/media-room/latest-news/list>. [Accedido: 04-mar-2018].
- [118] R. J. Primus, “Design Challenges of Locomotive Diesel Engines”, presentado en 11th Diesel Engine Emissions Reduction Conference, Chicago, Illinois, 24-ago-2005.
- [119] “NRE”, *NRE*. [En línea]. Disponible en: <http://www.nre.com/locomotives/remanufactured>. [Accedido: 04-mar-2018].

- [120] “Indicadores de inflación básica y su variación anual”, *Banco de la República (banco central de Colombia)*, 02-nov-2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.banrep.gov.co/es/inflacion-basica>. [Accedido: 04-mar-2018].
- [121] Subgerencia de Estudios Económicos, “Deuda externa de Colombia”, Banco de la República, Colombia, Saldo vigente como porcentaje del PIB 2/, dic. 2017.
- [122] Secretaria del senado, “Leyes desde 1992 - Vigencia expresa y control de constitucionalidad [LEY\_1607\_2012]”, 08-feb-2018. [En línea]. Disponible en: [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_1607\\_2012.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1607_2012.html). [Accedido: 04-mar-2018].
- [123] C. E. E. T. Tiempo, “2018 arranca con una reducción en el precio del ACPM”, *Portafolio.co*. [En línea]. Disponible en: <http://www.portafolio.co/economia/precio-de-la-gasolina-y-el-acpm-para-enero-de-2018-512931>. [Accedido: 04-mar-2018].
- [124] Gaceta oficial, “Contrato: CN2011-0102”. Alcaldía de Medellín.
- [125] CREG, “Resolución No. 026”. 21-jun-1999.
- [126] “Resolución No. 097”. 26-sep-2008.
- [127] Q. Li, “Industrial frequency single-phase AC traction power supply system for urban rail transit and its key technologies”, *J. Mod. Transp.*, vol. 24, n° 2, pp. 103–113, jun. 2016.

## ANEXOS

ANEXO 1.A. Códigos de países de acuerdo con la UIC (tercer y cuarto dígito).

<b>UIC 920-14</b>	<b>Country</b>	<b>Pays</b>	<b>Land</b>
<b>10</b>	Finland	Finlande	Finnland
<b>20</b>	Russian Federation	Russie, Fédération de	Russische Föderation
<b>21</b>	Belarus	Bélarus	Weißrussland
<b>22</b>	Ukraine	Ukraine	Ukraine
<b>23</b>	Moldova, Republic of	Moldova, République de	Moldawien, Republik
<b>24</b>	Lithuania	Lituanie	Litauen
<b>25</b>	Latvia	Lettonie	Lettland
<b>26</b>	Estonia	Estonie	Estland
<b>27</b>	Kazakhstan	Kazakhstan	Kasachstan
<b>28</b>	Georgia	Géorgie	Georgien
<b>29</b>	Uzbekistan	Ouzbékistan	Usbekistan
<b>30</b>	Korea, Democratic People's Republic of	Corée, République populaire démocratique de	Koreas Demokratische Volksrepublik
<b>31</b>	Mongolia	Mongolie	Mongolei
<b>32</b>	Viet nam	Viet Nam	Vietnam
<b>33</b>	China	Chine	China

<b>40</b>	Cuba	Cuba	Kuba
<b>41</b>	Albania	Albanie	Albanien
<b>42</b>	Japan	Japon	Japan
<b>44</b>	Bosnia and Herzegovina, Serb Republic of	Bosnie-Herzégovine, République serbe de	Bosnien und Herzegowinas, serbische Republik
<b>49</b>	Bosnia and Herzegovina	Bosnie-Herzégovine	Bosnien und Herzegowina
<b>50</b>	Bosnia and Herzegovina, Muslim-Croat Federation of	Bosnie-Herzégovine, Fédération croato-musulmane de	Bosnien und Herzegowinas, kroatisch-moslemische Föderation
<b>51</b>	Poland	Pologne	Polen
<b>52</b>	Bulgaria	Bulgarie	Bulgarien
<b>53</b>	Romania	Roumanie	Rumänien
<b>54</b>	Czech Republic	Tchèque, République	Tschechische Republik
<b>55</b>	Hungary	Hongrie	Ungarn
<b>56</b>	Slovakia	Slovaquie	Slowakei
<b>57</b>	Azerbaijan	Azerbaïdjan	Aserbaidtschan
<b>58</b>	Armenia	Arménie	Armenien
<b>59</b>	Kyrgyzstan	Kirghizistan	Kirgisistan
<b>60</b>	Ireland	Irlande	Irland
<b>61</b>	Korea, Republic of	Corée, République de	Koreanische Republik
<b>62</b>	Montenegro	Montenegro	Montenegro

<b>65</b>	Macedonia, The former Yugoslav Republic of	Macédoine, L'Ex- République Yougoslave de	Mazedonien, Ehemalige jugoslawische Republik
<b>66</b>	Tajikistan	Tadjikistan	Tadschikistan
<b>67</b>	Turkmenistan	Turkménistan	Turkmenistan
<b>68</b>	Afghanistan	Afghanistan	Afghanistan
<b>70</b>	United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland	Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord	Vereinigtes Königreich von Großbritannien und von Nordirland
<b>71</b>	Spain	Espagne	Spanien
<b>72</b>	Serbia	Serbie	Serbien
<b>73</b>	Greece	Grèce	Griechenland
<b>74</b>	Sweden	Suède	Schweden
<b>75</b>	Turkey	Turquie	Türkei
<b>76</b>	Norway	Norvège	Norwegen
<b>78</b>	Croatia	Croatie	Kroatien
<b>79</b>	Slovenia	Slovénie	Slowenien
<b>80</b>	Germany	Allemagne	Deutschland
<b>81</b>	Austria	Autriche	Österreich
<b>82</b>	Luxemburg	Luxembourg	Luxemburg
<b>83</b>	Italy	Italie	Italien
<b>84</b>	Netherlands	Pays-Bas	Niederlande
<b>85</b>	Switzerland	Suisse	Schweiz
<b>86</b>	Denmark	Danemark	Dänemark

