

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICO – FINANCIERA DE ESQUEMAS DE  
COMPENSACIÓN EN CORRIENTE DIRECTA, BASADOS EN ULTRACAPACITORES, PARA  
SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO

LUIS EDUARDO CASTRILLÓN AGUDELO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ÁREA TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
MEDELLÍN  
2016

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICO – FINANCIERA DE ESQUEMAS DE  
COMPENSACIÓN EN CORRIENTE DIRECTA, BASADOS EN ULTRACAPACITORES, PARA  
SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO

LUIS EDUARDO CASTRILLÓN AGUDELO

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

Director

Andrés Emiro Diez 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  
2016

Medellín

2016

(Fecha)

---

Luis Eduardo Castrillón Agudelo

“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.

(Firma)

---

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

A mi esposa y mi hijos, quienes con su  
paciencia y motivación me alientan  
y son el motor que me impulsa  
a mejorar cada día

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar debo agradecer al Metro de Medellín y a Colciencias, por impulsar la investigación y propugnar día a día por el mejoramiento de nuestra región y nuestro país.

Doy gracias también al equipo de trabajo que desarrolló el proyecto de investigación, Andrés Emiro Diez Restrepo, PhD; Edison de Jesús Manrique Ospina, IE; Diego Alejandro Múnera Hoyos, MsC, José Valentín Antonio Restrepo Laverde, MsC; Mauricio Figueroa Carrillo, IE; Daniel Alberto Arroyave Molina, IEO; Carlos Arturo Rodríguez Gómez, IEO y Wilson Fredy Hincapié Estrada, TE; por su apoyo y perseverancia se logró llevar el proyecto al grado más alto y por su aporte incondicional en este trabajo de grado.

Un agradecimiento especial a los ingenieros Jaime Heriberto Pérez Naranjo y Carlos Ortiz Espinosa, quienes como jefes de área en el Metro de Medellín apoyaron el proyecto y la realización de este posgrado.

Un agradecimiento especial a la empresa INGETEAM de España, particularmente a los ingenieros Aitor Nieto Pujana y Asier Romo, por sus valiosos aportes para el desarrollo del proyecto de investigación.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	19
CAPÍTULO 1 .....	29
VIGILANCIA TECNOLÓGICA.....	29
CAPÍTULO 2 .....	35
METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA PERTINENCIA TÉCNICA Y FINANCIERA DEL USO DE ESQUEMAS DE COMPENSACIÓN EN CORRIENTE DIRECTA, BASADOS EN ULTRACAPACITORES, EN SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO .....	35
2.1 PLAN INICIAL .....	35
2.2 PLAN DE EXPANSIÓN .....	37
2.2.1 INCREMENTO DE LA DEMANDA.....	37
2.2.2 INCREMENTO DE LA OFERTA .....	38
2.3 ESTUDIOS OPERATIVOS.....	38
2.4 ESTUDIOS ELÉCTRICOS .....	38
2.4.1 REPOTENCIACIÓN .....	39
2.4.2 NUEVA INFRAESTRUCTURA .....	39
2.4.3 COMPENSACIÓN .....	39
2.4.4 ESTRATEGIA COMBINADA.....	40
2.5 EVALUACIÓN FINANCIERA.....	40
CAPÍTULO 3 .....	41
IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL CASO DEL METRO DE MEDELLÍN.....	41
3.1 PLAN DE EXPANSIÓN .....	41

3.1.1 Incremento de demanda .....	42
3.1.2 Incremento de la oferta .....	47
3.2 ESTUDIOS OPERATIVOS ASOCIADOS A LA EXPANSIÓN DE COBERTURA .....	48
3.3 ESTUDIOS ELÉCTRICOS ASOCIADOS A LA EXPANSIÓN DE COBERTURA .....	50
3.3.1 Estrategia combinada .....	67
3.4 EVALUACIÓN FINANCIERA.....	73
3.4.1 Modelo financiero.....	73
3.4.2 Estrategia financiera .....	76
CONCLUSIONES .....	77
RECOMENDACIONES .....	79
BIBLIOGRAFÍA .....	80
ANEXOS .....	84
OTROS APORTES DE ESTE TRABAJO DE GRADO .....	85



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Metodología TyD .....	27
Tabla 2. Publicaciones relevantes .....	33
Tabla 3. Características Corredor Extensión Línea A al Norte .....	49
Tabla 4. Descripción equipos para medición de variables eléctricas en los trenes.....	56
Tabla 5. Especificación técnica banco ultracapacitores estimado .....	61
Tabla 6. Especificación técnica general del convertidor cd-cd bidireccional (Buck – Boost) .....	64
Tabla 7. Datos de entrada al modelo financiero .....	75
Tabla 8. Resultado del Modelo Financiero .....	76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Intercambio de energía regenerada entre dos vehículos.....	21
Figura 2. Ecuación de búsqueda referentes técnicos metodologías de planificación .....	32
Figura 3. Resumen de publicaciones basada en la búsqueda realizada en Scopus.....	33
Figura 4. Metodología para la evaluación técnica y financiera de esquemas de compensación cd, basados en ultracapacitores, en sistemas de transporte eléctrico .....	36
Figura 5. Plan Maestro 2006 – 2030 Metro de Medellín .....	42
Figura 6. Tensión en la red de alimentación del Metro de Medellín sin y con compensador .....	43
Figura 7. Topología simulación incremento de flota .....	44
Figura 8. Perfil de tensión en la catenaria con y sin compensación, caso incremento de flota .....	45
Figura 9. Contribución del compensador en barraje SET Bello/Patio .....	46
Figura 10. Estudios para proyectos, Metro de Medellín. ....	48
Figura 11. Metodología para establecer el estado y las necesidades del sistema de potencia .....	51
Figura 12. Diagrama unifilar 110 kV ca / 13,8 kV ca .....	52
Figura 13. Diagrama unifilar 1500 V cd .....	53
Figura 14. Esquema Extensión al Norte con la SEU en la cola de la sección eléctrica actual y 4,5 km de extensión .....	54
Figura 15. Perfil de tensión medido en la catenaria en la vía ascendente al inicio y al final de la sección eléctrica .....	58
Figura 16. Histograma de frecuencia vía ascendente cola de circuito (Niquía) 1 día de operación .....	59
Figura 17. Porcentaje de recuperación de energía y punto de retorno [44].....	63
Figura 18. Relación entre el costo de la energía y el punto de retorno [44] .....	63

Figura 19. Topología general convertidor cd-cd bidireccional (Buck – Boost) .....	64
Figura 20. Simulación en PSCAD de un convertidor bidireccional buck-boost.....	66
Figura 21. Contribución del compensador en la cola del circuito (SEP Niquía).....	67
Figura 22. Configuración recomendada Extensión al Norte .....	68
Figura 23. Perfil de tensión en la cola del circuito con y sin compensación, caso incremento de oferta.....	69
Figura 24. Tensión en al catenaria medida en la SEU a 7,5 km de la última SET y 3 trenes arrancando simultaneamente .....	70
Figura 25. Tensión en al catenaria medida en la SEU a 7,5 km de la última SET y 2 trenes arrancando simultaneamente.....	71
Figura 26. Tensión en al catenaria medida en la SEU a 7,5 km de la última SET y 1 solo trenes arrancando .....	72

## GLOSARIO

**ALGORITMO:** Método para cumplir una tarea específica adaptado para su implementación en un programa de computadora.

**BUCK:** Proceso mediante el cual un convertidor reduce la tensión de entrada a un sistema.

**BOOST:** Proceso mediante el cual un convertidor eleva la tensión de salida de un sistema.

**BUS:** Línea de alimentación a la cual se conecta cargas eléctricas.

**CATENARIA:** Línea aérea de contacto de suspensión longitudinal, a través de la cual los pantógrafos de los vehículos eléctricos captan la corriente de tracción.

**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.

**COMPENSADOR cd:** Dispositivo electrónico que permite regular la tensión de un bus de corriente directa.

**CONVERTIDOR cd – cd:** Dispositivo electrónico que permite transformar la tensión de corriente directa de un nivel a otro, regulando la tensión de salida.

**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 o 10 ms) y varios segundos. En inglés en general se denomina *Swell*.

**ENERGÍA RENOVABLE:** Energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se cuentan la eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar, biomasa y los biocombustibles.

**ESS:** Sistema de almacenamiento de energía (del inglés, Energy Storage System).

**FACTOR DE EFICIENCIA:** Relación entre una variable de entrada y una de salida. Da una medida de lo que se obtiene a partir de lo que se invierte.

**HILO DE CONTACTO:** Cable conductor suspendido de la catenaria, paralelo al plano de rodadura de la vía y que sirve para conectar eléctricamente la línea aérea de contacto con los vehículos.

**HUECO DE TENSIÓN:** Disminución del valor eficaz de la tensión entre el 0,9 y el 0,1 p.u. de la tensión de funcionamiento normal y con una duración desde medio ciclo (8 ms o 10 ms) 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.

**PAR MÁXIMO DE ARRANQUE:** Fuerza de tracción máxima que pueden ejercer los motores de un vehículo para acelerarlo.

**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.

**VELOCIDAD BASE:** Es aquella velocidad hasta donde se consigue el esfuerzo de tracción máximo por simple adherencia.

**ULTRACAPACITOR:** Es un tipo de condensador no convencional que tienen la capacidad de almacenar una cantidad de energía mucho mayor que los capacitores convencionales.

## LISTA DE SIGLAS

**cd:** Corriente directa.

**ca:** Corriente alterna

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

**Pax:** Pasajeros

**PSCAD<sup>TM</sup>:** Diseño Asistido por Computador de Sistemas de Potencia (del inglés, *Power System Computer-Aided Design*).

**SAE:** Sistema de Almacenamiento de Energía.

**SE:** Subestación de Energía.

**SEP:** Subestación de Pasajeros.

**SET:** Subestación de Tracción.

**SEU:** Subestación de ultracapacitores

## UNIDADES Y SÍMBOLOS

Amperio	A
Vatio	W
Vatio-hora	Wh
Joules	J
Capacitancia	F



## RESUMEN

Este trabajo describe una metodología para el uso de sistemas compensación cd en la planificación de sistemas de transporte, tomado como referencia los casos más importantes reportados en la literatura y un prototipo diseñado y construido para el sistema metro de la ciudad de Medellín.

En el capítulo 1 se detalla la vigilancia tecnológica realizada, mediante la que se pudo conocer el estado del arte y las tendencias de la producción científica en lo relacionado con las metodologías para el uso de sistemas de compensación en la planificación de redes eléctricas para sistemas de transporte. Así mismo se pudo validar la pertinencia del trabajo realizado .

En el capítulo 2 se presenta la metodología de trabajo propuesta para la evaluación técnica y financiera de esquemas de compensación cd, basados en ultracapacitores, para sistemas de transporte eléctrico, la cual plantea de manera general los estudios que se deben realizar, con el fin de conocer la viabilidad de implementación de este tipo de tecnología.

En el capítulo 3, se implementa y se valida la metodología propuesta en el caso del Metro de Medellín y se presentan los resultados de su implementación.

**Palabras clave:** Sistemas de Compensación cd-cd, ultracapacitores, metodología de planificación, estudios operativos, estudios eléctricos, regulación de tensión, evaluación financiera.

## **Abstract**

*This paper describes a methodology for using dc compensation systems in the planning of transport systems, taken as a reference the most important cases reported in the literature and a prototype designed and built for the metro system at Medellin city.*

*In Chapter 1, technological surveillance conducted is detailed by which it was known the state of the art and trends in scientific production in relation to the methodologies for the use of compensation schemes in the planning of electrical networks for systems transport. Also it was possible to validate the relevance of the work done.*

*In chapter 2 the methodology proposed for technical and financial evaluation of compensation schemes dc based on ultracapacitors to electric transport systems is presented, which generally raises the studies to be performed, in order to know the feasibility of implementing this type of technology.*

*In Chapter 3, the proposed methodology is implemented and validated in the case of Metro de Medellin and the results of its implementation are presented.*

**Keywords:** *Compensation systems dc-dc, Ultracapacitor, planning methodology, operative studies, electrical studies, voltage regulation, financial evaluation.*

## INTRODUCCIÓN

La reducción del consumo energético en todos los medios de transporte es una necesidad crítica a nivel mundial, dada su participación en el consumo de energía no renovable fósil y su contribución en emisiones de gases de efecto invernadero.

En concordancia con los principios rectores del Plan Maestro [1], que buscan entre otras cosas la sostenibilidad ambiental y financiera, el Metro de Medellín ha venido desarrollando, en convenio con la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), proyectos de investigación tendientes a la reducción del consumo de energía del sistema.

La reducción del consumo de energía en el Metro de Medellín se ha afrontado desde diferentes perspectivas, que involucran disciplinas diversas como las ingenierías mecánica, eléctrica, electrónica, informática y aeronáutica, en proyectos que han tratado temas tales como:

- Reducción del arrastre aerodinámico de los trenes.
- Aprovechamiento de la energía de frenado de los trenes.
- Actualización tecnológica del sistema de tracción de los trenes.
- Evaluación de la factibilidad de implementar energías renovables.
- Disminución de la fricción en la interfaz rueda – riel del sistema Metro.
- Optimización del consumo de energía mediante la sincronización de paradas y arranques de trenes durante la operación (Módulo de Gestión de Energía del Sistema de Gestión de Tráfico).

Adicionalmente, el Metro de Medellín es un sistema de transporte que no recibe subsidio del gobierno para su operación, se auto-sostiene con la tarifa al usuario, con la cual

además contribuye a la deuda subsidiada por la nación y paga sus propias deudas, las cuales actualmente rondan los USD 50 millones [2]. Debido a esto, los ahorros energéticos que se logren en operación se verán favorablemente reflejados, no solamente en excedentes para aportar al pago de la deuda, sino también en la tarifa al usuario, con todas las consecuencias sociales que esto implica si se tiene en cuenta que el 89% de los usuarios del sistema metro hacen parte de los estratos socioeconómicos 1, 2 y 3 [2], en los que el rubro de transporte en la canasta familiar en Medellín tiene un peso significativo.

Entre 2013 y 2015 el Metro de Medellín reporta gastos por \$ 60.000.000 (USD 19.050) y por \$ 12.000.000 (USD 3810), TRM del 1 de enero de 2016 \$ 3.149,47/USD, en la reparación de cada motor de tracción y de compresor respectivamente. Aunque no se tiene evidencias concretas, las sobretensiones en la catenaria podrían ser una de las causas que afectan el desempeño de estos equipos. De ahí la importancia que podría tener un sistema de compensación como el desarrollado, por su incidencia en la reducción de las fluctuaciones de tensión y su consecuente ahorro en el mantenimiento del sistema.

En un estudio anterior elaborado por la UPB en convenio con la Universidad de Ciencias Aplicadas de Kempten (Alemania) y el Metro de Medellín (Armstorfer) en [3][4], mediante simulación asistida por computador con el software *Power System Computer-Aided Design (PSCAD<sup>TM</sup>)* de las condiciones eléctricas en uno de los trenes bajo operación típica, se identificó un buen potencial de ahorro de energía en la disipación de las resistencias de frenado. Adicionalmente, sentó las bases para el estudio del uso de sistemas de compensación, basados en ultracapacitores, recomendando además la solución estacionaria para el Metro de Medellín. El modelo detallado del sistema de tracción, producto de este estudio, es un insumo importante en el desarrollo de este trabajo de grado.

Posteriormente (Killer) en [5], bajo el mismo convenio, profundizó en la integración del sistema de compensación en el Metro de Medellín; complementó el modelo elaborado en [3][4], mediante *PSCAD<sup>TM</sup>* y logró un modelo mejorado, con la posibilidad de manipular los parámetros, permitiendo observar el comportamiento de carga y descarga del sistema de compensación, el flujo de potencia y su efecto en la estabilización de tensión, condición ésta última que depende de la distancia a la subestación de tracción vecina y de la densidad de trenes. También elaboró un análisis aproximado del costo beneficio de implementación de este tipo de solución.

La generación de energía eléctrica a partir de la energía cinética del tren (frenado regenerativo), provoca una disminución de la energía que aporta el sistema al tren, como lo ilustra la Figura 1.

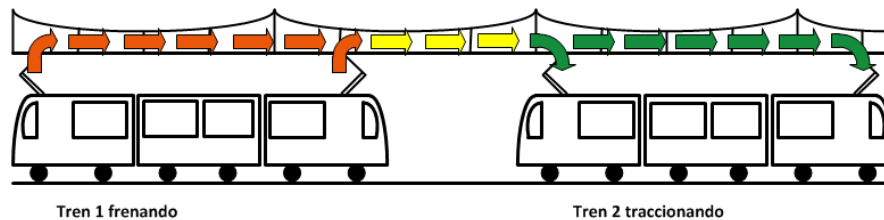


Figura 1. Intercambio de energía regenerada entre dos vehículos

En el esquema actual esta energía se aprovecha por otro tren, en mayor o menor medida, dependiendo de la distancia a la que se encuentren, a lo que se denomina *receptividad de la red*. De no haber consumidor, la tensión se eleva hasta que es necesaria la disipación en forma de calor en la resistencia de frenado del tren [6][7][8].