87	France	France	Frankreich
88	Belgium	Belgique	Belgien
90	Egypt	Egypte	Ägypten
91	Tunisia	Tunisie	Tunesien
92	Algeria	Algérie	Algerien
93	Morocco	Maroc	Marokko
94	Portugal	Portugal	Portugal
95	Israel	Israël	Israel
96	Iran, Islamic Republic of	Iran, République islamique d'	Iran, Islamische Republik
97	Syrian Arab Republic	Syrienne, République arabe	Syrien, Arabische Republik
98	Lebanon	Liban	Libanon
99	Iraq	Iraq	Irak
	Australia	Australie	Australien
	Canada	Canada	Kanada
	Congo, the Democratic Republic of the	République démocratique du Congo	Kongo, Demokratische Republik
	South Africa	Afrique du Sud	Südafrika
	United States	États-Unis	Vereinigte Staaten

ANEXO 1.B. Cartas de categoría para vagones de mercancías de acuerdo con la UIC (quinto dígito).

<b>Class</b>	<b>Wagon type</b>	<b>1st digit of type number (5th digit of UIC#)</b>
<i>E</i>	Ordinary open high-sided wagon	5
<i>F</i>	Special open high-sided wagon	6
<i>G</i>	Ordinary covered wagon	1
<i>H</i>	Special covered wagon	2
<i>I</i>	Refrigerated van	8
<i>K</i>	Ordinary flat wagon with separate axles	3
<i>L</i>	Special flat wagon with separate axles	4



<i>O</i>	Open multi-purpose wagon (composite open high-sided flat wagon)	3
<i>R</i>	Ordinary flat wagon with bogies	3
<i>S</i>	Special flat wagon with bogies	4
<i>T</i>	Goods wagon with opening roof	0 ( <i>before 1988: 5</i> )
<i>U</i>	Special wagons	9
<i>Z</i>	Tank wagon	7

ANEXO 1.C. Letras índice internacionales para vagones de mercancías de acuerdo con la UIC (sexto y séptimo dígito).

	<b>For classes</b>	<b>Meaning</b>
<i>a</i>	E,F,G,H,I,T,U,Z	4 wheelsets <sup>*11</sup>

	L,O	3 wheelsets
	S	6 wheelsets
<i>aa</i>	E,F,G,H,T,U,Z	≥ 6 wheelsets <sup>*11</sup>
	L	≥ 4 wheelsets
	S	≥ 8 wheelsets
<i>b</i>	F	Wagon with separate axles[2] and a volume greater than 45 m <sup>3</sup>
	G	Wagon with separate axles and of 12 m length or more and 70 m <sup>3</sup> loading area
	H	Wagon with separate axles and of length 12–14 m, 70 m <sup>3</sup> volume, may be less for ferry boat wagons ( <i>f</i> )

	I	Wagon separate axles and loading area 22–27 m <sup>2</sup>
	T	Wagon with separate axles and length over 12 m
	G,T	Bogie wagon with loading length of 18 m or more
	H	Bogie wagon with loading length 18–22 m
	K	Bogie wagon with long stakes
	L,S	Transporter for medium-sized containers
<i>bb</i>	H	Wagon with separate axles and loading length of 14 m or more

	I	Wagon with separate axles and loading area of 27 m <sup>2</sup> or more
	H	Bogie wagon with loading length of 22 m or more
c	E	Discharging trap on the wagon floor
	F	Controllable gravity discharging wagon. Underside of floor ≥70 cm above top of rails
	H,T	Door in front wall
	I	Meat hooks
	L,S	Cradle
	U,Z	Compressed air or air blast discharging system

<i>cc</i>	F	Controllable gravity discharge hopper. Underside of floor <70 cm above top of rails
	H	Door in end wall and interior equipment for the transportation of motor vehicles
<i>d</i>	H	Floor trap
	I	For sea fish
	L,S	For transportation of motor vehicles on one level
	T,U	Controllable gravity discharge hopper, Underside of floor $\geq 70$ cm above top of rails* <sup>19</sup>

<i>dd</i>	T,U	Controllable gravity discharge hopper. Underside of floor <70 cm above top of rails, cannot be used with lifting equipment *19
<i>e</i>	H	Two levels
	I	Electrical forced-air heating
	L,S	Double-decker wagon for motor vehicles
	R	Folding sides
	T	Door height over 1.90 m
	Z	Heating equipment
<i>ee</i>	H	More than 2 levels
<i>f</i>	F,H,I,L,O,S,T,U,Z	Great Britain loading gauge, suitable for ferries and channel tunnel

<i>ff</i>	F,H,I,L,O,S,T,U,Z	Great Britain loading gauge, suitable for channel tunnel only
<i>fff</i>	F,H,I,L,O,S,T,U,Z	Great Britain loading gauge, suitable for ferries only
<i>g</i>	G,H,T,U	For grain
	I	Refrigerated van with cooling equipment
	K,L,R	For container transport
	S	For containers up to 60 feet
	Z	For sealed or liquified gases or gas dissolved under pressure
<i>gg</i>	I	Refrigerated van, cooled with liquid gas
	S	For containers up to 80 feet
<i>h</i>	G,H	For early vegetables

	I	With thick insulation
	L,R,S,T	For sheet metal coils laid horizontally
<i>hh</i>	L,R,S,T	For sheet metal coils laid vertically
<i>i</i>	H,T	Opening side walls (sliding walls)
	I	Refrigerated van with refrigerator on trailer wagon
	K,L,R,S	Fixed front wall, movable top cover
	U	Low-loading platform
	Z	Non-metal containers
<i>ii</i>	H	High-strength sliding walls
	I	Technical trailer
<i>k</i>	E,F,G,H,K,L(a),O,T,U,Z	Maximum load on class C route: $m < 20$ t
	Ea,Fa,Ga,Ha,	