Con base en el potencial de ahorro de energía identificado, el Metro y la Universidad recibieron la aprobación y financiación de COLCIENCIAS para desarrollar un sistema de compensación en corriente directa (cd), utilizando un módulo de almacenamiento de energía basado en ultracapacitores. El trabajo que se presenta está vinculado a este

proyecto de investigación, y ha sido formulado para contribuir en el estudio de la manera en que el uso de estos nuevos dispositivos compensadores, impacta en el planeamiento de la infraestructura para la alimentación de sistemas de transporte eléctrico. Para este fin, este trabajo propone una metodología para evaluar la pertinencia técnica y financiera del uso extensivo de esquemas de compensación en cd basados en ultracapacitores, para aprovechar la energía regenerada en el proceso de frenado, en sistemas de transporte eléctrico.

Se implementó un prototipo en una sección eléctrica del sistema de suministro de energía, de tal manera que se pudo validar el mejoramiento en la receptividad de la red; la estabilidad de tensión, consecuencia natural del efecto de compensación; el ahorro de energía, la energía no se disipa en resistencias, sino que es reutilizada para la tracción; la utilización de la infraestructura del sistema de alimentación, al darse un aplanamiento en la curva de demanda y una mejora en la regulación de voltaje. Pudo comprobarse como la cantidad de trenes susceptibles de ser alimentados con un mismo sistema se incrementa y ante una expansión del sistema de transporte, la distancia de operación podría aumentarse, en ciertas condiciones operativas, con una inversión inicial menor en infraestructura eléctrica.

Con las pruebas realizadas al prototipo del compensador conectado al sistema de suministro de energía del Metro de Medellín, se evidenció el mejoramiento en la eficiencia energética, el impacto ambiental y fue posible realizar una evaluación financiera para determinar la factibilidad del uso extensivo de esquemas de compensación en el sistema metro.

Un hito importante en este tipo de investigación lo constituye la transferencia de conocimiento y su apropiación y desarrollo tecnológico. La vigilancia tecnológica realizada permitió descartar la contratación de la fabricación y puesta en marcha del prototipo con

una empresa experta internacional, debido a que este tipo de empresas no están dispuestas a entregar todo su conocimiento. Por otro lado, uno de los objetivos del proyecto, declarado ante COLCIENCIAS, es el desarrollo de la industria local, lo cual además hace parte del código de buen gobierno del Metro de Medellín. Consecuentemente con lo expuesto y las posibilidades técnicas y financieras del proyecto, el prototipo fue desarrollado en asocio con la industria local, con ingeniería 100% colombiana.

En el desarrollo de la metodología, objeto de este trabajo de grado, se llevaron a cabo las siguientes etapas.

### **Estado del arte**

Se profundizó en la búsqueda en la Internet y en diferente material bibliográfico los temas relacionados con el proyecto, logrando una aproximación a proyectos anteriores, en curso y futuros afines al desarrollado, lo que permitió conocer el estado del arte de los sistemas de compensación cd basados en ultracapacitores. De manera general se conoció las experiencias de operadores de sistemas de transporte eléctrico con el desempeño de este tipo de tecnologías, los resultados técnicos y en alguna medida los resultados financieros obtenidos después de aplicarlos en sistemas de transporte eléctrico. No fue posible encontrar referencias de los métodos seguidos para evaluar su uso extensivo en sistemas de transporte eléctrico.

Se efectuó también un proceso de búsqueda de información para la selección del proveedor considerado la mejor opción técnica y financiera para la implementación del prototipo del sistema de compensación. Dicho proceso se considera exitoso porque culminó con la selección de una compañía local que desarrollo además la construcción de estos dispositivos para la industria local.

Adicionalmente con dicha vigilancia tecnológica se realizó un estudio de mercado y se obtuvo costos aproximados, lo cual sirvió como insumo para la evaluación financiera del prototipo y de las diferentes alternativas de uso extensivo de la tecnología en el Metro de Medellín.

### **Elaboración de la metodología para la planificación de redes de alimentación de sistemas de transporte eléctrico.**

La metodología que se desarrolla en este trabajo de grado, permite la planificación de redes de alimentación de energía, de sistemas de transporte eléctrico de alta y mediana capacidad, mediante el uso de esquemas de compensación que utilizan ultracapacitores como medio de almacenamiento de energía, logrando optimizar las inversiones en infraestructura eléctrica e incrementar la eficiencia energética del sistema.

Dicha metodología tiene en cuenta aspectos tales como:

- El estudio detallado de la topología de las redes de alimentación existentes.
- El hallazgo de los puntos débiles en dichas redes.
- La cuantificación del potencial de ahorro de energía.
- El dimensionamiento del sistema de compensación.
- La realización del diseño básico del sistema de compensación.
- La especificación del sistema de compensación.
- La orientación en la búsqueda de proveedores y el estudio de mercado.
- La definición del modelo financiero.

### **Implementación de la metodología en el caso del Metro de Medellín.**

Implementar la metodología en el Metro de Medellín hizo posible:



- Evaluar la mejora de la eficiencia energética del sistema de transporte.
- Evaluar la disminución de costos de inversión en la eventual necesidad de repotenciación del sistema de suministro de energía por el incremento de la flota de trenes, para lo cual se hizo uso de herramientas de simulación asistida por computador, mediante el software *PSCAD<sup>TM</sup>* Versión 4.3. Dicho software es de amplia utilización para el análisis de redes de cd, lo que lo hace ideal en la etapa de diseño y planeación de dichas redes.
- Evaluar la disminución de costos de inversión por la futura expansión del sistema de transporte.
- Elaborar el modelo financiero, acorde con las condiciones propias del Metro de Medellín.

La metodología propuesta hace parte de un proyecto de investigación, cofinanciado por COLCIENCIAS, en el cual el Metro de Medellín y la Universidad Pontificia Bolivariana buscan impactar la eficiencia energética y por ende la sostenibilidad financiera de este sistema de transporte, el desarrollo de la capacidad tecnológica local, la generación de empleo, la posibilidad de innovación tecnológica y ampliar el conocimiento científico en lo relativo a la planificación de redes de alimentación de sistemas de transporte eléctrico y en el diseño, fabricación y puesta en servicio de sistemas de compensación que utilizan como medio de almacenamiento ultracapacitores.

La metodología propuesta se diferencia del método tradicional de planeación en que este último no contempla la inclusión de equipos compensadores desde la concepción del sistema, a pesar de que pueden jugar un papel importantísimo dentro del sistema de transporte.

El mercado de los sistemas de transporte eléctrico se ha desarrollado principalmente en países europeos, Japón, China y Norteamérica, países que concentran las multinacionales que desarrollan todo tipo de proyectos en torno a dichos sistemas y monopolizan dicho mercado, en esquemas que atan la aplicación de las metodologías a la venta de los equipos.

Los sistemas de transporte masivo son una necesidad para la movilidad de las comunidades en las que operan, en su gran mayoría subsidiados por el estado, por lo que tienen más rentabilidad social que económica y se ven altamente influidos por la voluntad política de los gobernantes, motivo por el cual la metodología propuesta encuentra una oportunidad real de mercado, dado que impactaría directamente sobre su sostenibilidad financiera e incidiría directamente sobre la tarifa al usuario final y el presupuesto de las ciudades. La metodología propuesta cobra más valor para empresas como el Metro de Medellín, dado que no recibe subsidio del estado y la fijación de la tarifa está regulada por la autoridad de transporte local.

### **Metodología TyD**

En vista de que este trabajo de grado se desarrolla en el marco del proyecto de investigación “Sistema de compensación en corriente directa para aprovechamiento de frenado regenerativo basado en ultracapacitores”, cofinanciado por Colciencias y con radicado CIDI No. 132B-08/13-19, la formulación no se hizo explícitamente siguiendo la Metodología TyD, puesto que esta metodología está enfocada principalmente a la selección y delimitación de un problema de ingeniería susceptible de ser tratado. En este caso, se parte de que el problema, a grandes rasgos, es bien conocido. Sin embargo para mantener una coherencia con las investigaciones fruto de los seminarios investigativos de la Maestría en TyD y para validar por un método diferente la selección de la propuesta investigativa, se hizo el ejercicio de seguir el método TyD, con los resultados que se

sintetizan en la Tabla 1 y que coincidió con la propuesta investigativa que se había presentado en el anteproyecto del trabajo de grado.

**Tabla 1. Metodología TyD**  
**MAPA METODOLOGÍA TyD**

<b>RAÍCES</b>	<b>PRINCIPALES</b> (Causas directas del problema)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La reducción del consumo energético en todos los medios de transporte es una necesidad crítica a nivel mundial, dada su participación en el consumo de energía no renovable fósil y su contribución en emisiones de gases de efecto invernadero. Adicionalmente, el Metro de Medellín es un sistema de transporte que no está subsidiado por el gobierno, se auto-sostiene con la tarifa al usuario, y actualmente reconoce una deuda de USD 50 millones, la cual debe cubrir con recursos propios. Debido a esto, los ahorros energéticos que se logren en operación se verán favorablemente reflejados, no solamente en excedentes para aportar al pago de la deuda, sino también en la tarifa al usuario, con todas las consecuencias sociales que esto implica si se tiene en cuenta que el 92% de los usuarios del sistema metro hacen parte de los estratos socioeconómicos 1, 2 y 3, en los que el peso del rubro de transporte en la canasta familiar en Medellín tiene un peso significativo.</li> <li>• Altos costos de inversión en la eventual necesidad de repotenciación del sistema de suministro de energía por el incremento de la flota de trenes o ante la necesidad de incrementar la oferta mediante extensiones de la línea.</li> <li>• Fluctuaciones de tensión severas causan mala operación y daño de equipos en el sistema metro con relativa frecuencia y además restringen la distancia operativa entre los trenes.</li> <li>• El análisis de oportunidad a permitido establecer que los sistemas de compensación se podrían utilizar en el Metro de Medellín para resolver la problemática señalada, sin embargo, se detecta que no existe una metodología para la evaluación técnico – financiera de esquemas de compensación en corriente directa, basados en ultracapacitores, para sistemas de transporte eléctrico.</li> </ul>
	<b>SECUNDARIAS</b> (Causas tangenciales del problema)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento de los costo de mantenimiento por reparación de equipos electrónicos sensibles y motores de tracción.</li> <li>• Creciente incremento del costo de la energía eléctrica.</li> <li>• Creciente preocupación por huella de carbono de la operación.</li> </ul>

<b>ELEMENTOS</b>	<b>PRIMARIOS</b> -Áreas -Disciplinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de Tracción Eléctrica</li> <li>• Calidad de la Potencia, Electrónica</li> <li>• Convertidores de Potencia</li> <li>• Almacenamiento de Energía.</li> </ul>
	<b>SECUNDARIOS</b> -Herramientas -Software -Metodologías	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herramientas de simulación digital para análisis de electromecánico.</li> <li>• <i>PSCAD</i>, hoja de cálculo, modelos financieros.</li> </ul>
<b>PERCEPTORES</b>	<b>DIRECTOS</b> Afectados en mayor proporción con la persistencia o solución del problema	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usuarios, vía disminución tarifa técnica.</li> <li>• Operador del sistema de transporte por disminución costos operativos.</li> </ul>
	<b>INDIRECTOS</b> Afectados en menor proporción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Academia</li> <li>• Industria local</li> <li>• Fabricantes</li> <li>• Otros operadores de transporte</li> </ul>
<b>PROBLEMA</b>	Carencia de una metodología para la evaluación técnico – financiera de esquemas de compensación en corriente directa, basados en ultracapacitores, para sistemas de transporte eléctrico.	
<b>PROPUESTA INVESTIGATIVA</b>	Desarrollar y probar en el caso del Metro de Medellín, una Metodología para la evaluación técnico – financiera de esquemas de compensación en corriente directa, basados en ultracapacitores, para sistemas de transporte eléctrico; mediante el diseño, construcción y pruebas a un sistema de compensación real. El modelo de diagnóstico, dimensionamiento, selección de la ubicación, características de las pruebas y puesta en servicio del prototipo; serán concebidos con el fin de validar la metodología propuesta.	

## CAPÍTULO 1

### VIGILANCIA TECNOLÓGICA

La consulta de los referentes técnicos permitió evidenciar como el desarrollo de la electrónica de potencia y de los convertidores cd-cd facilita el uso de ultracapacitores como medio de almacenamiento de energía y su aplicación en sistemas de transporte eléctrico, dado que requieren altas densidades de potencia en cortos periodos de tiempo, tal como ocurre en el proceso de frenado y arranque de los sistemas férreos [9]–[20].

Otro aspecto importante a tener en cuenta, lo constituyen las variables más relevantes a controlar, para garantizar la vida útil y la óptima operación de los ultracapacitores. Maxwell, fabricante de los ultracapacitores que se usarán en el sistema de compensación prototipo del Metro de Medellín, en la ficha de datos especifica un voltaje por celda de 2,6 V y una temperatura de operación, medida en la carcasa de cada celda, entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $65^{\circ}\text{C}$ . Diferentes referencias consultadas [9], [19] indican que la vida útil se reduce a la mitad cuando el voltaje por cada celda aumenta 0,2 V o la temperatura se incrementa  $10^{\circ}\text{C}$ .

Se pudo evidenciar la implicación que tienen los compensadores en la planificación de sistemas de transporte masivo que operan con vehículos eléctricos y casos de éxito que permiten una reducción del consumo de energía en el sistema, ya que menos energía tiene que ser convertida en calor en el proceso de frenado regenerativo. No se encuentran referencias en las que se definan metodologías para la planificación de redes de alimentación eléctrica en sistemas de transporte, que tengan en cuenta sistema de compensación el desarrollado en este trabajo.

También fueron encontrados casos en los que se reportan los beneficios de la capacidad de compensación de tensión, que permite obtener fluctuaciones de tensión mínimas en la catenaria, logrando extender la distancia operativa. En el ámbito del ahorro de energía hay muchas referencias y desarrollos de sistemas de compensación que demuestran excelentes resultados, tales como [21], [22]. Igual que en el caso presentado en este trabajo, los operadores de metro en Seúl, Daejeon e Incheon [23], [24] han logrado ahorros de energía del 20% y del 15% respectivamente, usando compensadores con ultracapacitores. También se encontraron varias aplicaciones de los sistemas de almacenamiento de energía que involucran ultracapacitores para permitir la operación de vehículos de transporte masivo como tranvías, autobuses y trolebuses desconectados de la red de suministro [25], [26].

Los casos más destacados de aplicaciones embarcadas en tranvías están operando en Ginebra (Suiza), Guangzhou (China), Sevilla y Zaragoza (España). Para los autobuses y trolebuses un caso notable es Shanghai, donde una flota de autobuses de carga rápida está siendo sometida a pruebas. También se resaltan los trolebuses de Milán, Italia, donde los ultracapacitores permiten la operación, desconectado de la red de suministro, por unos pocos kilómetros y como consecuencia un mayor ahorro de energía de frenado. Sin embargo, los mejores resultados corresponden con los que combinan los beneficios del uso de la red y la capacidad de almacenamiento de energía [27]. Los peores resultados son los casos en los que se pretende una operación completa fuera de la red. Se referencia el caso de varios autobuses en Shanghai que se han incendiado [28] debido a sobrecalentamiento causado por el uso intensivo de los ultracapacitores.

A medida que el campo de aplicación crece, la investigación se centra en la aplicación de técnicas como la Red Neuronal y el Algoritmo Genético para determinar la localización y el dimensionamiento óptimo de ultracapacitores en sistemas de metro [29], cuando se requiere, debido a la complejidad de la red. También hay un gran interés en mejorar o

desarrollar estrategias de control para maximizar la eficiencia energética en los sistemas que involucran convertidores y dispositivos de almacenamiento de energía [30], [31].

Los referentes comerciales ayudaron a hacer una estimación del costo de un equipo, a ser instalado en una sola localización de un sistema ferroviario de una capacidad para almacenar la energía de frenado de un tren convencional que puede ser alrededor de 4 kWh, como en el caso del Metro de Medellín, el cual puede llegar a ser de aproximadamente \$ 1.347.148.800 (USD 463.423, TRM del 5 de agosto de 2015 \$ 2.906,95/USD), de acuerdo a información no vinculante recibida de fabricantes de este tipo de equipos tales como Siemens e Ingeteam.

No fue fácil encontrar fuentes de información primaria, sin embargo, mediante entrevistas a dos expertos, se pudo evidenciar, que es mandatorio una caracterización previa del sistema al cual se integrará el compensador, dado que cada sistema es particular; que en relación con la planificación no se conocen referentes que hayan incluido esquemas de compensación desde el diseño o la repotenciación del sistema de suministro de energía para una red ferroviaria; que los sistemas de compensación son importantes para controlar la estabilidad de tensión en los sistemas de transporte eléctrico y cobran relevancia en el evento de entrada de nueva de flota o expansión de la vía férrea y que los sistemas de compensación basados en ultracapacitores no se han masificado debido al alto costo de la tecnología.

La vigilancia tecnológica desarrollada en este trabajo hace evidente como los ultracapacitores se están convirtiendo en un componente estándar del material rodante en los sistemas tranviarios. Esta última condición está motivada generalmente por la presión en contra de la contaminación visual de las líneas aéreas, erróneamente puesto en contrapeso contra preocupaciones más importantes, como la contaminación del aire y el cambio climático.

Los compensadores involucrando equipos de última tecnología tales como los ultracapacitores, han abierto un campo muy importante de aplicaciones para mejorar la gestión energética y el uso de la infraestructura de los sistemas de transporte eléctrico.

La rápida expansión de los sistemas de tracción eléctrica es una necesidad de los países en desarrollo, pero el coste de la infraestructura sigue siendo una de las principales barreras para estos proyectos.

Los argumentos presentados en esta vigilancia tecnológica se soportan en el Anexo 1, del que se extraen la ecuación de búsqueda realizada en Scopus, una de las bases de datos con mayor reconocimiento y uso para resúmenes y citas de material científico, como puede observarse en la Figura 2; un resumen en el que se presentan las publicaciones por país por año, por filiación y por autor, el cual se ilustra en la Figura 3 y un listado de algunas de las publicaciones (*Papers*) más relevantes, el cual se presenta en la Tabla 2.

The image shows the Scopus search interface. At the top, there is a navigation bar with 'Search | Alerts | My list | Settings' on the left and 'Luis Castrillón | Logout' on the right. Below this is a banner for 'Scopus releases updated analytical features, read more on the blog.' The main search area is titled 'Document search' and includes several search fields: 'Energy storage', 'saving energy', 'railway or train or tram or subway', and 'supercap or ultracap or edic or dou'. Each field is followed by a dropdown menu set to 'All Fields'. There are also options for 'AND' and 'Add search field'. Below the search fields, there are filters for 'Limit to:', 'Date Range (inclusive)' (set to 'Published All years to Present'), 'Document Type' (set to 'ALL'), and 'Subject Areas' (with checkboxes for Life Sciences, Health Sciences, Physical Sciences, and Social Sciences & Humanities). A 'Resources' sidebar on the right contains links for following Scopus on Twitter, accessing Scopus videos, and learning about alerts and registration.

Figura 2. Ecuación de búsqueda referentes técnicos metodologías de planificación



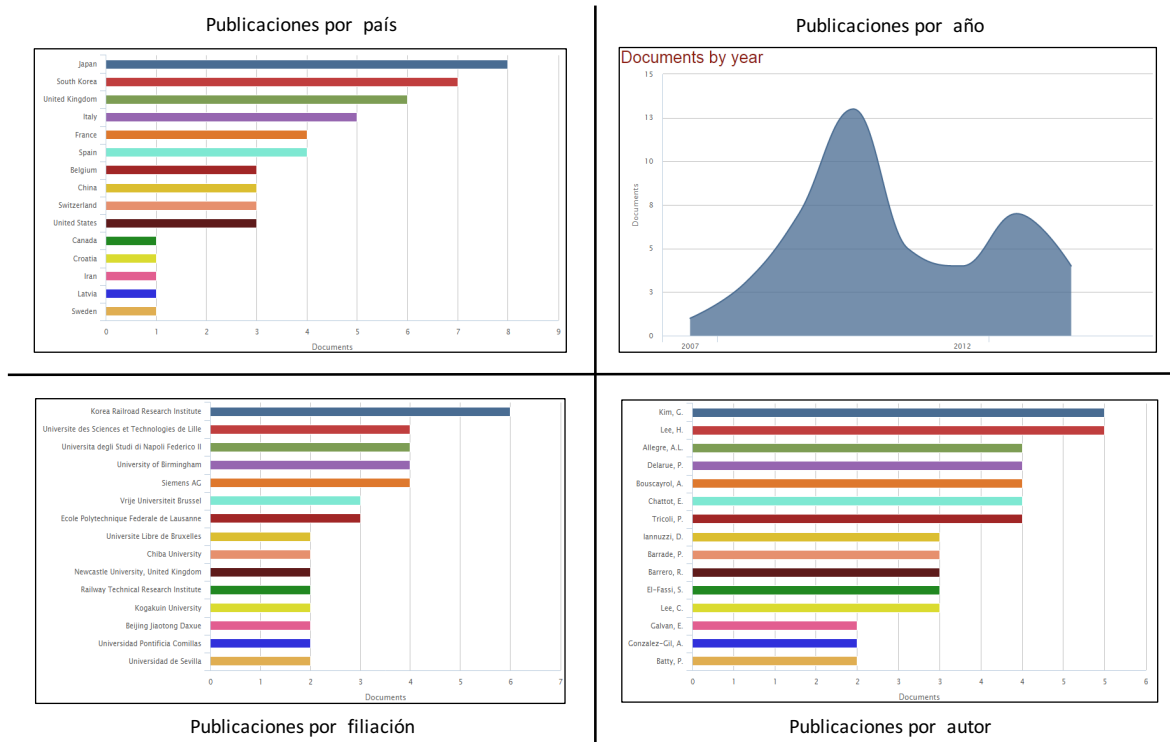


Figura 3. Resumen de publicaciones basada en la búsqueda realizada en Scopus

Tabla 2. Publicaciones relevantes

Referencia	Autor	Título
Int. Symp. Power Electron. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion, pp. 1172–1177, 2012	L. Battistelli, M. Fantauzzi, D. Iannuzzi, and D. Lauria	"Energy management of electrified mass transit systems with Energy Storage devices"
ANAE Assoc. Naz. Azionamenti Elettr. ..., 2003.	P. Barrade	"Energy storage and applications with supercapacitors"
2008 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion, pp. 1027–1032, Jun. 2008.	A. Capasso, M. C. Falvo, U. Grasselli, R. Lamedica, R. Bartoni, M. Francisi, and G. Maranzano	"A planning study on power systems of metro-transit transportation system"
Electr. Syst. Aircraft Railw. Sh. Propuls, pp. 1–7, Oct. 2010.+	S. D'Avanzo, D. Iannuzzi, F. Murolo, R. Rizzo, and P. Tricoli	"A sample application of supercapacitor storage systems for suburban transit"
... (ISIE) 2010 IEEE ... no. 2, pp. 2493–2498, 2010.	X. del T. García	"Ultracapacitor-based storage: Modelling power conversion and energy considerations"
Int. J. Railw., vol. 5, no. 3, pp. 124–128, Sep. 2012.	H. Lee, G. Kim, C. Lee, and E. Joung	"Field Tests of DC 1500 V Stationary Energy Storage System"
Pulsed Power Conf. 2005 IEEE, pp. 1337–1340, 2005.	J. Locker and T. Wolfe	"Development of an Ultracapacitor-Based Intermediate Energy Storage System"
SPEEDAM 2010 - Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives,	D. Iannuzzi and P. Tricoli	"Metro trains equipped onboard with supercapacitors: A control technique for

Autom. Motion, pp. 750–756,  
2010.

energy saving"

---

no. Iccas, pp. 519–522, 2013.	H. Lee, G. Kim, C. Lee, and H. Park	"A Study on Saving Effects of Energy Regenerated from Electric Train"
IEEE Conf. Publ., pp. 583–589, 2009.	H. Hõimoja, D. Vinnikov, and T. Jalakas	"Analysis and Design of Ultracapacitor-Boosted Back-Up Power Supply for Tramcars"
Damascus Univ. J., vol. 30, no. JANUARY 2014	Y. Diab,	"Evaluating Performance and Reliability of Storage System with Supercapacitors : Application in Trolleybuses"
IEEE Conf. Publ., pp. 1546–1552, 2013.	F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, and I. Spina	"Comparison of Energy Management Control Strategy based on Wayside ESS for LRV application"
IEEE Conf. Publ., pp. 2680–2685, 2015.	V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber, and A. Piccolo	"Optimal Siting and Sizing of Stationary Supercapacitors in a Metro Network using PSO"

---

## **CAPÍTULO 2**

### **METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA PERTINENCIA TÉCNICA Y FINANCIERA DEL USO DE ESQUEMAS DE COMPENSACIÓN EN CORRIENTE DIRECTA, BASADOS EN ULTRACAPACITORES, EN SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO**

En la Figura 4 se ilustra la metodología para la evaluación técnica y financiera de esquemas de compensación cd, basados en ultracapacitores, para sistemas de transporte eléctrico, la cual plantea de manera general los estudios que se deben realizar, a fin de conocer la viabilidad de implementación de este tipo de tecnología. A continuación se realiza una descripción general de la metodología.

#### **2.1 PLAN INICIAL**

El plan inicial hace referencia al diseño con el que inicia la operación la red de suministro de energía, para el que se debe prever las reservas, que desde el punto de vista técnico y económico, sean pertinentes en consideración al futuro plan de expansión del sistema de transporte, de tal manera que las inversiones y el flujo de caja de la empresa se optimicen en el tiempo. Es un resultado del planeamiento clásico de la infraestructura para la alimentación de sistemas de tracción eléctrica.

La propuesta es que el diseño inicial considere la inclusión de esquemas de compensación en los casos en que la proyección de crecimiento del sistema ofrezca oportunidades para la optimización de infraestructura, aprovechando las características de los sistemas de compensación, postergando inversiones de capital en infraestructura como subestaciones, acoples de línea u otros equipos necesarios para el suministro de energía, con el consecuente beneficio económico que esto conlleva.

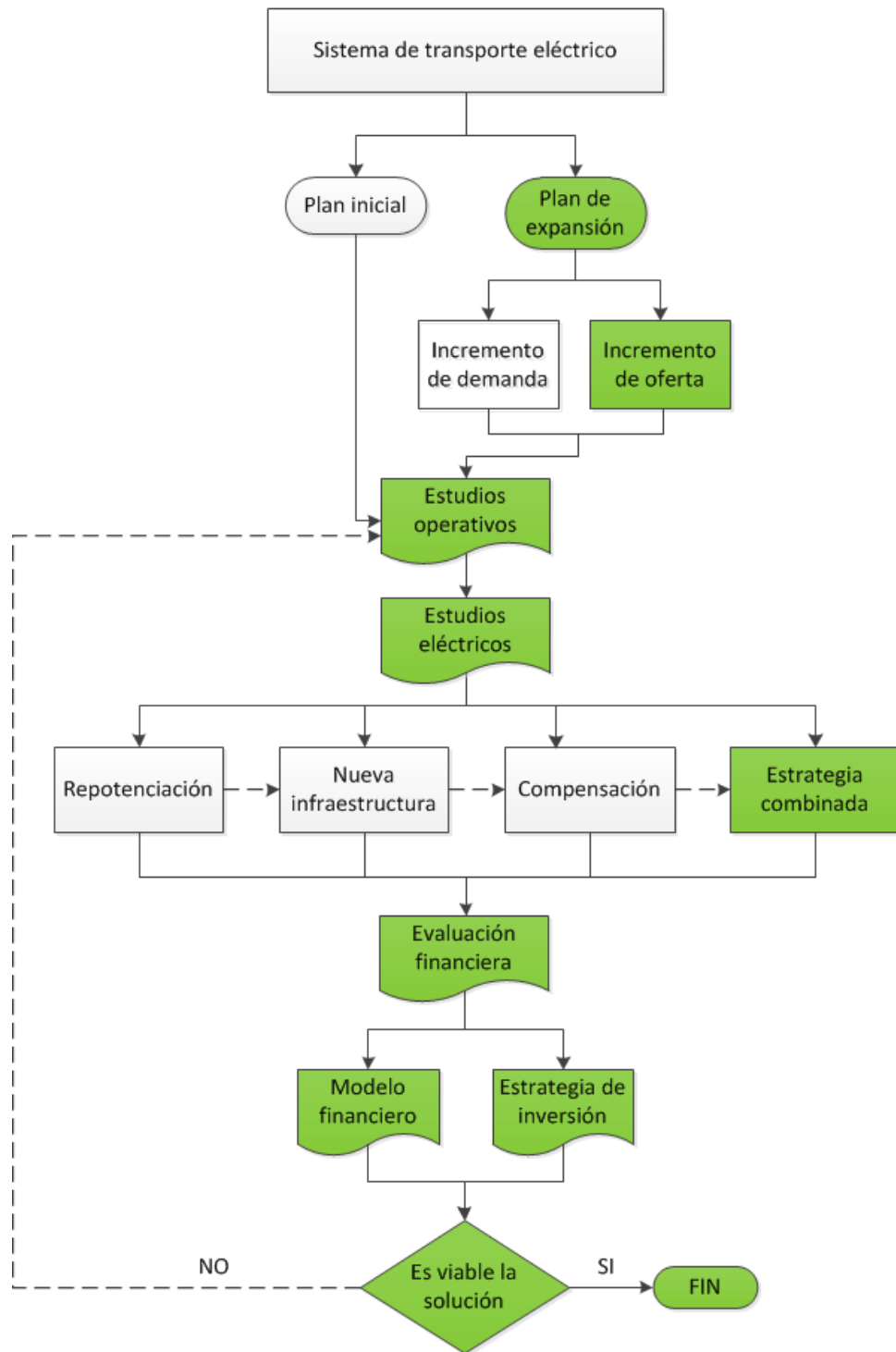


Figura 4. Metodología para la evaluación técnica y financiera de esquemas de compensación cd, basados en ultracapacitores, en sistemas de transporte eléctrico

En síntesis los sistemas de compensación permiten estrategias de inversión que favorecen financieramente el proyecto en su vida útil, en función del crecimiento de la demanda y de la oferta.

## **2.2 PLAN DE EXPANSIÓN**

El incremento de la demanda y el incremento de la oferta son las variables que permiten establecer las necesidades de nueva flota, expansión de cobertura e integración de otros modos que a futuro requiera el sistema de transporte, lo que influye directamente sobre la capacidad del sistema de suministro de energía y por tanto en los costos del sistema.

Muchas de las variables que determinan el crecimiento de la oferta y la demanda son ajenas al operador del sistema de transporte, dependiendo de la dinámica de la ciudad o región de influencia del sistema y de las políticas de la misma. Discrepancias entre lo proyectado y lo que ocurre en la realidad pueden llevar a una sobre o sub instalación del sistema de suministro de energía, con las pérdidas económicas que esto implica.

Igual que en el diseño inicial, todo plan de expansión debe considerar la inclusión de sistemas de compensación ajustados a las necesidades de la operación del sistema de transporte y en la configuración que desde el punto de vista técnico y económico sea la más apropiada para la empresa. Esto permite una flexibilidad para adaptar el sistema a las cambiantes necesidades de la ciudad a un menor costo.

### **2.2.1 Incremento de la demanda**

El crecimiento de las ciudades tanto en población como en extensión, obliga el crecimiento de los sistemas de transporte y por ende de los sistemas de suministro de energía. Es por esto importante anticipar o proyectar el incremento de la demanda con el fin de prever las necesidad adicionales sobre el suministro de energía.

### **2.2.2 Incremento de la oferta**

El incremento de la oferta es una consecuencia natural del incremento de la demanda y supone cambios en la estrategia de operación y aumento de la cantidad de vehículos, en cuyo caso, como se ha venido mencionando, debe estudiarse las consecuencias sobre el sistema de suministro de energía. Otra forma de incremento de la oferta corresponde a decisiones gubernamentales, por las cuales a través de la inclusión de un medio de transporte se busca un impacto social y urbanístico, como por ejemplo, la re densificación o renovación urbana de un sector deprimido de la ciudad. Un buen ejemplo de esto son los cables aéreos de la ciudad de Medellín [32].

## **2.3 ESTUDIOS OPERATIVOS**

Tanto en el plan inicial como en el plan de expansión es indispensable conocer la demanda del sistema de transporte y su evolución, para lo cual es usual realizar estudios tales como origen – destino, estudios de carga, proyecciones de demanda y conocer el plan de urbanización de la ciudad. Con dicha información es posible determinar la capacidad requerida por los diferentes modos de transporte y la reserva óptima para su crecimiento. Lo anterior es válido en los rangos de incertidumbre ya mencionados.

## **2.4 ESTUDIOS ELÉCTRICOS**

El diseño debe estar acompañado de estudios eléctricos tales como el flujo de cargas, la coordinación de protecciones, la coordinación de aislamiento, estudio de tierras y todos aquellos estudios que las normas aplicables demanden para obtener un diseño adecuado. Generalmente estos estudios están soportados por modelos computacionales, como lo recomienda muchos de los estándares IEC. Estos estudios permiten a la empresa de transporte determinar las necesidades de suministro de energía en el diseño inicial y en la futura expansión del sistema; ahora incluyendo la participación de los esquemas de compensación para flexibilizar la expansión.

Dependiendo de los resultados de los estudios eléctricos, en un momento dado de la vida del sistema, pueden resultar necesarias las acciones que se presentan a continuación. El momento de efectuar modificaciones en el sistema de alimentación, obedece a cambios que se presenten tanto en la oferta como en la demanda y va precedido de un monitoreo de las variables eléctricas en los equipos que se verían afectados con la modificación.