	Laa,R,S,Ta,Ua,Za	Maximum load on class C route: $m < 40$ t
	Eaa,Faa,Gaa,Haa, Sa(a),Taa,Uaa,Zaa	
	I	Maximum load on class C route: $m < 50$ t <sup>*12</sup>
	Ia	Maximum load on class C route: $m < 15$ t
		Maximum load on class C route: $m < 30$ t
<i>kk</i>	E,F,G,H,K,L(a),O,T,U,Z	Maximum load on class C route: $20$ t $\leq m < 25$ t
<sup>*13</sup>	Ea,Fa,Ga,Ha,	
	Laa,R,S,Ta,Ua,Za	Maximum load on class C route: $40$ t $\leq m < 50$ t
	Eaa,Faa,Gaa,Haa, Sa(a),Taa,Uaa,Zaa	

		Maximum load on class C route: $50 \text{ t} \leq m < 60 \text{ t}$
/	E	Not tippable
	F,T,U	Loose (i.e. not controllable) gravity discharge hopper. Underside of floor $\geq 70 \text{ cm}$ above top of rails <sup>*19</sup>
	G	Up to 8 cm ventilation space
	H	With movable partitions (from 1 May 1994)
	I	Insulated wagon without ice chests
	K,L,O,R,S	No stakes
//	F,T,U	Loose gravity discharge hopper; underside of floor $< 70 \text{ cm}$ above top of rails

		No lifting gear allowed <sup>*19</sup>
	H	With lockable partitions (from 1 May 1994)
<i>m</i>	E	Loading length <sup>*14</sup> : $l < 7.7$ m
<sup>*15</sup>	Ea(a)	Loading length: $l < 12$ m
	G,H,T	Loading length <sup>*14</sup> : $l < 9$ m
	Ga(a),Ha(a),Ta(a)	Loading length: $l < 15$ m
	I	Loading area: $A < 19$ m <sup>2</sup>
	Ia	Loading area: $A < 39$ m <sup>2</sup>
	K,O,L	Loading length <sup>*14</sup> : $9 \text{ m} \leq l < 12$ m
	R,S	Loading length <sup>*14</sup> : $15 \text{ m} \leq l < 18$ m
	La(a),Sa(a)	Loading length: $18 \text{ m} \leq l < 22$ m
<i>mm</i>	K,O,L	Loading length <sup>*14</sup> : $l < 9$ m

*16	R,S	Loading length* <sup>14</sup> : l < 15m
	La(a),Sa(a)	Loading length: l < 18 m
<i>n</i>	l	Maximum load on class C route: m > 25 t
*13	H	Maximum load on class C route: m > 28 t
	E,G,K,L,T	Maximum load on class C route: m > 30 t
	F,O,U,Z	Maximum load on class C route: m > 30 t for twin-axled wagons / m > 40 t for three-axled wagons
	la,La	maximum load at limit of load C: m > 40 t
	Ea,Fa,Ga,Ha,Laa,	
	R,S,Ta,Ua,Za	Maximum load on class C route: m > 60 t

	Eaa,Faa,Gaa,Haa,	
	Sa(a),Taa,Uaa,Zaa	Maximum load on class C route: m > 75 t
o	E	Not end-tipping
	F,T,U	Loose gravity discharge hopper. Underside of floor $\geq 70$ cm above top of rails. Lifting gear not usable
		Twin-axled with loading length under 12 m and more than 70 m <sup>3</sup> loading area
	G,H	Ice chests under 3.5 m <sup>3</sup>
	I	Fixed sides
	K	Fixed end walls under 2 m
	R	Articulated wagon with three twin-axled bogies

	S	
oo	F,T,U	Loose gravity discharge hopper. Underside of floor <70 cm above top of rails. Lifting gear cannot be used
		Fixed end walls over 2 m high
	R	
p	F,T,U	Loose gravity discharge hopper. Underside of floor ≥70 cm above top of rails. Lifting gear cannot be used
		No slatted floor
	I	No sides
	K,L,S	No end wall
	R	

<i>pp</i>	F,T,U	Loose gravity discharge hopper. Underside of floor <70 cm above top of rails. Lifting gear cannot be used
		Removable sides
	K,R	
<i>q</i>	all	Electrical heating pipes for all permitted types of power
<i>qq</i>	all	Electrical heating pipes and heating equipment for all permitted types of power
<i>r</i>	all	Steam heating pipes
*17		
<i>rr</i>	all	Steam heating pipes and equipment
*17		
<i>r</i>	S	Articulated wagon
*18		

s	all	Permitted in trains up to 100 km/h
ss	all	Permitted in trains up to 120 km/h

\*11 In the version of the classification scheme valid up to 1979 *a* meant bogie wagon, *aa* was not applicable to classes E,F,G,H,T,U,Z.

\*12 In version of the classification scheme valid up to 1979 there was also a load limit 40 t.

\*13 The index letter was not part of the original 1966 version and was not introduced until later.

\*14 In the [DR](#) the definition was initially just "length under ...m", which referred to the length over buffers. As a result numerous wagons were given the wrong classification with the *m* missing.

\*15 In the original 1965 version *m* was only intended for classes E,G,I,K,O,R.

\*16 In the original 1965 version *mm* was only intended for classes K,O,R.

\*17 The index letter could be dropped in 1980, but was sometimes displayed beyond that date.

\*18 The index letter was introduced later than 1980.

\*19 Up to 1979 both wagons with metered as well as those with loose gravity discharge were designated with a *d*.

## ANEXO 2. Ficha técnica de la locomotora ALP45 DP de *Bombardier*.

Datos técnicos principales		
<b>Temperatura ambiente</b>	Locomotoras	-40 a
	NJT	+ 60 °C
	Locomotoras	-40 a
	AMT	+ 50 °C



<b>Ancho de vía</b>		1435 mm
<b>Disposición del eje</b>		Bo'Bo'
<b>Voltajes de operación</b>	Locomotoras NJT	25 kV, 60 Hz 12.5 kV, 60 Hz 12 kV, 25 Hz
	Locomotoras AMT	25 kV, 60 Hz
<b>Max. velocidad de operacion</b>	NJT Eléctrica	201 km/h
	AMT Eléctrica	129 km/h
	NJT Diésel	161 km/h
	AMT Diésel	105 km/h
<b>Potencia de tracción continua</b>	Eléctrica	4000 kW
	Diésel	2 x 1567 kW