#### **2.4.1 Repotenciación**

Es una solución aplicable en los planes de expansión de un sistema de transporte, que de acuerdo con los estudios eléctricos permite determinar los puntos específicos del sistema de suministro que deben ser intervenidos para adaptar la infraestructura. En general no se requiere de nuevos equipos, basta con aumentar la capacidad puntual del sistema para satisfacer las nuevas necesidades operativas. Usualmente una repotenciación supone el incremento de las especificaciones de los equipos existentes sin adicionar nuevos equipos o infraestructura.

#### **2.4.2 Nueva infraestructura**

Teniendo en cuenta la obviedad de que para iniciar un sistema de transporte toda la infraestructura es nueva, este elemento cobra relevancia cuando se trata de la expansión de un sistema existente. Es probable que la entrada en operación de nueva flota de vehículos o la expansión de cobertura implique nueva infraestructura y equipos, de manera que soporten la nueva condición operativa del sistema.

#### **2.4.3 Compensación**

Los sistemas de compensación de cd basados en ultracapacitores, como quedó demostrado con el prototipo desarrollado, se presentan como una alternativa que debe ser tomada en cuenta tanto en el diseño inicial como en los planes de expansión de cualquier sistema de transporte eléctrico. Este tipo de sistema permite garantizar el nivel

de tensión dentro del rango operativo (UNE-EN 50163) y la potencia requerida para aportar tanto a la tracción de los vehículos como a los servicios auxiliares de los mismos.

#### **2.4.4 Estrategia combinada**

Esta estrategia plantea la alternativa de combinar repotenciación con esquemas de compensación o nueva infraestructura con compensadores, en cuyo caso los estudios eléctricos deben aportar la información detallada para configurar adecuadamente el sistema de suministro de energía de tal manera que se garantice la confiabilidad operativa y la seguridad de los equipos y del sistema de transporte.

### **2.5 EVALUACIÓN FINANCIERA**

Para esta evaluación se hace uso de los modelos financieros clásicos, para determinar el valor presente neto (VPN) o el costo anual equivalente (CAE), de tal manera que se pueda seleccionar la mejora alternativa técnica y económica.

Finalmente, conocida la mejor alternativa técnica y económica la empresa puede definir la estrategia de inversión que más le convenga. Como ya se había mencionado, una subestación de tracción tiene un costo aproximado a los USD 3.000.000, mientras que un sistema de compensación con la capacidad para ampliar la cobertura del sistema, aproximadamente 5 km [33], tiene un costo en el mercado cercano al USD 1.000.000, lo que haría posible postergar la inversión en la subestación y facilitar el manejo del flujo de caja de la empresa de transporte, con los consecuentes beneficios financieros que esto representa.



## **CAPÍTULO 3**

### **IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL CASO DEL METRO DE MEDELLÍN**

A continuación se detalla el proceso metodológico para el caso del Metro de Medellín, para el que se sigue el flujo de trabajo resaltado en color verde en el flujograma de la Figura 4.

#### **3.1 PLAN DE EXPANSIÓN**

En la Figura 5 se observa como el Metro de Medellín en su Plan Maestro 2006 – 2030, planea la expansión del sistema en los diferentes corredores de transporte identificados. Dicho plan se observa hasta el mediano plazo (color marrón), en el que se propone la Extensión de la Línea A al Norte (10), la cual constituye un incremento de la oferta del sistema de transporte y el foco de interés para implementar la metodología propuesta en este trabajo de grado. Sin embargo, se tratará, de manera tangencial el incremento de la demanda, teniendo en cuenta la demanda actual de usuarios que ha motivado la compra de trenes adicionales.

# PLAN MAESTRO 2006 – 2030

## Confianza en el futuro

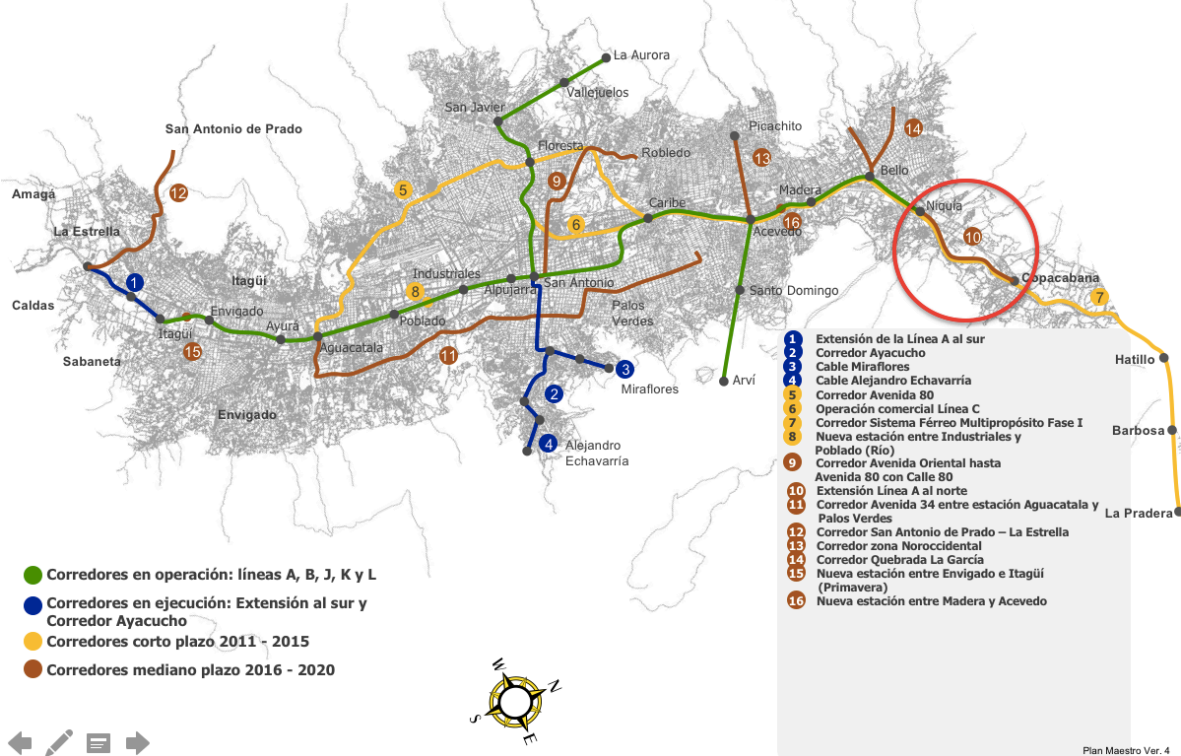


Figura 5. Plan Maestro 2006 – 2030 Metro de Medellín

### 3.1.1 Incremento de demanda

El incremento de la demanda ha motivado la compra de 20 trenes adicionales a los 58 en operación al día de hoy en el Metro de Medellín, los cuales iniciarán su entrada en operación a finales de 2016. Una mayor cantidad de trenes implica una mayor probabilidad de coincidencia entre arranques de los mismos, pues habrá más trenes en la misma sección eléctrica y por tanto son esperables huecos de tensión con mayor profundidad (*Sags*) en la red de alimentación.

Cuando dichos huecos de tensión son de mayor profundidad al 30% establecido en la norma UNE-EN 50163, 1050 V en el caso del Metro de Medellín, se pone en riesgo el funcionamiento de los equipos y por ende la operatividad de los trenes. Sin embargo,

como pudo comprobarse con el prototipo instalado, la acción del compensador ayuda a disminuir dichos huecos, lo que se explica de manera gráfica en la Figura 6, cuyos datos corresponden a mediciones reales tomadas en la estación Niquía, cola de circuito, durante la operación comercial del Metro de Medellín, tanto con el compensador como sin él.

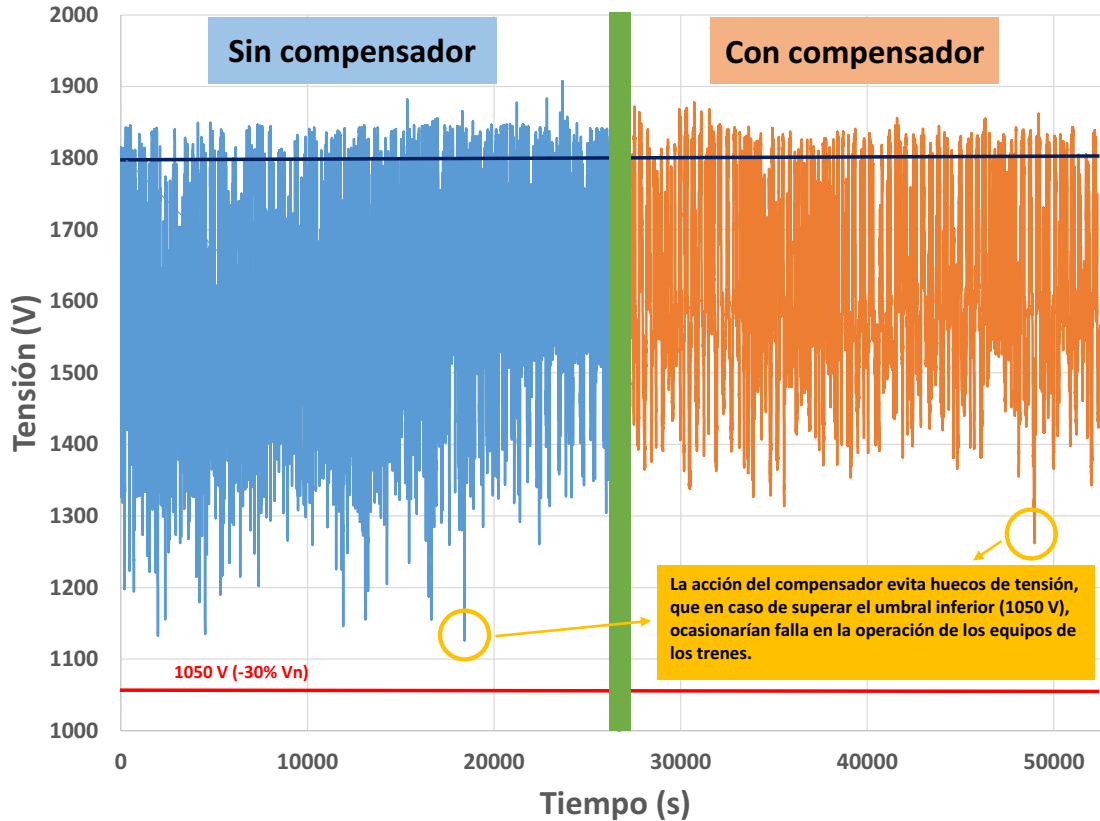


Figura 6. Tensión en la red de alimentación del Metro de Medellín sin y con compensador

Como se puede apreciar en la figura y suponiendo que el umbral de baja tensión fuera 1200 V y no 1050 V, como establece la norma, en un período de 8 h habría 12 huecos de tensión, que como ya se había mencionado ponen en riesgo la operación del sistema de transporte.

Estos resultados permiten validar los que se obtienen mediante simulación (*PSCAD*) con el modelo desarrollado en [3]–[5], como se detalló en la introducción de este trabajo. En la

Figura 7 se presenta el caso simulado, en el que la SET se encuentra a 2,5 km de la cola del circuito o final de línea, igual a la distancia que hay entre la SET Bello/Patio y el retorno de Niquía; en la cola del circuito se instala una sistema de compensación de 4 kWh, al cual se denomina subestación de ultracapacitores (SEU); en este tramo se encuentran 4 trenes arrancando simultáneamente, lo que equivaldría a duplicar la flota en el caso del Metro de Medellín, dado que en las condiciones actuales, en la hora pico, hay 2 tren en 2,3 km de vía. La SEU entra en operación 150 s después de iniciada la simulación.

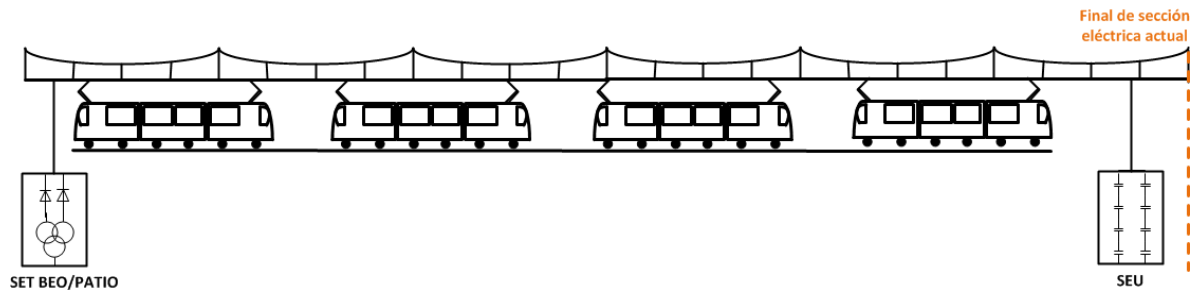
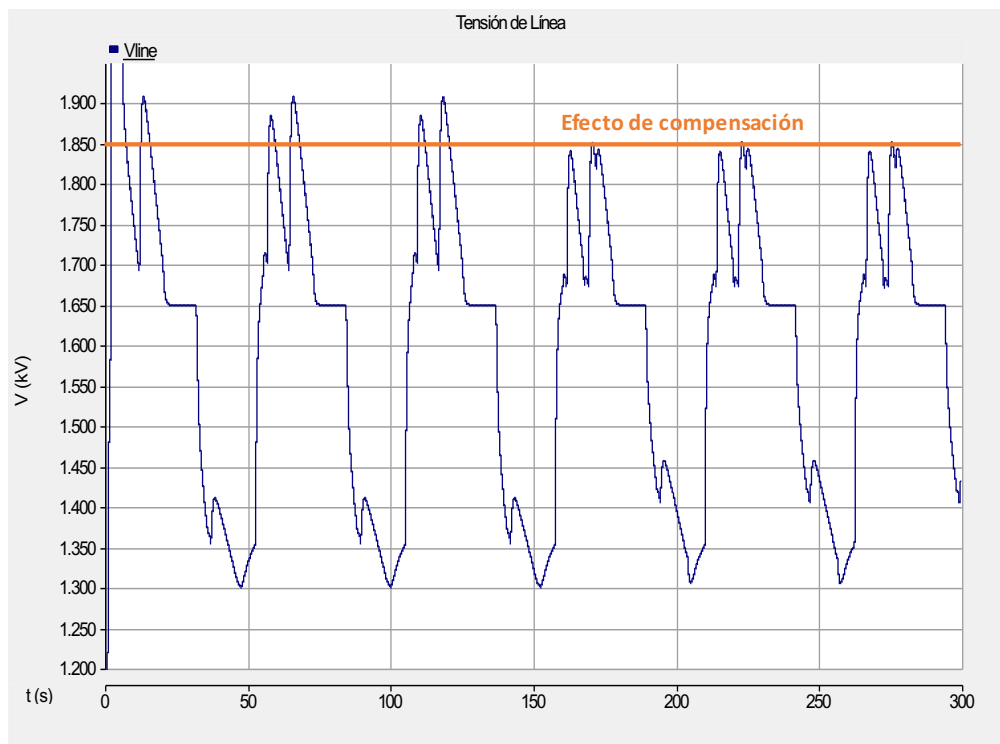


Figura 7. Topología simulación incremento de flota

Corrida la simulación se obtuvieron los resultados que se ilustran en el gráfico de la Figura 8. La línea de color azul representa el perfil de tensión medido en la catenaria en el tramo en cuestión. Para efectos de análisis no se consideran los primeros 50 s, debido a que el inicio de la simulación arroja valores que muestran inestabilidad de la misma. Entre los 50 s y los 150 s, el perfil de tensión permite observar como al frenar los trenes se superan los 1800 V y al acelerar la tensión cae hasta 1350 V, valores que según la norma UNE EN 50163 se encuentran en el rango permisible de operación, para un sistema con tensión nominal de 1500 Vcd, como es el caso del Metro de Medellín.



**Figura 8. Perfil de tensión en la catenaria con y sin compensación, caso incremento de flota**

Después de los 150 s se aprecia el efecto del compensador en el circuito, la tensión nunca supera los 1800 V durante el frenado de los trenes y se mantiene en 1350 V durante el arranque de los mismos. Es importante aclarar que la simulación no considera frenado disipativo en los trenes, motivo por el cual la tensión supera los 1850 V, lo que a su vez permite apreciar la influencia del compensador en la red de suministro.

Este trabajo contribuye con mayor énfasis en el estudio del caso de expansión de cobertura. Sin embargo, el ejemplo presentado a partir de la medida real efectuada con el compensador, muestra como en el punto de instalación del compensador (SEP Niquía) sería posible la operación de más trenes sin problemas de regulación de tensión, con ahorros energéticos por añadidura y evitando la inversión que implicaría una repotenciación o una SET adicional.

El prototipo instalado en el Metro de Medellín, tuvo su primera fase de implementación y pruebas en la SET Bello/Patio; por tratarse de un barraje contiguo al rectificador, la conexión del dispositivo en este punto, tiene solo efectos para el caso de mejorar la operación del sistema ante un incremento de flota. En este punto no se presentan problemas de regulación de tensión, pues se trata de una de las fuentes del sistema, sin embargo, durante las pruebas se pudo constatar la forma en que el compensador ubicado en este punto disminuye las contribuciones desde los rectificadores para el arranque de los trenes y nuevamente se da el efecto de ahorro energético.

La situación descrita se ilustra en el gráfico que se presenta en la Figura 9, en el cual se evidencia la contribución del compensador ayudando a que el aporte en corriente desde los rectificadores en el momento de los arranques sea menor. La curva azul es la corriente que se aporta desde el compensador al sistema y por tanto es corriente que evita enviarse desde el rectificador, el transformador de rectificación y los alimentadores de media tensión. Nótese que el principio del menor transporte de la energía redonda en menores pérdidas tanto en los rectificadores como en los transformadores y en las líneas de media tensión.

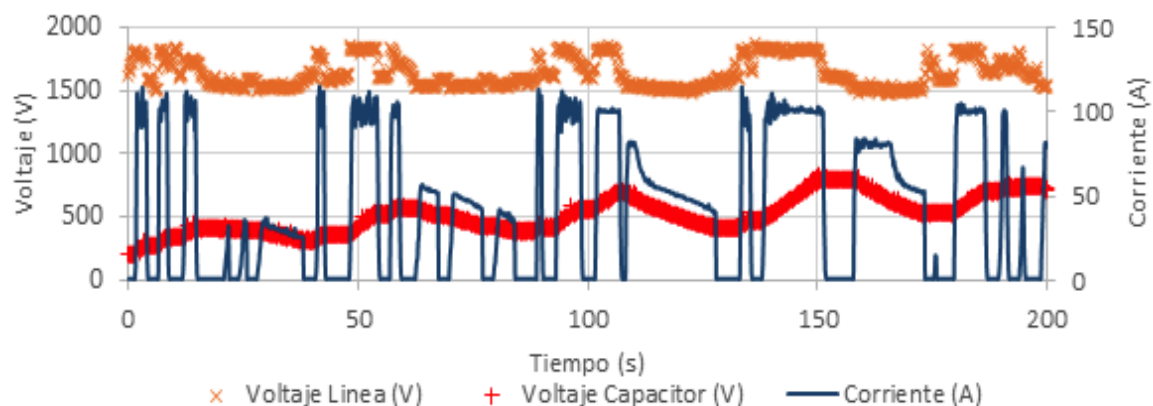


Figura 9. Contribución del compensador en barraje SET Bello/Patio

En consecuencia se valida el efecto de compensación en la red de suministro a partir de la simulación, lo que le da credibilidad al modelo desarrollado en [3]–[5] para su utilización en las diferentes situaciones que se analizarán en lo concerniente al incremento de oferta, que como se había mencionado traza la línea para la implementación de la metodología en el caso del Metro de Medellín.

Queda claro entonces que conocida la cantidad de trenes adicionales, es posible mediante estudios eléctricos y operativos, caracterizar la red de suministro de energía y determinar los puntos débiles de la misma, facilitando a su vez seleccionar la solución más apropiada, entre las que se debe considerar la inclusión de esquemas de compensación, los cuales, como se ha enfatizado en este trabajo de grado, redundan en la eficiencia energética del sistema de transporte.

La simulación y las pruebas realizadas con el sistema de compensación evidencian la posibilidad de incrementar la demanda, mediante la inclusión de trenes adicionales en la operación. La operación en condiciones degradadas, en el caso por ejemplo de la salida de operación de una SET o incluso en el evento de incremento de oferta, pues este caso se asimila al uso del compensador en la cola del circuito, caso extensión de línea, el cual se tratará más adelante. En dicho caso el compensador ayuda a mantener la regulación de tensión dentro de los límites permitidos por la norma UNE EN 50163.

### **3.1.2 Incremento de la oferta**

En el caso particular del Metro de Medellín se estudiará el proyecto consistente en la prolongación de la línea férrea hacia el norte del Valle de Aburrá denominado Extensión al Norte, el cual constituye una expansión de cobertura o incremento de oferta del sistema de transporte.

La Extensión al Norte resulta propicia para implementar y validar la metodología propuesta en este trabajo de grado y concretar su posibilidad de aplicación en cualquier explotación de este tipo, toda vez que una extensión de línea como la proyectada en el Metro de Medellín incrementaría no menos de 7 km la distancia a la cola de los circuitos eléctricos desde la SET más cercana, lo que evidentemente conlleva problemas de regulación de tensión que no permitirían la operación del sistema (UNE-EN 50163), siendo necesario incrementar la capacidad instalada para atender la demanda de energía de los trenes. Este es otro aspecto en que es importante estudiar la inclusión de esquemas de compensación en la red de suministro.

### 3.2 ESTUDIOS OPERATIVOS ASOCIADOS A LA EXPANSIÓN DE COBERTURA

El Metro de Medellín cuenta con un un Plan Maestro y con estudios de apoyo de la ciudad, tales como, el Plan de Desarrollo [34], el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) [35], Estudios Sectoriales tales como [36][37][38][39][40][41] y el Plan Maestro de Movilidad [42], con base en los cuales da inicio a los estudios que se requieren para sustentar este tipo de proyectos. La Figura 10 detalla los estudios de soporte, que realiza el Metro de Medellín, en los análisis de pre factibilidad y factibilidad de los proyectos.

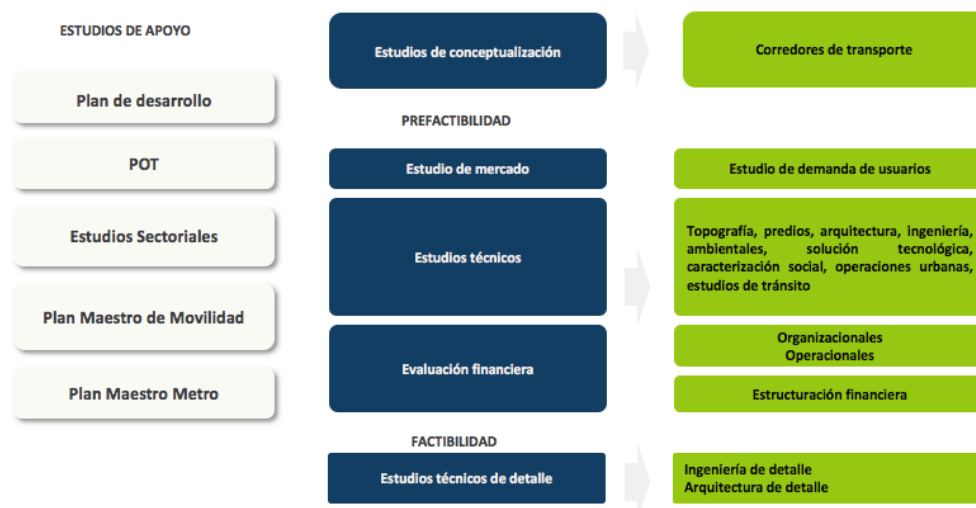


Figura 10. Estudios para proyectos, Metro de Medellín.



Estudios a nivel de pre factibilidad para la Extensión al Norte, plantean 4,15 km adicionales de vía férrea, 2-3 estaciones más y la operación con hasta 3 trenes para satisfacer la demanda esperada hacia 2020, como se aprecia en la Tabla 3.

**Tabla 3. Características Corredor Extensión Línea A al Norte**

<b>Características del trazado</b>	
Longitud del trazado (km)	4,15 a 5 km
Ancho de vía (mm)	1.435
Velocidad máxima del tren (km/h)	80
Longitud del andén en estación (m)	142
<b>Material móvil</b>	
Tecnología prevista	Metro
<b>Estimación de viajes</b>	
Estimación de viajes de la zona de influencia del corredor (Pax/día) (2015)	76.079
Estimación de viajes de la zona de influencia del corredor (Pax/día) (2020)	88.713
<b>Infraestructura fija</b>	
Número de estaciones	2 - 3
Distancia promedio entre estaciones (km)	1.5 a 2
Velocidad comercial promedio (km/h)	38
Modos alternos	Copacabana Autopista, Candó, Copacabana por Machado, Doble Calzada Bello - Hatillo
Número de vehículos requeridos aprox	3
<b>AREA DE INFLUENCIA</b>	
DIRECTA	Bello: Personas que se desplazan a municipios vecinos y sitios de diversión
	Copacabana: Cabecera municipal del municipio
INDIRECTA	Medellín
	Girardota
	Barbosa
	Resto del Valle de Aburrá
<b>POBLACIÓN ESTIMADA 2011</b>	
Copacabana	66.665
Girardota	49.381

COMPETENCIA ACTUAL DEL CORREDOR					
EMPRESA	RUTA	VEHÍC.	FRECUENCIA HORA PICO	VEL. COMERCIAL (km/h)	DEMANDA (ENTR. + SAL.)
Expreso Girardota	Girardota	Bus/Microbus	5	35 / 45	2.141
Expreso Girardota	Girardota Taxi	Taxi	3	60	786
Transportes Barbosa Porceso y Transmeba	Barbosa	Bus/Microbus	5	35 / 45	2.002
Coonatra	Copacabana - Autopista	Bus/Microbus	5	35 / 45	7.445
Coonatra	Candó	Bus	10	35	997
Coonatra	Copacabana por machado	Bus	5	35	3.629

Tomado de, Estudio de Pre factibilidad Extensión Línea A al Norte, Metro de Medellín 2012.

### 3.3 ESTUDIOS ELÉCTRICOS ASOCIADOS A LA EXPANSIÓN DE COBERTURA

Los resultados presentados en la Tabla 3 constituyen el insumo operativo en los estudios eléctricos que se tienen que realizar previo a la ejecución de las obras, con el fin de determinar las condiciones de la red y las implicaciones que tendría que asumir el proyecto para garantizar un suministro de energía acorde con las exigencias de la norma UNE EN 50163.

La Extensión al Norte que pretende realizar el Metro de Medellín evidentemente llevaría consigo problemas de regulación de tensión al sistema; el incremento de la impedancia equivalente de la red, proporcional a la distancia a la última SET, redundaría en el aumento de las fluctuaciones de tensión en una longitud de red que alcanzaría no menos de 7 km, contados desde el último punto de alimentación (SET Bello/Patio).

Dichos problemas de regulación de tensión hacen necesario un análisis del sistema de potencia. El diagrama de flujo de la Figura 11 muestra la metodología seguida para

establecer el estado y las necesidades del sistema de alimentación eléctrica del Metro de Medellín, la cual se detalla a continuación.

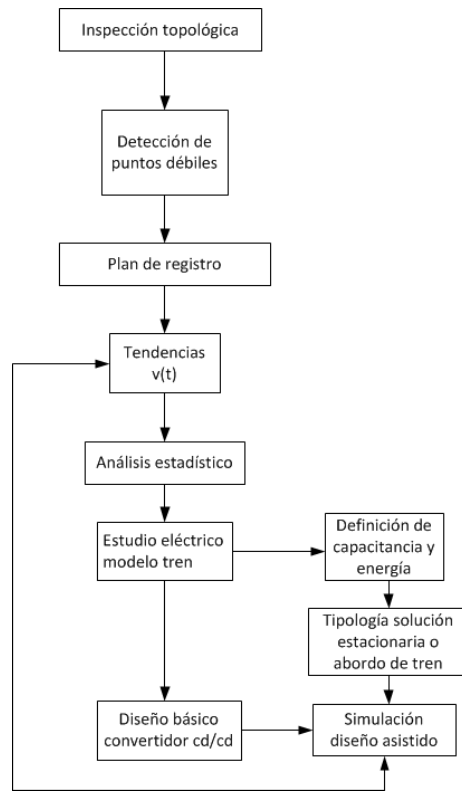


Figura 11. Metodología para establecer el estado y las necesidades del sistema de potencia

- **Inspección topológica**

Para focalizar el objeto de este estudio, es necesario observar en detalle la topología eléctrica del sistema del Metro de Medellín; cada sección de línea del Metro de Medellín tiene una alimentación en ca de 13,8 kV, rectificadas a 1,5 kV de cd, que para el caso de estudio alimentan 2 líneas aéreas de contacto (ascendente y descendente), ver la Figura 12 y la Figura 13. Adicionalmente, conocidas la frecuencia de operación de los trenes y las distancia entre las diferentes SET y entre los puntos de alimentación y las colas de circuitos, es posible establecer el estado y las necesidades del sistema de alimentación.