<b>Esfuerzo de tracción en el arranque</b>		316 kN
<b>Potencia EDB en el borde de la rueda</b>	Durante la recuperación	4000 kW
	Durante la resistencia de frenado	1300 kW
<b>Max. esfuerzo de EDB</b>		150 kN
<b>Deceleración mínima del freno de servicio</b>		0.76 m/s <sup>2</sup>
<b>Deceleración mínima del freno de emergencia</b>		0.94 m/s <sup>2</sup>
<b>Longitud sobre parejas</b>		21800 mm
<b>Distancia entre los centros de bogie</b>		13250 mm
<b>Diámetro de la rueda (Nuevo / Usado)</b>		1118 / 1046 mm
<b>Ancho máximo</b>		2950 mm
<b>Altura máxima sobre la parte superior del riel</b>		4400 mm

<b>Radio mínimo de la curva negociable</b>		91 m
<b>Peso en funcionamiento</b>		130.6 Tn
<b>Carga máxima del eje</b>		32.65 Tn
<b>Tanque de combustible (capacidad utilizable)</b>	Locomotoras	6056
	NJT	L
	Locomotoras	6813
	AMT	L

ANEXO 3. Constantes para emplear en la ecuación de resistencia a la rodadura de la *Canadian National* 1990

<b>Grado de aerodinamismo</b>	<b>Vehículo</b>		<b>C (líder)</b>	<b>C (remolque)</b>
<b>Ninguno 1</b>	Transportador de autos abierto		-	12.3
<b>Ninguno 2</b>	Locomotora de carga		24.0	5.5
	Mezcla de vehículos de carga		-	5
<b>Bajo 3</b>	RDC (Rail diesel car)		19.0	4
<b>Bajo 4</b>	Convencional pasajeros incluy. locom.		19.0	3.5
<b>Medio 5</b>			14.0	3
<b>Medio 6</b>			10.0	2.6
<b>Alto 7</b>	Alta velocidad pasajeros		7.6	2.3
<b>Alto 8</b>	Máximo aerodinamismo posible		7.0	2

<b>Tipo de equipo</b>			<b>C</b>	<b>Área/(m<sup>2</sup>)</b>
-----------------------	--	--	----------	-----------------------------

Box Car			4.9	13.01
Bulkhead Flat (loaded)			5.3	13.01
Bulkhead Flat (empty)			12.0	13.01
Coal Gondola (loaded)			4.2	9.75
Coal Gondola (empty)			12.0	9.75
Covered Hopper			7.1	11.61
Tank Car			5.5	8.83
Standard Flat Car (without trailers)			5.0	2.32
Standard Flat Car (with trailers)			5.0	11.61
Caboose			5.5	13.47
Conventional Passenger Coach			3.5	12.08
Modern Lightweight Passenger Equipment			2.0	10.22
Leading Freight Locomotive			24.0	14.86
Multi-level Auto Transporter (open)			12.3	13.94
Multi-level Auto Transporter (closed)			7.1	15.79

ANEXO 4. Factores para el cálculo del radio equivalente.

Tipo de conductor	$\alpha$
cilindro sólido	0.779
Riel	0.7788
Cables de Al y Cu, 7 nucleos, 10-50 mm <sup>2</sup>	0.726
Cables de Al y Cu, 19 nucleos, 70-120 mm <sup>2</sup>	0.758

<b>Cables de Al y Cu, 37 nucleos, 150-185 mm<sup>2</sup></b>	0.768
<b>Cables de Al y Cu, 61 nucleos, 240-500 mm<sup>2</sup></b>	0.772
<b>Cables de Al y Cu, 91 nucleos, 625-1000 mm<sup>2</sup></b>	0.774
<b>Cable de 1 capa Al/Fe, 16/2.5 - 300/50 mm<sup>2</sup></b>	0.55
<b>Cable de 1 capa Al/Fe, 44/32 - 120/70 mm<sup>2</sup></b>	0.7
<b>Cable de 2 capas Al/Fe, 26 nucleos, 120/20 - 300/50 mm<sup>2</sup></b>	0.809
<b>Cable de 2 capas Al/Fe, 26 nucleos, 125/30 - 210/50 mm<sup>2</sup></b>	0.826
<b>Cable de 2 capas Al/Fe, 26 nucleos, 380/50 - 680/85 mm<sup>2</sup></b>	0.81

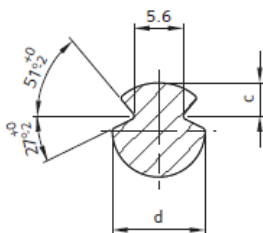
Factors to calculate equivalent radius from circular cross section radius. Source: H. Koettnitz, H. Pundt; Berechnung Elektrischer Energieversorgungsnetze; Band I; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (1968)

ANEXO 5. Características de los conductores de catenaria.

ANEXO 5.A. Siemens (Catálogo 2010). Sección 02- 14 – 04

## Grooved contact wire AC, Cu-ETP

acc. to EN 50149



Número de orden	8WL7000-0	8WL7001-0	8WL7004-0	8WL7002-0	8WL7003-0
<b>Designación</b>	Hilo de contacto AC-80	Hilo de contacto AC-100	Hilo de contacto AC-107	Hilo de contacto AC-120	Hilo de contacto AC-150

<b>Material</b>	Cu-ETP	Cu-ETP	Cu-ETP	Cu-ETP	Cu-ETP
<b>Peso [kg/m]</b>	0.71	0.89	0.95	1.07	1.33
<b>Sección nominal [mm<sup>2</sup>]</b>	80	100	107	120	150
<b>Min. resistencia a la tracción [N/mm<sup>2</sup>]</b>	355	355	350	330	310
<b>Min. carga de ruptura [kN]</b>	27.5	34.5	36.3	38.4	45.1
<b>Corriente permanente [A]</b>	370	455	468	490	540
<b>Resistencia a 20 °C [Ohmios/km]</b>	0.22	0.18	0.17	0.15	0.12
<b>Conductivity DC (20 °C) [m/Ohmios mm<sup>2</sup>]</b>	57	57	57	57	57
<b>c [mm]</b>	3.8	4	4	4	4
<b>d [mm]</b>	10.6	12	12.3	13.2	14.8

Disponible en tambores con longitudes de hasta 1500 m o como varillas enderezadas en longitudes de hasta 4 m.  
Cable de contacto ranurado BC y BF bajo pedido.