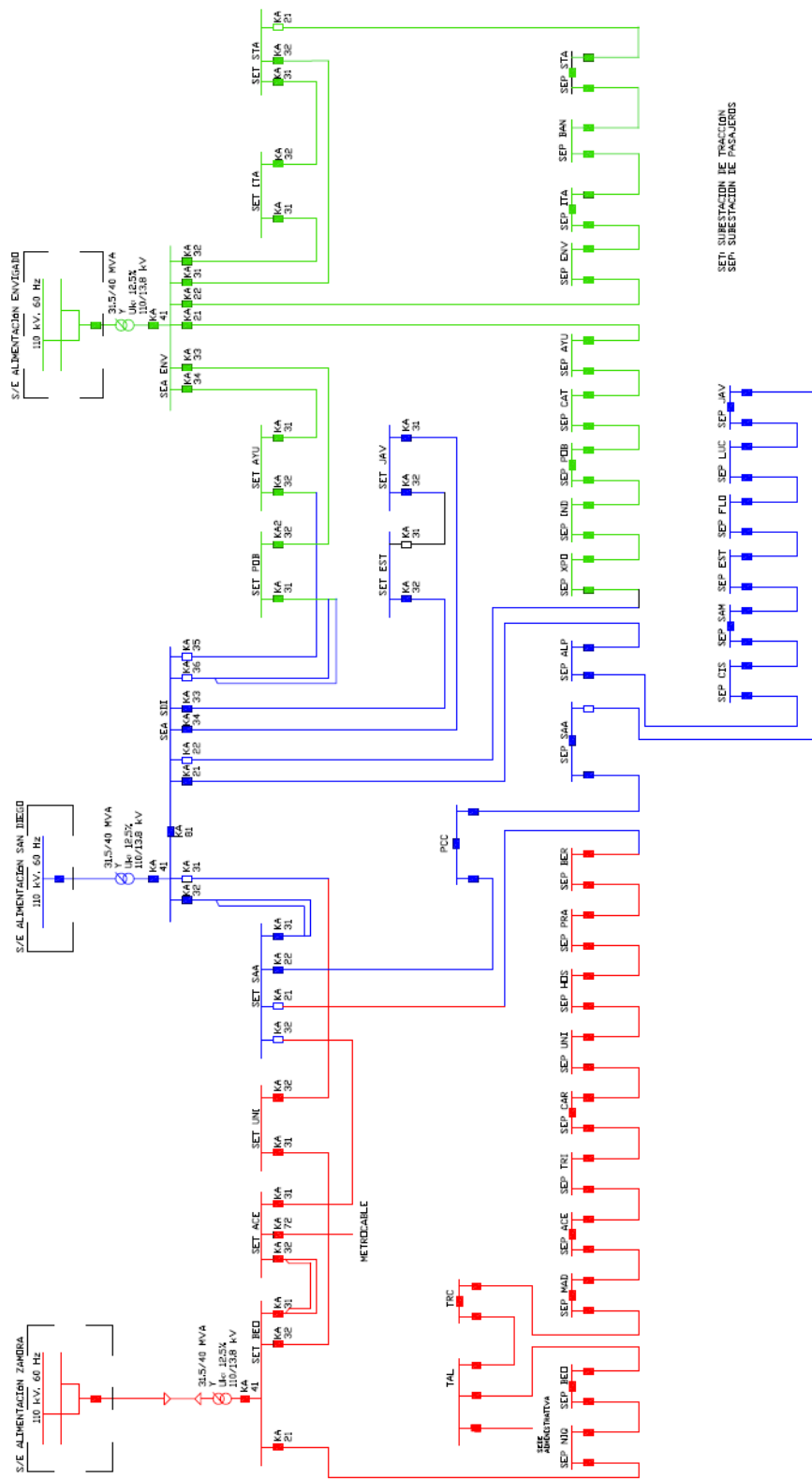


Figura 12. Diagrama unifilar 110 kV ca / 13,8 kV ca

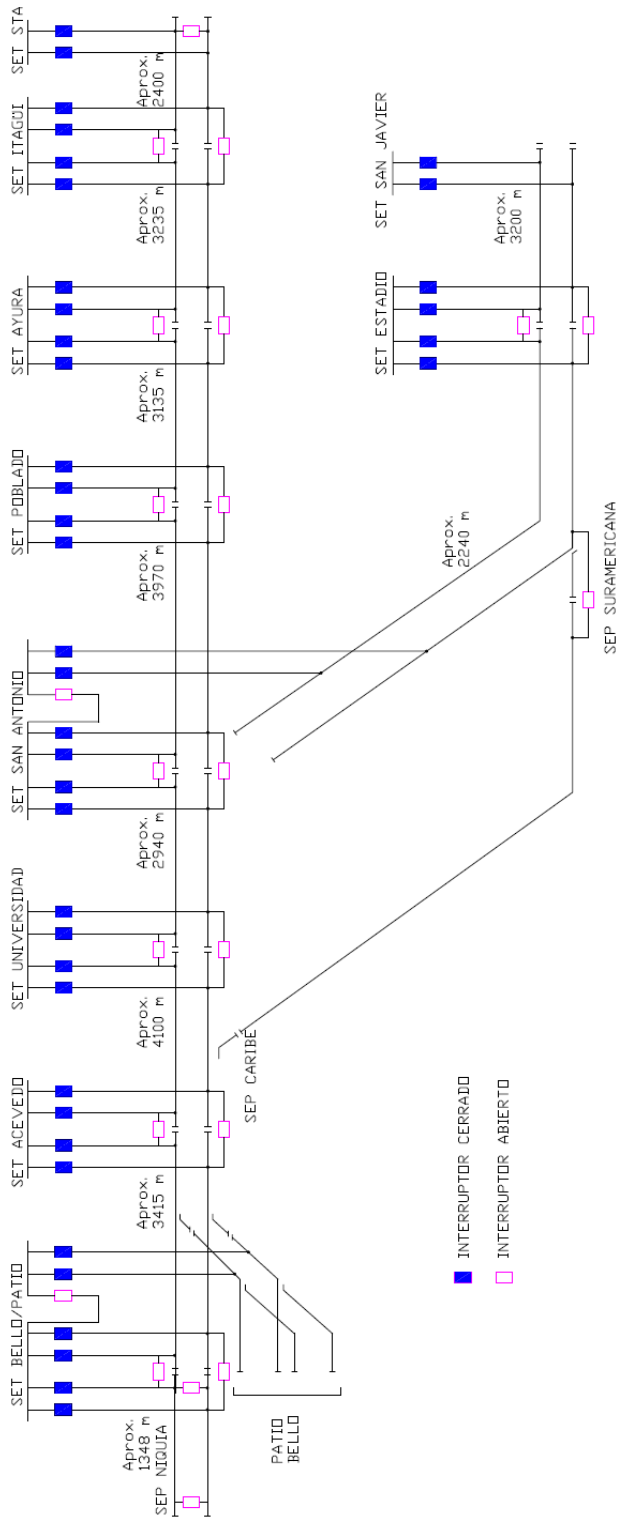


Figura 13. Diagrama unifilar 1500 V cd

- **Detección de puntos débiles**

Mediante un registro detallado de las variables eléctricas, teniendo especial cuidado en los perfiles de tensión, se detectan los puntos eléctricamente más débiles del sistema, generalmente ubicados en la “cola”, y la ubicación más apropiada del compensador. Los puntos débiles del sistema se evidencian en las caídas de tensión (*Sags*) durante el arranque de los trenes, como consecuencia de la mayor impedancia en la cola del circuito. La Extensión al Norte hace obvio el estudio de la cola del circuito en la estación Niquía, la cual se encuentra a 2500 m de la SET Bello/Patio y es importante conocer el comportamiento del perfil de tensión durante la operación del sistema para día típico laboral, sábado y domingo, esquemas operativos que por su experiencia ha identificado el Metro de Medellín, acorde con la demanda de usuarios.

A partir de la estación Niquía se pretende extender el sistema 4500 m, con 2 estaciones y 2 -3 trenes adicionales, lo que sumaría una distancia no menor a 7000 m desde la última fuente de alimentación, es decir, SET Bello/Patio, lo que evidencia un punto débil en la red de suministro de energía. Dicha situación se ilustra en la Figura 14.

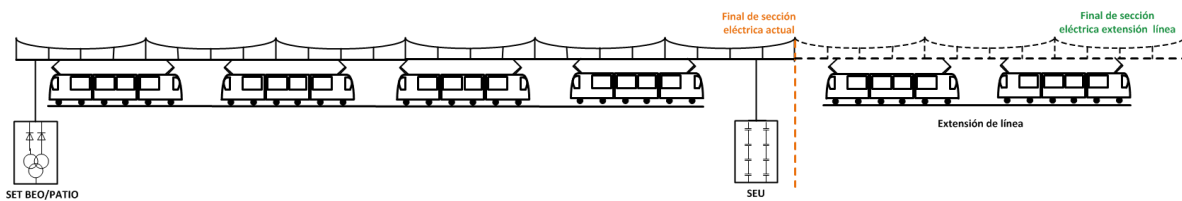


Figura 14. Esquema Extensión al Norte con la SEU en la cola de la sección eléctrica actual y 4,5 km de extensión

- **Plan de registro**

Inicialmente se realizó la medición de la energía disipada en las resistencias de frenado tanto de los trenes de primera generación (MAN) como de segunda generación (CAF) que tiene el Metro de Medellín, con el fin de determinar la energía disponible, en las condiciones actuales de operación.

Para la medición fue necesario instrumentación ambos tipos de trenes para medir las siguientes variables.

- Corriente de servicios auxiliares, es la que demanda el convertidor estático del tren para alimentar equipos como ventiladores, iluminación, cargador de baterías, entre otras.
- Tensión de Red, medida en la catenaria.
- Corriente de Red , la demandada por el tren.
- Tensión en las resistencias disipativas, es la que se aplica en las resistencias de disipación cuando no hay otro tren que se consuma la energía de regeneración.
- Corriente por las resistencias disipativas, es la que circula por las resistencias de disipación cuando no hay otro tren que se consuma la energía de regeneración.
- Tensión en las resistencias previas de frenado, es la que se aplica en todo momento durante el frenado de los trenes.
- Corriente por las resistencias previas de frenado, es la que circula por las resistencias de frenado durante el frenado de los trenes.
- Velocidad, del tren en todo instante de tiempo.
- Corriente por el grupo de motores 1
- Corriente por el grupo de motores 2
- Freno emergencia, se aplica por sobre velocidad durante la conducción del tren.
- Cabina ocupada, indica la cabina que tiene mando durante la conducción del tren.
- Freno neumático, indica la aplicación de este tipo de frenado en el tren.
- Potenciómetro del controlador maestro, indica la posición, marcha o freno, de la palanca de conducción del tren.

Ambos trenes circularon en alta explotación durante un mes. Diariamente se extrajeron los datos registrados con el fin de alimentar la base datos de mediciones.

## Equipos de medición

En la Tabla 4 se detallan los equipos de medición utilizados para la toma de datos en los trenes.

**Tabla 4. Descripción equipos para medición de variables eléctricas en los trenes**

Equipos para medición y registro de variables eléctricas en el tren	
Descripción	Imagen ilustrativa
<p>Graficador térmico de 16 canales, marca Graphtec, referencia WR30 Imagen tomada de <a href="http://www.graphteccorp.com/instruments/wr300/">http://www.graphteccorp.com/instruments/wr300/</a></p>	
<p>Sensor de tensión, marca LEM, 2000 V/20 mA Imagen tomada de <a href="http://www.lem.com/images/stories/images/model_images/LV_200_AW_2_Voltage.jpg">http://www.lem.com/images/stories/images/model_images/LV_200_AW_2_Voltage.jpg</a></p>	
<p>Sensor de corriente, marca LEM, referencia LT500/SP53 Imagen elaboración propia</p>	
<p>Computador portátil industrial, marca Panasonic Imagen tomada de <a href="http://demandware.edgesuite.net/aavr_prd/on/demandware.static/-/Library-Sites-panasonicB2BSharedLibrary/default/dw517ce7bf/business/toughbook/img/tb53-head-on-win.jpg">http://demandware.edgesuite.net/aavr_prd/on/demandware.static/-/Library-Sites-panasonicB2BSharedLibrary/default/dw517ce7bf/business/toughbook/img/tb53-head-on-win.jpg</a></p>	



## **Registros**

El software del registrador térmico permite migrar los datos a formato CSV, el cual a su vez permitió su procesamiento en Excel, de tal manera que se calculó la magnitud de las variables de interés.

Para finalizar, se instaló el mismo equipo de registro en la SET Bello/Patio (inicio de circuito) y en la SEP Niquía (cola del circuito) para medir la tensión en la catenaria. En el equipo solamente se configuraron dos canales para medir la tensión tanto en la vía ascendente como en la descendente en ambos puntos de medición.

- **Tendencias V(t)**

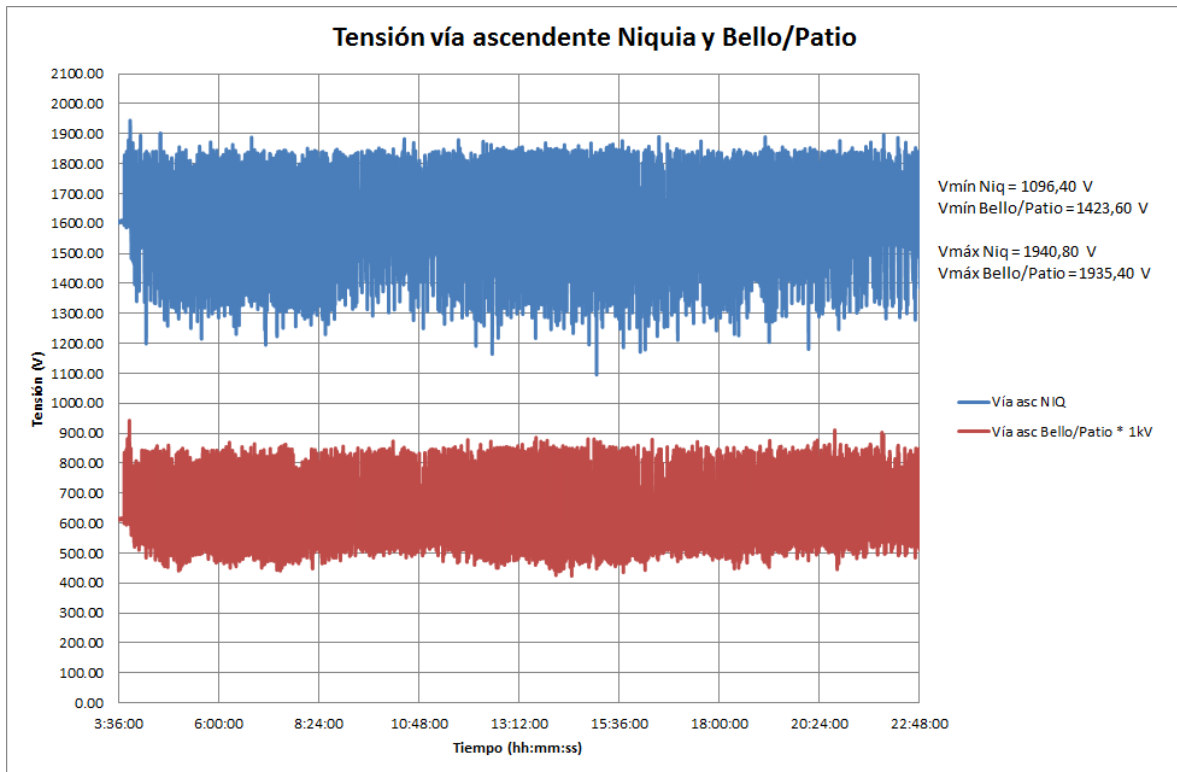
### **Medición en los trenes**

Mediante el procesamiento y análisis de los datos fue posible determinar una disipación de energía promedio de 1 kWh por cada frenado de un tren, o lo que es lo mismo, se pudo determinar la energía disponible para recuperar con el sistema de compensación. Sin embargo, partiendo de la ecuación básica de la energía acumulada por un cuerpo en movimiento  $E = \frac{1}{2} mv^2$  (donde  $m$ : masa y  $v$ : velocidad), se obtiene que la energía recuperable de un tren es de 4 kWh, dato que debe ser tenido en cuenta en la Extensión al Norte del sistema, con el fin de prever la capacidad de potencia del compensador.

### **Medición en la catenaria**

Teniendo en cuenta que el comportamiento del perfil de tensión durante todo el período de muestreo fue muy similar durante cada día de la semana, bastó con estudiar el comportamiento en días típicos laborales y festivos. La Figura 15 muestra el perfil de tensión obtenido para la línea ascendente, mostrando en azul el voltaje en la “cola” (Niquía) del sistema y en rojo el perfil visto desde el inicio de la sección eléctrica (SET Bello/Patio). Para efectos de presentar simultáneamente ambos perfiles, a las tensiones

en el barraje fuerte o de inicio, se les han restado 1000 V, lo que permite comparar con facilidad los dos perfiles en cada instante.



**Figura 15. Perfil de tensión medido en la catenaria en la vía ascendente al inicio y al final de la sección eléctrica**

Se observa que al final de la sección eléctrica (cola del circuito) se presenta una diferencia de tensión entre los valores máximo y mínimo de 844 V, mientras que al inicio de la sección eléctrica la diferencia es de 512 V. La mayor variación se presentó en la cola como era de esperarse. Es evidente la diferencia en amplitud de las bandas de oscilación que tiene la tensión en los dos puntos de medición.

- **Análisis estadístico**

La estadística tradicional ofrece la herramienta para establecer con precisión el umbral de tensiones, en la “cola” del sistema, en el que se presentan la mayoría de las fluctuaciones y la frecuencia de ocurrencia de las mismas. Se trata del histograma de frecuencias de la

tensión durante el período de muestreo, en un día típico de operación del sistema de transporte, caso Metro de Medellín.

A partir del histograma de la Figura 16 y sus datos se obtiene que el 53,62 % de los registros se encuentra en un rango de tensión entre 1450 V y 1600 V, el 13,13 % se encuentra por debajo de 1450 V, con un solo dato crítico en el rango de los 1100 V, y el 33,23 % por encima de 1650 V, con 2 datos críticos en el rango de los 1950 V. Esto indica que un compensador que se ajuste para operar en la banda de tensiones entre 1450 V y 1600 V, operaría la mitad del tiempo.

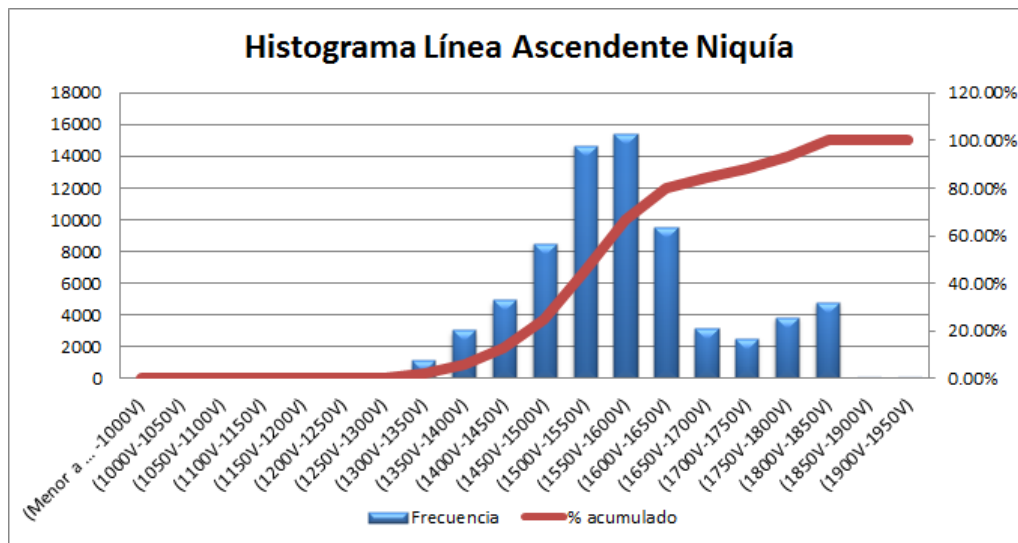


Figura 16. Histograma de frecuencia vía ascendente cola de circuito (Niquía) 1 día de operación

- **Modelo eléctrico del tren**

Como ya se había mencionado el modelo eléctrico del tren desarrollado en [3], [4] es la base fundamental de la simulación que se ha utilizado en el desarrollo de este proyecto. Dicho modelo se complementa con el trabajo desarrollado en [5], el cual permite además modelar el sistema de compensación, incluido el banco de ultracapacitores y la extensión de línea que se requiera.

- **Definición de capacitancia y energía**

Para la simulación se consideraron condiciones estándar de aceleración hasta llegar a la velocidad máxima (80 km/h) y desaceleración hasta llegar al paro total de 1 tren con carga promedio de pasajeros (150 T).

Con base en los estudios anteriores desarrollados por la Universidad y el Metro, se puede considerar que la energía potencialmente recuperable ( $E_r$ ) es el 40 % de la energía total cinética, que es lo que se almacenaría en el banco de condensadores, ver la Ecuación 1:

$$E_r \approx 4.1 \text{ kWh} \approx \frac{1}{2} m v^2 0.4 \approx \frac{1}{2} C V^2$$

**Ecuación 1. Cálculo de la energía recuperable por un tren**

Donde  $C$  es la capacitancia y  $V$  la tensión del condensador,  $m$  la masa del tren y  $v$  su velocidad. El factor de 0.4 usado como eficiencia de recuperación, fue obtenido después de descontar a la energía cinética, las pérdidas por arrastre aerodinámico, fricción, caja reductora y las pérdidas eléctricas en el sistema de tracción.

La condición ideal de almacenamiento se presenta cuando no hay un tren consumidor en la misma sección eléctrica, sin embargo, siempre es preferible que se dé la transferencia de tren a tren, sin que interceda el compensador. En los días festivos es común esta condición, que sirve para establecer el mayor tamaño práctico del compensador. Por el estudio del desempeño de los convertidores cd-cd referenciado en [43], se escoge una tensión de operación de 1000 V. De esta manera se obtuvo que el banco estimado de ultra capacitores necesario para almacenar esa cantidad de energía en la SEU es 8,

formado por una conexión serie de 8 módulos individuales, cada uno con capacitancia de 63 F, 125 V. El banco final queda con las características presentadas en la Tabla 5.

**Tabla 5. Especificación técnica banco ultracapacitores estimado**

Parámetro	Valor	Comentario
Voltaje	1000 V	Máximo voltaje del Banco de Ultracapacitores
Capacitancia	7,8 F	Capacitancia Total del Banco de Ultracapacitores
Resistencia Interna	48 mΩ	Resistencia Total del Banco de Ultracapacitores
Corriente	240 A	Corriente continua RMS máxima (DT=40º C)
Energía	1,08 kWh	Energía que puede almacenarse en el banco de ultracapacitores

- **Selección tipología de la solución: estacionario o abordo de tren**

Dependiendo de la topología de la red y de las consideraciones operativas, el sistema de compensación podría ser instalado a bordo de los vehículos o se instala en un punto estacionario del sistema de alimentación. A continuación se mencionan características generales que deben ser tenidas en cuenta en la selección de la solución más apropiada.

**Características generales solución estacionaria:**

- No requiere intervención en los vehículos
- Puede ser modular para la instalación en eventuales sitios debiles del sistema, por contingencias o mantenimiento.
- Se acomoda mejora a sistemas de alta intensidad y corta longitud de manera que aprovecha el efecto de varios trenes. El hecho de compensar la energía de varios trenes, hace que esta solución sea de mayor capacidad que una solución abordo de tren.
- En caso de falla se puede retirar facilmente del sistema, sin comprometer ningún vehículo.

### **Características generales solución abordo de tren:**

Apropiado en líneas de baja intensidad cuando se requiere que la compensación vaya acompañando al tren a medida que se desplaza en solitario a través de una ruta.

También es deseable cuando se busca que el vehículo pueda operar de manera autónoma en tramos específicos sin depender de la catenaria.

Sin embargo es recomendable que en cada caso en particular se efectúe un estudio del costo beneficio de una u otra posibilidad. En el caso del Metro de Medellín las características generales, daban indicaciones acerca de que una solución estacionaria es más apropiada por las siguientes razones.

Actualmente el sistema opera con alta intensidad, a frecuencias de 3,30 min y estaciones relativamente cerca, con un promedio entre estaciones de 1 km.

No se encontraba conveniente intervenir el sistema de tracción de los trenes para instalar la solución abordo, ni se presenta la necesidad de operar en tramos sin catenaria.

De todas maneras en convenio con la universidad de Kempten en Alemania, se realizó un trabajo de grado buscando confirmar las hipótesis planteadas anteriormente, este trabajo se referencia en [44].

Un resultado relevante de dicho trabajo se presenta la Figura 17, en la que se observa claramente como para cualquier escenario de ahorro de energía el punto de retorno de la inversión siempre es más rápido con la solución estacionaria.

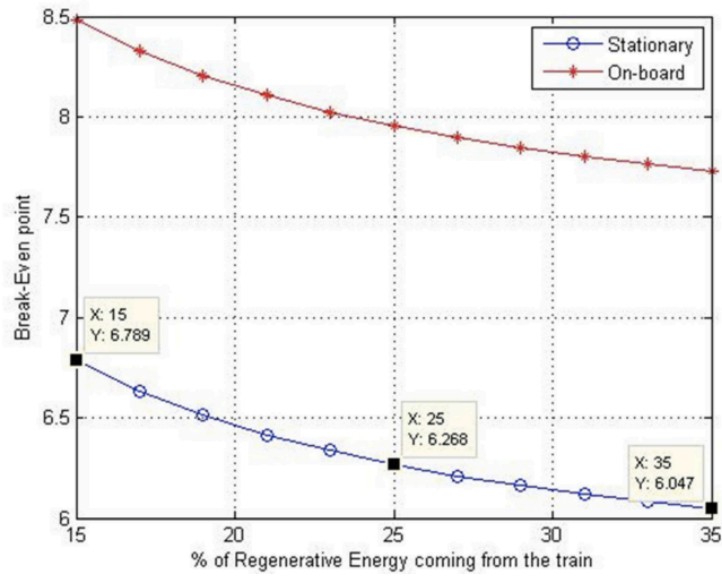


Figura 17. Porcentaje de recuperación de energía y punto de retorno [44]

De la misma manera ante diferentes escenarios de costo de energía el retorno de la inversión en más rápido con la solución estacionaria, como encontró el ingeniero Mohamed y presentó en la Figura 18.

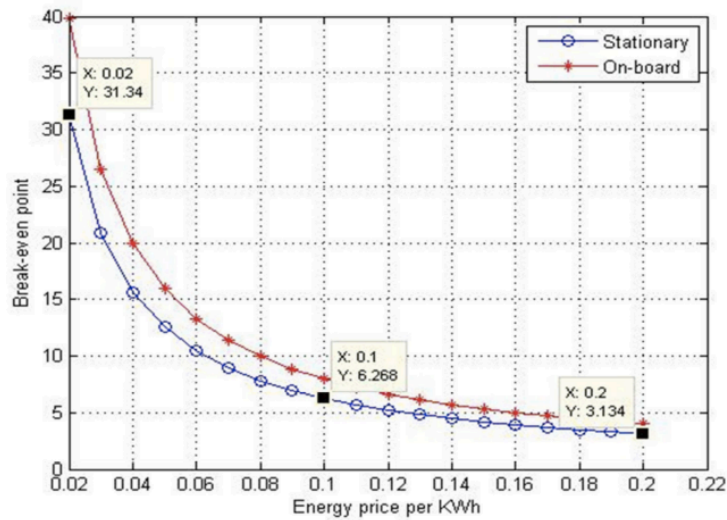


Figura 18. Relación entre el costo de la energía y el punto de retorno [44]

- **Diseño básico del convertidor**

Para conformar el prototipo de sistema de compensación se calculó y construyó un convertidor cd – cd bidireccional (Buck – Boost), con la topología que se observa en la Figura 19 y las características técnicas generales descritas en la Tabla 6. Dicho convertidor puede escalarse para soportar 4 ramales de ultracapacitores como el descrito en la Tabla 5, pudiéndose lograr una capacidad de energía de 4 kWh, es decir, el sistema podría almacenar toda la energía que puede regenerar un tren, en el evento en que no haya otro tren que pueda consumirla.

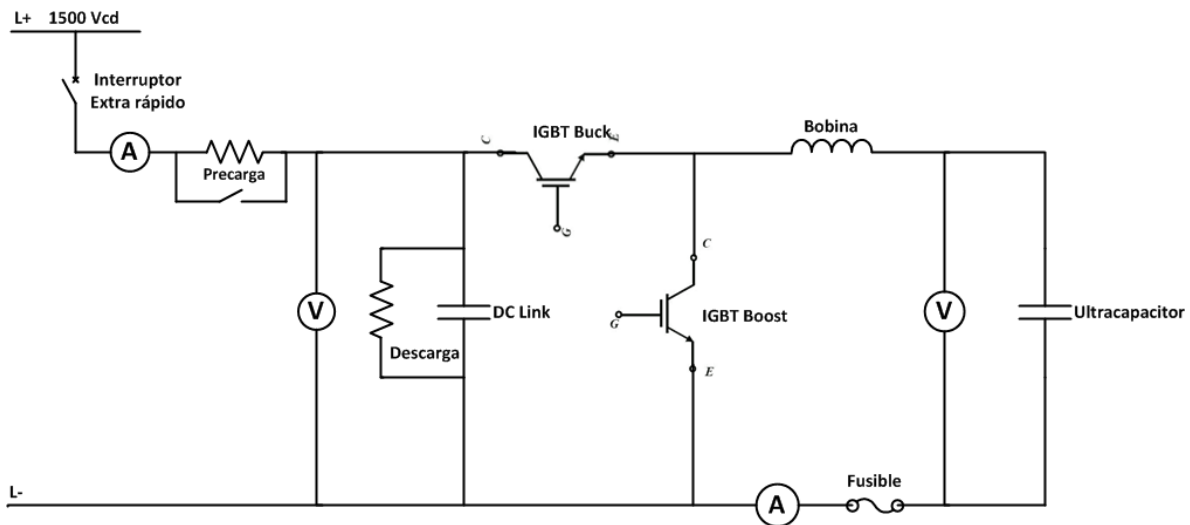


Figura 19. Topología general convertidor cd-cd bidireccional (Buck – Boost)

Tabla 6. Especificación técnica general del convertidor cd-cd bidireccional (Buck – Boost)

Parámetro	Valor	Comentario
Voltaje	1500 V	Voltaje nominal del convertidor
Corriente	160A/240 A	Corriente máxima de operación del convertidor
Potencia	240 kW	Potencia máxima del sistema de compensación
Frecuencia	3 kHz	Frecuencia de operación del convertidor

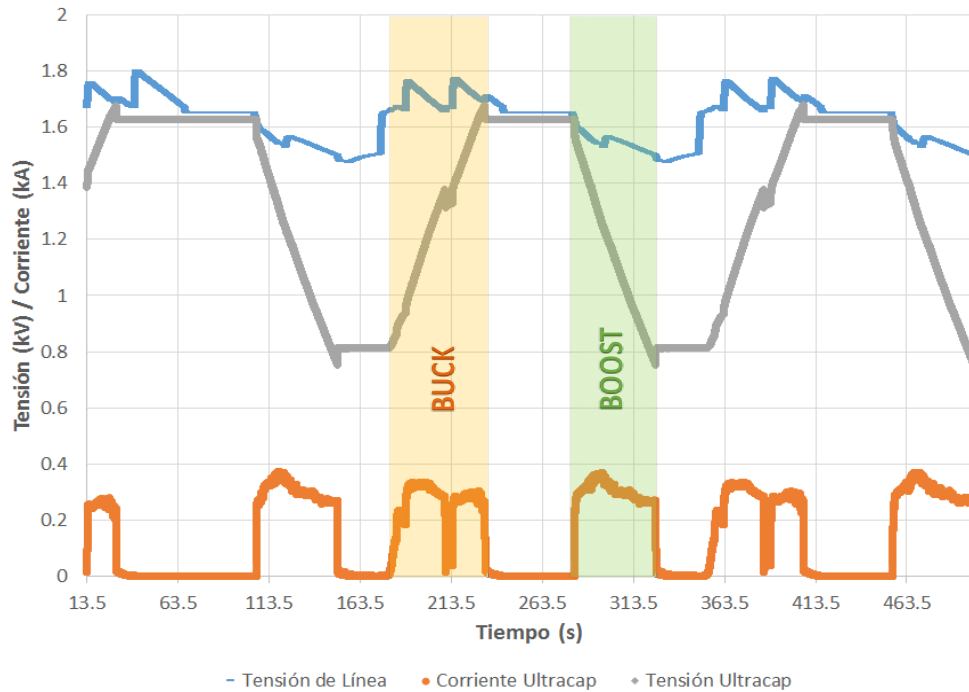


Los detalles técnicos relacionados con el sistema de compensación, su implementación y los protocolos para su integración en la operación del Metro de Medellín pueden consultarse en el trabajo de grado de maestría, “Implementación de compensador de tensión para sistemas ferroviarios en corriente directa basado en ultracapacitores”, del ingeniero Edison Manrique Ospina.

- **Simulación convertidor cd-cd diseño asistido por computador**

Debido a la complejidad de estos sistemas, la mejor manera de anticipar su desempeño es el uso de simulaciones digitales. Para esto se escogió el *PSCAD*, programa en el cual se implementó un modelo simplificado del sistema de alimentación, correspondiente al equivalente de Thevenin en la última subestación de tracción (Zamora), la línea de alimentación (catenaria), los trenes operativos y finalmente, el sistema de compensación. El primer paso fue garantizar que el sistema virtual, sin compensador, tuviera el mismo comportamiento que el sistema real, con las maniobras de los trenes causando las mismas fluctuaciones que las registradas en el monitoreo ya mencionado. Se debe comprobar que las fluctuaciones causadas coincidan en profundidad, duración y frecuencia. Comprobado el modelo, se procede a estudiar el desempeño del sistema de compensación para verificar los parámetros de diseño, y la forma en que interactúa con el sistema bajo diferentes esquemas de despacho de trenes, desde un solo tren en la sección eléctrica (días festivos) hasta cuatro trenes (hora pico). Incluso se efectúan variaciones en los tiempos de arranques y paradas buscando posibles casos críticos. Como ilustración la Figura 20 presenta las curvas de tensión de línea y tensión y corriente del Ultracapacitor de un sistema de compensación. Tal como fue explicado en el numeral 3.1.1 Incremento de flota, la simulación incluye la operación de la SEU después de pasados 150 s de iniciada la corrida, 1 tren arrancando y frenando y SEU es de 1 kWh a 2,5 km de la SET, lo que equivale a la distancia real entre SET Bello/Patio y la cola del circuito en Niquía.. Cuando la tensión en línea se eleva por encima del umbral programado, el ultra capacitor se carga a través del convertidor bidireccional que se encuentra funcionando en modo buck, cuando

la tensión en línea disminuye, el ultra capacitor regresa la energía almacenada, y el convertidor opera en modo boost, esto se repite cada vez que un tren arranca o frena, momentos en los cuales se presentan las mayores fluctuaciones de tensión sobre la línea de alimentación; el algoritmo de control se describe de manera detallada en [45].



**Figura 20. Simulación en PSCAD de un convertidor bidireccional buck-boost**

La Figura 21 muestra el mismo caso de la figura anterior, pero ahora son datos reales medidos con el prototipo operando en la cola del circuito (SEP Niquía). Sin embargo la corriente del equipo fue limitada a 130 A para operación Buck (toma de energía) y 80 A en Boost (retorno de energía). Es notable la forma en que el modelo digital permitió anticipar el comportamiento real del compensador y su contribución al sistema de alimentación evitando caídas de tensión que podrían llegar a ser perjudiciales para el operación de los trenes.

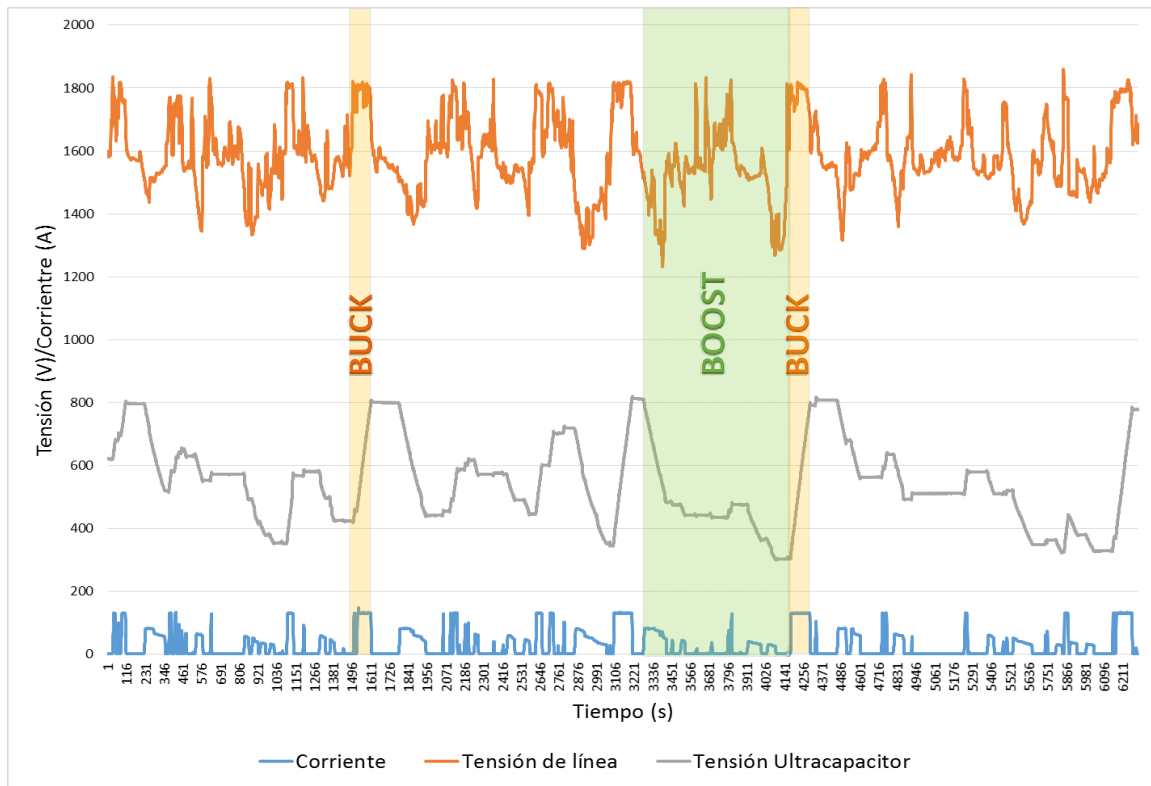


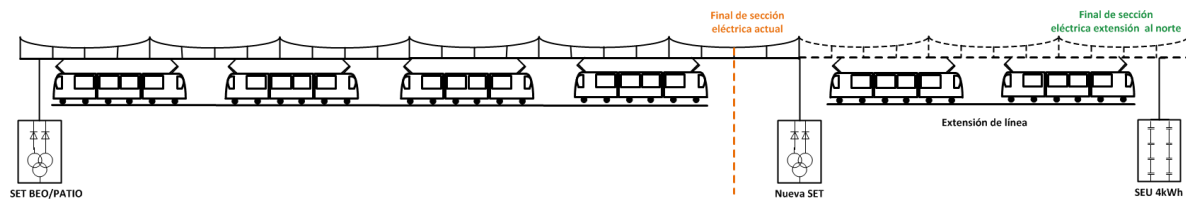
Figura 21. Contribución del compensador en la cola del circuito (SEP Niquía)

### 3.3.1 Estrategia combinada

En la Extensión al Norte del Metro de Medellín se incrementará no más de 5 km la longitud de la línea, a partir de la estación Niquía, resultando una longitud total de 7,5 km desde la SET Bello/Patio a la cola del circuito. La máxima distancia entre SETs en el sistema actual es de aproximadamente 4 km, ver la Figura 13. lo que lleva a pensar que para satisfacer la demanda sería necesario montar 2 SET adicionales. Sin embargo, Con base en los resultados obtenidos en los estudios operativos y los estudios eléctricos que acabamos de ver, se evidencia que la mejora alternativa para satisfacer la demanda de energía resulta ser una estrategia combina, mediante la instalación de una nueva SET y una SEU, como se detalla a continuación.