ANEXO 5.B. NKT (p. 15)

<b>Conductores de cable de cobre puro (Cu-ETP) según DIN 48201 parte 1</b>							
<b>Sección nominal</b>	<b>Sección transversal calculada [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>número de alambres</b>	<b>Diámetro de alambres</b>	<b>Diámetro del conductor</b>	<b>Peso [kg/km]</b>	<b>Carga de rotura calculada [Kn]</b>	<b>Capacidad de carga de corriente</b>

[mm <sup>2</sup> ]			e [mm]	or [mm]			continua [A]
<b>10</b>	10.02	7	1.35	4.1	90	4.02	90
<b>16</b>	15.89	7	1.7	5.1	143	6.37	125
<b>25</b>	24.25	7	2.1	6.3	218	9.72	160
<b>35</b>	34.36	7	2.5	7.5	310	13.77	200
<b>50</b>	49.48	7	3	9	446	19.84	250
<b>50</b>	48.35	19	1.8	9	437	19.38	250
<b>70</b>	65.81	19	2.1	10.5	596	26.38	310
<b>95</b>	93.27	19	2.5	12.5	845	37.39	380
<b>120</b>	116.99	19	2.8	14	1060	46.9	440
<b>150</b>	147.11	37	2.25	15.8	1337	58.98	510
<b>185</b>	181.62	37	2.5	17.5	1649	72.81	585
<b>240</b>	242.54	61	2.25	20.3	2209	97.23	700
<b>300</b>	299.43	61	2.5	22.5	2725	120.04	800
<b>400</b>	400.14	61	2.89	26	3640	160.42	960
<b>500</b>	499.83	61	3.23	29.1	4545	200.38	1110

ANEXO 5.C. HidroCantábrico Distribución Eléctrica, S.A.U (p. 11).

CARACTERÍSTICAS (según Norma UNE 21018. Acero calidad A)	DENOMINACION (DENOMINACION ANTIGUA) NUEVA								
		47-AL1/8-ST1A (LA56)	94-AL1/22-ST1A	(1L4A 7-1A10L )1/34-ST1A	ST1A (SLTA 1A18 0)	SLTA 1A18 0 (LA28 0)	ST1A (LA 380)	ST1A (LA45 5)	ST1A (LA54 5)
Sección(F) (mm <sup>2</sup> )	Aluminio (AL1)	46.8	94.2	147.3	241.7	337.3	402.3	484.5	
	Acero (ST1A)	7.8	22	34.3	39.4	43.7	52.2	62.8	
	Total (AL1/ST1A)	54.6	116.2	181.6	281.1	381	454.5	547.3	
Equivalente en cobre (mm <sup>2</sup> )		30	60	93	152	212	253	305	
Diámetro (mm)	Alma	3.15	6	7.5	8.04	8.46	9.24	10.14	
	Total (AL1/ST1A)	9.45	14	17.5	21.8	25.38	27.72	30.42	
Composición	Alambre de aluminio	Número	6	30	30	26	54	54	54
		Diámetro (mm)	3.15	2	2.5	3.44	2.82	3.08	3.38
	Alambre de acero	Número	1	7	7	7	7	7	7
		Diámetro (mm)	3.15	2	2.5	2.68	2.82	3.08	3.38



ANEXO 6. Índice de precios del productor (IPP)

ANEXO 6.A. Resumen por uso o destino económico de los bienes periodicidad anual

Año	IPP			
	Consumo intermedio	Consumo final	Bienes de capital	Materiales de construcción
<b>2017</b>	113.57	112.72	118.24	107.28
<b>2016</b>	110.79	110.85	117.34	107.22
<b>2015</b>	108.12	108.46	118.53	109.22
<b>2014</b>	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>2013</b>	93.59	94.13	93.70	99.82
<b>2012</b>	94.30	94.78	91.29	98.35
<b>2011</b>	99.84	94.73	94.05	94.26
<b>2010</b>	93.74	90.49	93.98	88.82
<b>2009</b>	88.56	87.42	96.52	87.31
<b>2008</b>	92.11	87.60	97.49	86.95
<b>2007</b>	84.69	79.60	92.76	81.13
<b>2006</b>	83.09	77.92	101.92	82.19
<b>2005</b>	77.67	74.50	99.25	77.84
<b>2004</b>	75.86	71.97	101.14	78.98
<b>2003</b>	71.79	68.82	104.43	72.07
<b>2002</b>	67.15	65.97	101.31	65.67
<b>2001</b>	61.11	61.52	87.64	60.91
<b>2000</b>	57.79	56.70	82.89	56.74
<b>1999</b>	52.09	51.16	74.79	50.26
<b>1998</b>	46.37	45.51	64.61	43.97

<b>1997</b>	41.32	39.52	56.40	39.11
<b>1996</b>	35.43	33.13	49.77	33.29
<b>1995</b>	31.48	28.11	44.50	29.09
<b>1994</b>	27.23	24.27	38.97	26.03
<b>1993</b>	22.36	19.95	34.59	22.73
<b>1992</b>	20.17	17.27	30.65	18.61
<b>1991</b>	17.53	13.98	27.94	15.24
<b>1990</b>	14.47	10.91	23.67	12.95
<b>1989</b>	11.45	8.18	18.58	10.43
<b>1988</b>	9.25	6.46	14.58	8.26
<b>1987</b>	7.50	4.78	11.68	6.28
<b>1986</b>	6.02	3.83	9.35	4.73
<b>1985</b>	4.75	3.12	7.63	3.71
<b>1984</b>	3.90	2.56	5.57	3.07
<b>1983</b>	3.23	2.13	4.17	2.56
<b>1982</b>	2.78	1.79	3.43	2.16
<b>1981</b>	2.28	1.39	2.92	1.80
<b>1980</b>	1.98	1.06	2.31	1.48
<b>1979</b>	1.63	0.82	1.89	1.18
<b>1978</b>	1.30	0.60	1.62	0.97
<b>1977</b>	1.07	0.50	1.39	0.65
<b>1976</b>	0.96	0.39	1.16	0.56
<b>1975</b>	0.75	0.30	0.95	0.47
<b>1974</b>	0.65	0.24	0.77	0.43
<b>1973</b>	0.47	0.18	0.58	0.26
<b>1972</b>	0.34	0.14	0.48	0.20
<b>1971</b>	0.27	0.12	0.40	0.17

<b>1970</b>	0.24	0.10	0.36	0.16
-------------	------	------	------	------

ANEXO 6.B. Resumen según actividad económica periodicidad mensual

Año(aaaa)- Mes(mm)	Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca	Explotación de minas y canteras	Industrias manufactureras	Total
<b>2018-01</b>	117.16	127.54	111.99	113.31
<b>2017-12</b>	116.42	126.22	112.29	113.41
<b>2017-11</b>	116.20	125.79	112.16	113.26
<b>2017-10</b>	115.21	115.15	111.56	112.19
<b>2017-09</b>	114.51	112.12	111.44	111.88
<b>2017-08</b>	115.91	109.14	111.51	112.00
<b>2017-07</b>	115.49	104.30	111.59	111.81
<b>2017-06</b>	115.76	98.25	111.16	111.24
<b>2017-05</b>	116.11	102.05	111.02	111.33
<b>2017-04</b>	117.10	102.92	110.77	111.29
<b>2017-03</b>	117.57	101.60	111.41	111.83
<b>2017-02</b>	116.34	102.24	111.17	111.50
<b>2017-01</b>	117.50	103.04	111.24	111.74
<b>2016-12</b>	115.70	102.43	111.09	111.34
<b>2016-11</b>	115.83	105.27	111.47	111.80
<b>2016-10</b>	115.84	101.29	110.29	110.66
<b>2016-09</b>	116.14	97.44	110.33	110.58
<b>2016-08</b>	117.75	97.33	110.52	110.94
<b>2016-07</b>	126.79	99.91	110.40	112.15

<b>2016-06</b>	126.01	100.63	110.53	112.18
<b>2016-05</b>	124.11	98.98	110.11	111.52
<b>2016-04</b>	121.51	96.58	109.86	110.86
<b>2016-03</b>	119.69	96.29	110.59	111.22
<b>2016-02</b>	118.58	91.53	111.57	111.68
<b>2016-01</b>	118.10	91.27	110.55	110.77
<b>2015-12</b>	114.08	94.15	109.61	109.57
<b>2015-11</b>	111.19	91.86	107.79	107.59
<b>2015-10</b>	109.53	92.66	107.22	106.94
<b>2015-09</b>	106.47	95.05	107.63	106.96
<b>2015-08</b>	103.84	96.51	106.53	105.77
<b>2015-07</b>	101.82	95.48	104.15	103.48
<b>2015-06</b>	101.36	96.42	102.76	102.32
<b>2015-05</b>	101.64	90.06	101.94	101.42
<b>2015-04</b>	103.42	92.04	102.39	102.10
<b>2015-03</b>	105.02	89.95	102.66	102.45
<b>2015-02</b>	102.76	85.87	100.99	100.61
<b>2015-01</b>	101.02	97.63	100.81	100.70
<b>2014-12</b>	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>2014-11</b>	98.83	95.63	98.95	98.76
<b>2014-10</b>	99.72	99.05	98.59	98.84
<b>2014-09</b>	97.82	100.13	98.41	98.40
<b>2014-08</b>	96.87	99.61	98.02	97.89
<b>2014-07</b>	94.30	98.14	97.87	97.22
<b>2014-06</b>	94.54	99.80	97.99	97.44
<b>2014-05</b>	95.84	101.24	97.99	97.77
<b>2014-04</b>	96.94	101.42	97.87	97.89

<b>2014-03</b>	94.41	103.79	97.76	97.47
<b>2014-02</b>	87.77	101.73	97.38	95.83
<b>2014-01</b>	85.40	96.47	96.82	94.68
<b>2013-12</b>	83.61	95.71	96.48	94.05
<b>2013-11</b>	83.55	96.11	96.33	93.95
<b>2013-10</b>	84.89	96.28	96.32	94.19
<b>2013-09</b>	86.84	98.31	96.66	94.93
<b>2013-08</b>	88.63	95.74	96.61	95.08
<b>2013-07</b>	88.89	94.12	96.66	95.08
<b>2013-06</b>	89.32	93.59	96.59	95.08
<b>2013-05</b>	90.19	91.02	96.27	94.86
<b>2013-04</b>	89.23	93.64	96.08	94.68
<b>2013-03</b>	89.45	98.58	96.07	94.98
<b>2013-02</b>	88.08	99.50	95.88	94.63
<b>2013-01</b>	88.43	97.10	95.75	94.46
<b>2012-12</b>	87.64	98.95	95.87	94.51
<b>2012-11</b>	89.73	100.01	96.20	95.21
<b>2012-10</b>	93.12	101.57	96.32	96.01
<b>2012-09</b>	94.34	101.33	96.29	96.20
<b>2012-08</b>	91.48	98.74	96.33	95.57
<b>2012-07</b>	91.87	91.61	96.14	95.10
<b>2012-06</b>	90.50	95.21	96.44	95.27
<b>2012-05</b>	93.89	105.34	96.99	96.88
<b>2012-04</b>	95.02	108.60	96.68	97.02
<b>2012-03</b>	95.61	106.21	96.44	96.82
<b>2012-02</b>	96.40	104.88	96.61	97.03
<b>2012-01</b>	95.71	102.83	96.75	96.90

<b>2011-12</b>	97.05	106.46	96.81	97.39
<b>2011-11</b>	96.94	106.24	96.67	97.25
<b>2011-10</b>	98.17	103.85	96.35	97.11
<b>2011-09</b>	95.90	103.11	95.64	96.10
<b>2011-08</b>	93.91	99.50	95.53	95.45
<b>2011-07</b>	94.74	99.74	95.24	95.40
<b>2011-06</b>	95.50	102.64	95.56	95.94
<b>2011-05</b>	95.32	106.65	95.54	96.11
<b>2011-04</b>	94.54	106.56	94.97	95.53
<b>2011-03</b>	94.94	105.06	94.73	95.33
<b>2011-02</b>	93.09	103.89	94.10	94.45
<b>2011-01</b>	91.83	101.11	93.21	93.39
<b>2010-12</b>	88.63	101.39	92.54	92.30
<b>2010-11</b>	85.13	97.59	91.71	90.81
<b>2010-10</b>	82.63	94.94	91.14	89.76
<b>2010-09</b>	84.99	93.26	91.09	90.07
<b>2010-08</b>	86.70	93.17	91.33	90.57
<b>2010-07</b>	87.24	95.15	91.69	91.06
<b>2010-06</b>	87.27	96.95	92.30	91.61
<b>2010-05</b>	86.97	98.73	92.34	91.69
<b>2010-04</b>	87.47	96.91	91.75	91.24
<b>2010-03</b>	87.84	97.26	91.07	90.81
<b>2010-02</b>	86.41	94.16	90.95	90.29
<b>2010-01</b>	83.79	97.28	90.36	89.52
<b>2009-12</b>	79.66	96.63	89.98	88.43
<b>2009-11</b>	78.44	93.57	89.43	87.61
<b>2009-10</b>	78.62	88.79	89.49	87.44

<b>2009-09</b>	79.51	86.80	90.27	88.07
<b>2009-08</b>	81.38	87.15	90.75	88.81
<b>2009-07</b>	82.22	92.08	91.01	89.43
<b>2009-06</b>	82.40	95.29	91.09	89.70
<b>2009-05</b>	87.81	79.91	91.89	90.48
<b>2009-04</b>	87.38	80.17	92.64	90.98
<b>2009-03</b>	85.67	81.10	92.97	90.97
<b>2009-02</b>	82.50	88.62	92.84	90.69
<b>2009-01</b>	81.48	78.99	91.68	89.09
<b>2008-12</b>	80.22	104.27	91.91	90.41
<b>2008-11</b>	79.54	111.13	92.54	91.14
<b>2008-10</b>	79.70	116.55	92.14	91.16
<b>2008-09</b>	78.44	115.23	90.24	89.41
<b>2008-08</b>	77.85	111.40	88.71	87.92
<b>2008-07</b>	80.49	109.95	88.53	88.21
<b>2008-06</b>	79.38	106.82	87.86	87.31
<b>2008-05</b>	75.81	98.21	87.52	85.93
<b>2008-04</b>	74.99	94.88	87.25	85.38
<b>2008-03</b>	74.88	95.02	86.99	85.18
<b>2008-02</b>	79.15	94.87	86.21	85.38
<b>2008-01</b>	75.25	94.44	85.28	83.91
<b>2007-12</b>	73.50	93.53	84.51	82.95
<b>2007-11</b>	72.50	85.06	84.29	82.14
<b>2007-10</b>	72.42	79.25	83.92	81.53
<b>2007-09</b>	72.41	74.05	84.19	81.44
<b>2007-08</b>	72.53	65.41	83.74	80.66
<b>2007-07</b>	72.64	69.28	83.20	80.48

<b>2007-06</b>	73.31	73.84	83.22	80.87
<b>2007-05</b>	74.11	69.21	84.23	81.53
<b>2007-04</b>	74.54	65.82	85.36	82.28
<b>2007-03</b>	73.60	65.74	85.76	82.41
<b>2007-02</b>	71.75	65.99	85.90	82.18
<b>2007-01</b>	70.71	66.23	85.99	82.07
<b>2006-12</b>	71.08	66.12	85.69	81.91
<b>2006-11</b>	71.24	64.52	85.61	81.82
<b>2006-10</b>	71.56	65.39	85.75	82.02
<b>2006-09</b>	71.65	68.19	85.78	82.19
<b>2006-08</b>	71.31	73.41	85.32	82.00
<b>2006-07</b>	70.42	76.39	85.42	82.00
<b>2006-06</b>	70.74	73.28	85.09	81.69
<b>2006-05</b>	70.77	71.73	84.25	81.01
<b>2006-04</b>	71.38	68.58	83.44	80.42
<b>2006-03</b>	70.33	63.79	82.17	79.05
<b>2006-02</b>	68.77	63.07	81.69	78.31
<b>2006-01</b>	68.26	64.99	81.56	78.18
<b>2005-12</b>	67.19	61.51	81.30	77.61
<b>2005-11</b>	68.02	61.10	81.28	77.75
<b>2005-10</b>	68.53	63.42	81.19	77.91
<b>2005-09</b>	67.07	65.00	81.08	77.56
<b>2005-08</b>	67.82	64.98	81.26	77.87
<b>2005-07</b>	68.27	61.85	81.34	77.89
<b>2005-06</b>	68.68	60.89	81.37	77.97
<b>2005-05</b>	68.91	57.55	81.39	77.89
<b>2005-04</b>	68.89	58.70	81.28	77.84








<b>2005-03</b>	69.49	59.41	81.14	77.92
<b>2005-02</b>	67.40	55.56	80.82	77.04
<b>2005-01</b>	65.76	54.23	80.53	76.40
<b>2004-12</b>	64.61	52.23	80.51	76.03
<b>2004-11</b>	64.18	56.57	80.86	76.38
<b>2004-10</b>	63.35	59.83	80.71	76.22
<b>2004-09</b>	63.91	55.60	80.33	75.89
<b>2004-08</b>	63.11	54.88	80.30	75.66
<b>2004-07</b>	63.29	53.38	80.24	75.59
<b>2004-06</b>	64.48	52.20	80.36	75.89
<b>2004-05</b>	64.22	53.18	80.01	75.62
<b>2004-04</b>	63.50	49.06	79.27	74.74
<b>2004-03</b>	63.30	49.02	78.68	74.26
<b>2004-02</b>	62.96	48.48	78.29	73.86
<b>2004-01</b>	61.57	47.68	77.81	73.16
<b>2003-12</b>	60.88	46.72	77.39	72.66
<b>2003-11</b>	60.21	46.68	77.28	72.41
<b>2003-10</b>	59.51	46.43	76.98	72.04
<b>2003-09</b>	60.52	44.19	76.65	71.92
<b>2003-08</b>	60.44	46.43	76.57	71.95
<b>2003-07</b>	61.28	45.71	76.20	71.83
<b>2003-06</b>	61.37	45.04	76.00	71.68
<b>2003-05</b>	62.19	43.80	76.02	71.82
<b>2003-04</b>	62.67	44.22	75.78	71.78
<b>2003-03</b>	60.02	47.42	75.37	71.01
<b>2003-02</b>	59.05	49.11	74.69	70.37
<b>2003-01</b>	58.73	46.70	73.74	69.50

<b>2002-12</b>	59.35	42.77	72.73	68.73
<b>2002-11</b>	60.03	39.64	72.20	68.36
<b>2002-10</b>	59.83	42.24	72.17	68.40
<b>2002-09</b>	58.34	41.90	71.17	67.30
<b>2002-08</b>	56.60	39.85	70.05	66.00
<b>2002-07</b>	56.28	37.75	69.19	65.21
<b>2002-06</b>	56.48	35.58	68.43	64.61
<b>2002-05</b>	56.79	35.89	68.00	64.38
<b>2002-04</b>	55.74	35.17	67.78	63.94
<b>2002-03</b>	55.65	34.43	67.52	63.70
<b>2002-02</b>	55.14	32.88	67.29	63.35
<b>2002-01</b>	55.29	31.72	67.06	63.16
<b>2001-12</b>	54.37	32.07	66.95	62.89
<b>2001-11</b>	54.06	31.74	66.82	62.71
<b>2001-10</b>	53.87	32.22	66.95	62.79
<b>2001-09</b>	54.62	34.23	66.97	63.04
<b>2001-08</b>	55.06	34.27	66.74	62.99
<b>2001-07</b>	55.01	34.00	66.51	62.80
<b>2001-06</b>	55.31	34.86	66.32	62.76
<b>2001-05</b>	56.33	37.11	66.08	62.91
<b>2001-04</b>	55.76	35.40	65.66	62.40
<b>2001-03</b>	54.33	33.84	64.99	61.51
<b>2001-02</b>	53.70	35.50	64.29	60.93
<b>2001-01</b>	52.01	34.71	63.41	59.87
<b>2000-12</b>	50.55	32.49	62.56	58.82
<b>2000-11</b>	50.55	32.65	62.04	58.44
<b>2000-10</b>	50.75	32.60	61.89	58.37

<b>2000-09</b>	51.13	33.09	61.72	58.36
<b>2000-08</b>	50.58	31.41	61.36	57.89
<b>2000-07</b>	50.61	31.64	60.93	57.60
<b>2000-06</b>	50.37	29.71	60.31	57.00
<b>2000-05</b>	51.55	28.38	59.53	56.64
<b>2000-04</b>	53.00	26.69	58.78	56.35
<b>2000-03</b>	52.12	26.64	57.83	55.45
<b>2000-02</b>	50.35	26.63	57.38	54.71
<b>2000-01</b>	48.36	26.18	56.65	53.71
<b>1999-12</b>	47.68	25.52	55.89	52.97
<b>1999-11</b>	46.47	25.39	55.83	52.64
<b>1999-10</b>	45.61	25.39	55.43	52.16
<b>1999-09</b>	45.42	25.03	54.87	51.67
<b>1999-08</b>	45.58	24.96	53.80	50.93
<b>1999-07</b>	44.74	25.04	52.98	50.14
<b>1999-06</b>	44.22	24.36	52.03	49.29
<b>1999-05</b>	43.76	23.31	51.82	48.98
<b>1999-04</b>	44.30	21.54	51.62	48.92
<b>1999-03</b>	44.04	20.09	51.61	48.78
<b>1999-02</b>	45.33	19.80	51.26	48.90
<b>1999-01</b>	45.39	19.47	50.41	48.33
<b>1998-12</b>	42.67	19.46	49.61	47.00
<b>1998-11</b>	42.85	19.94	49.40	46.92
<b>1998-10</b>	43.33	18.25	49.16	46.82
<b>1998-09</b>	44.30	17.49	48.47	46.60
<b>1998-08</b>	45.17	18.76	48.01	46.58
<b>1998-07</b>	46.91	18.75	47.65	46.84

<b>1998-06</b>	47.04	19.16	47.04	46.48
<b>1998-05</b>	46.13	20.30	46.83	46.11
<b>1998-04</b>	44.94	21.52	46.11	45.33
<b>1998-03</b>	42.96	21.41	45.84	44.58
<b>1998-02</b>	42.95	21.39	45.16	44.10
<b>1998-01</b>	39.80	21.19	43.93	42.35
<b>1997-12</b>	38.78	21.19	42.97	41.40
<b>1997-11</b>	39.21	20.56	42.55	41.21
<b>1997-10</b>	39.57	19.69	41.92	40.85
<b>1997-09</b>	38.16	19.19	41.32	40.01
<b>1997-08</b>	37.46	18.98	40.88	39.50
<b>1997-07</b>	37.58	19.26	40.62	39.37
<b>1997-06</b>	38.93	19.23	40.29	39.53
<b>1997-05</b>	36.70	19.09	40.05	38.72
<b>1997-04</b>	36.10	20.22	39.51	38.23
<b>1997-03</b>	34.88	19.70	39.12	37.59
<b>1997-02</b>	32.20	20.41	38.45	36.40
<b>1997-01</b>	31.40	20.12	37.82	35.73

ANEXO 7. Esquema de conexión eléctrico del sistema de alimentación 2x25kV aplicado a la ruta Sanín - Poveda

<p><b>Símbolos:</b></p> <p> aislador de sección o superposición</p> <p> Interruptor (NC)</p> <p> Interruptor MV (NA)</p> <p> Interruptor de HV (NC)</p> <p> Zona neutra</p>	<p><b>Parámetros:</b></p> <p><b>Transformadores:</b> Potencia de 30 MVA. Nivel de corto circuito: 12kA. Impedancia de cortocircuito: entre fase y neutro de 15% y entre fases de 5%.</p> <p><b>AT:</b> Potencia: 10 MVA. Nivel de cortocircuito: 2.5 kA Impedancia de cortocircuito:5%</p>
--	--