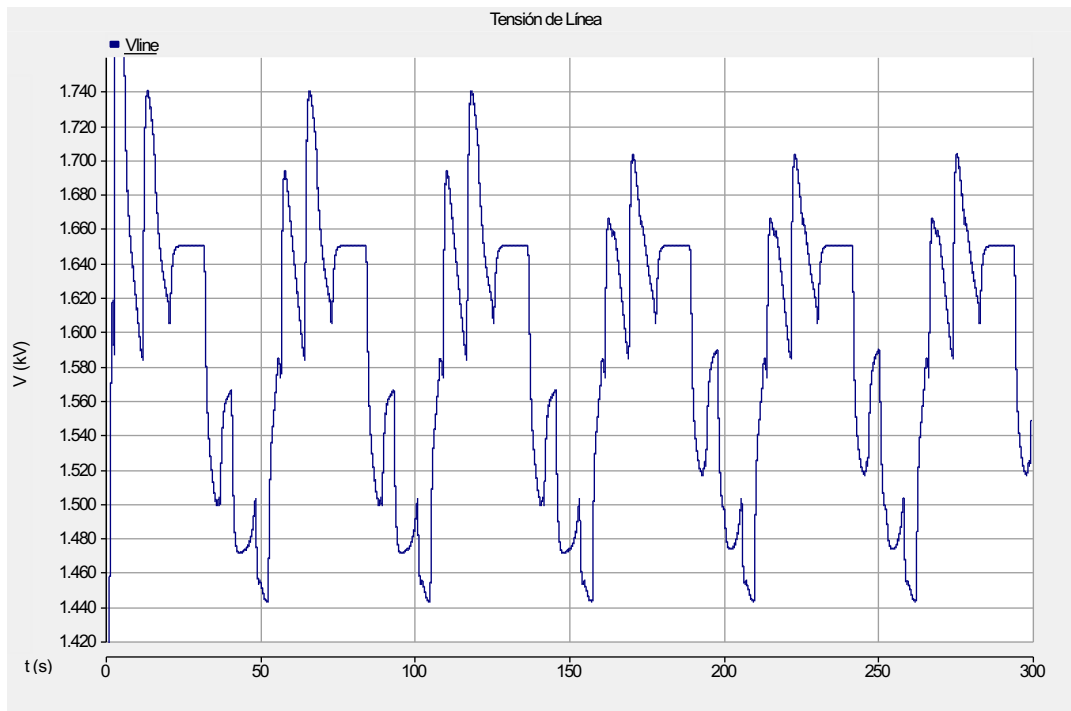
Debe tenerse en cuenta también que dicha extensión de línea plantea la inclusión de dos estaciones y la operación de máximo 3 trenes en dicho tramo, como se presenta en la

Tabla 3. La estrategia combinada tiene la siguiente configuración, la cual se representa en la Figura 22: Una nueva SET, con la misma capacidad instalada de las existentes (7 MVA), a 4 km de SET Bello/Patio, configuración que funciona exitosamente en el sistema en diferentes secciones eléctricas, y la SEU en la cola del circuito, es decir, a 3,5 km de la nueva SET. Para efectos de simulación, solamente se considera los últimos 3,5 km de nueva línea, lo que incluye la nueva SET y una SEU de 4kWh en la cola del circuito; 3 trenes arrancando simultáneamente, máxima cantidad de trenes que operaría en la Extensión al Norte del sistema y peor condición operativa para el mismo; la SEU entra a operar 150 s después de iniciada la simulación.



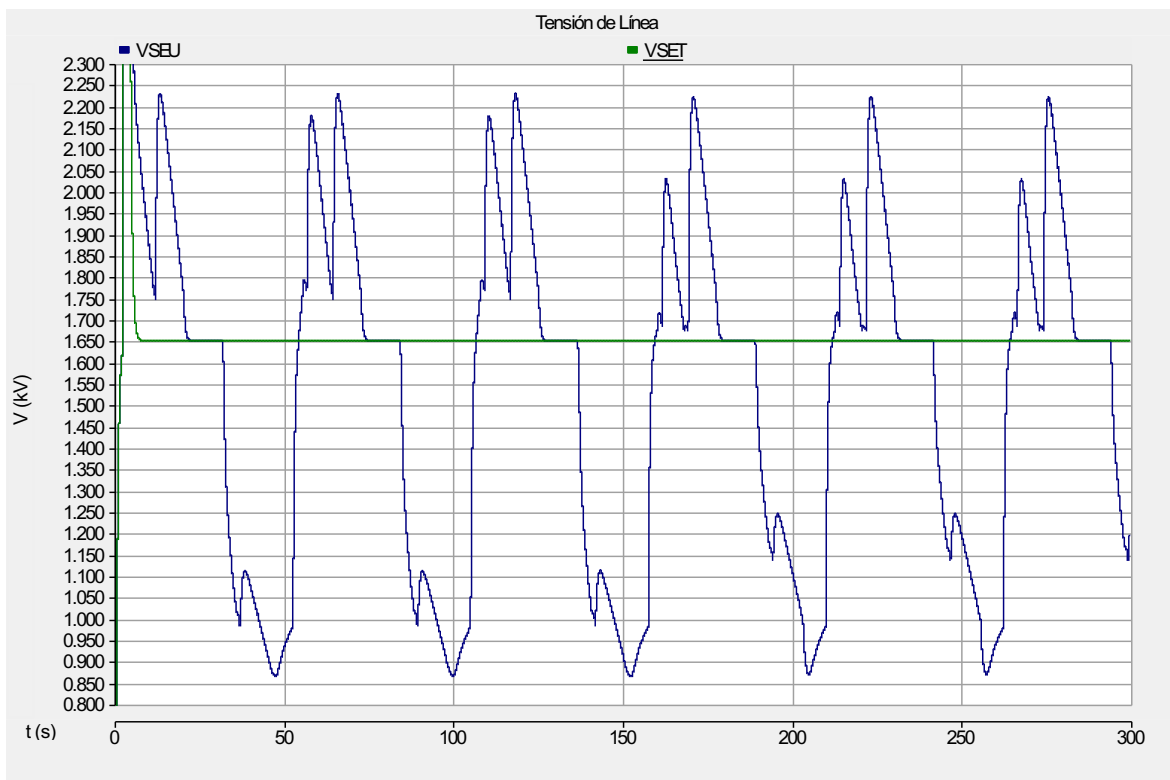
**Figura 22. Configuración recomendada Extensión al Norte**

En la condiciones mencionadas el perfil de tensión que se presenta en la Figura 23 demuestra que el sistema podría operar sin inconveniente, la tensión se conserva dentro de los límites establecidos por la norma UNE EN 50163.



**Figura 23. Perfil de tensión en la cola del circuito con y sin compensación, caso incremento de oferta**

Es importante analizar lo que ocurriría, mediante simulación, en una contingencia, en la que la nueva SET salga de servicio (N-1) y la distancia de la sección eléctrica sea de 7,5 km, comprendidos entre la última SET operativa, SET Bello/Patio en nuestro caso, y la SEU ubicada en la cola del circuito con 3 trenes arrancando simultáneamente, pero situación operativa de acuerdo con los datos de pre factibilidad, ver Tabla 3. Como en los diferentes casos la SEU entra en operación 150 s después de iniciada la simulación. En dichas condiciones la tensión en la catenaria tiene el comportamiento que se ilustra en la Figura 24.



**Figura 24. Tensión en al catenaria medida en la SEU a 7,5 km de la última SET y 3 trenes arrancando simultaneamente**

Se evidencia la imposibilidad del sistema para mantener la tensión dentro de los límites permisibles (UNE EN 50163), inclusive no se percibe el efecto del sistema de compensación después de transcurridos 105 s que entra en operación.

Dada la situación se simula la misma condición anterior pero con dos trenes arrancando simultáneamente, en cuyo caso la tensión en la catenaria tienen el comportamiento que se observa en la Figura 25.

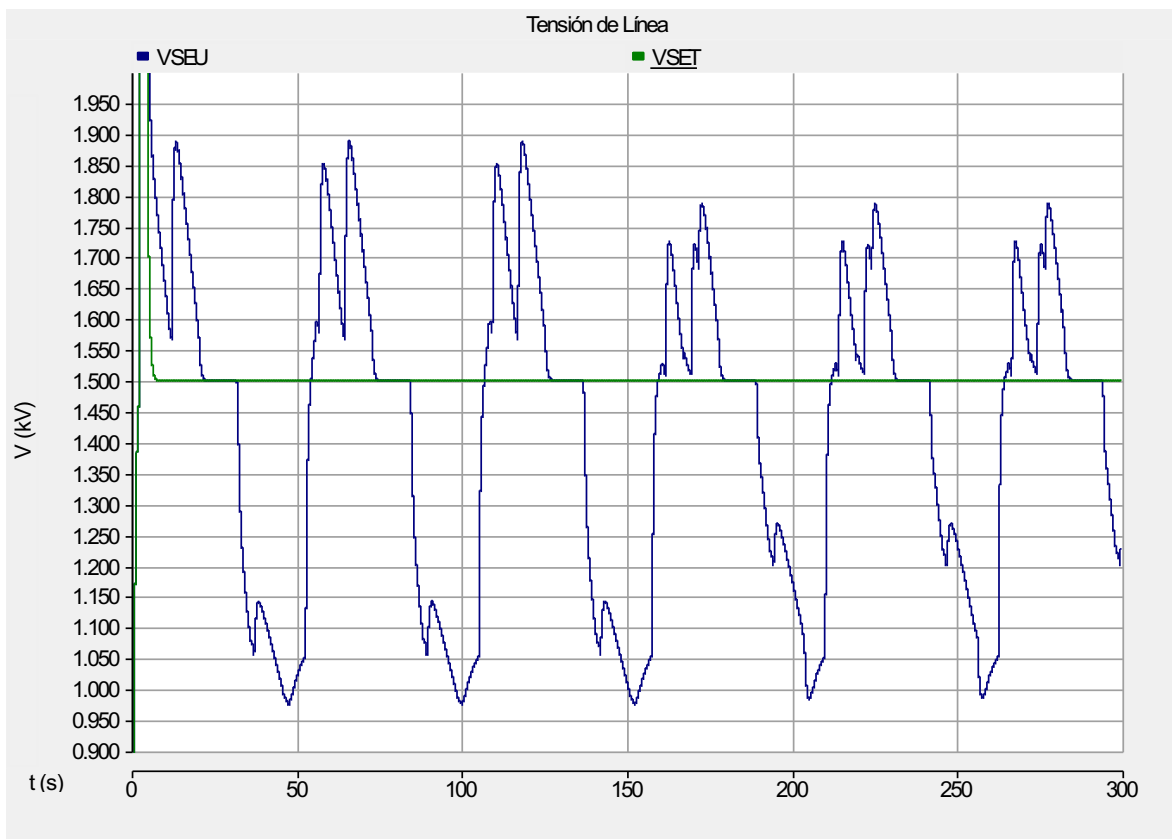


Figura 25. Tensión en al catenaria medida en la SEU a 7,5 km de la última SET y 2 trenes arrancando simultaneamente

Aunque se percibe el efecto de compensación, en estas condiciones tampoco se mantiene la regulación de tensión dentro de los límites permisibles, por lo que se corre nuevamente la simulación pero con un solo tren arrancando en el tramo afectado, obteniendo el perfil de tensión que se muestra en la Figura 26.

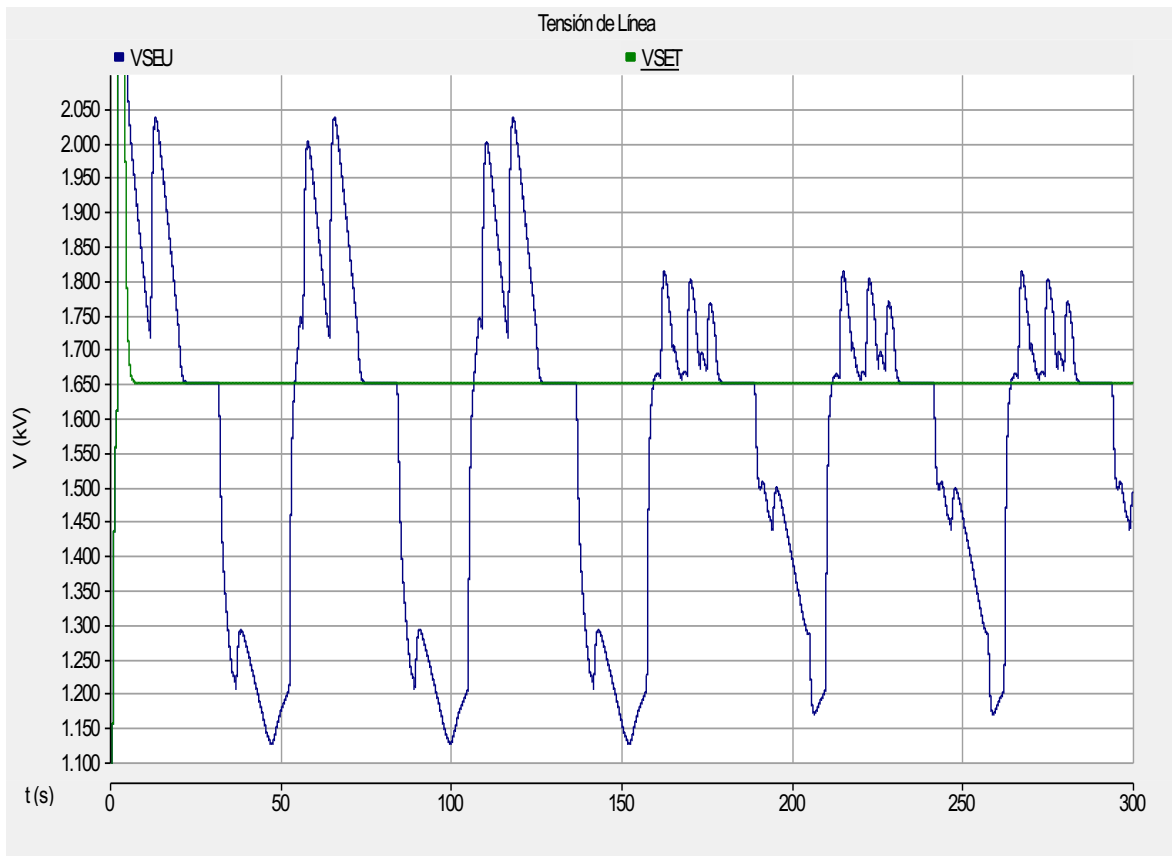


Figura 26. Tensión en al catenaria medida en la SEU a 7,5 km de la última SET y 1 solo trenes arrancando

En este caso el compensador logra mantener la tensión en el rango permitido, sin embargo, el nivel bajo de tensión se encuentra cerca del límite (1050 V), lo que debe verificarse en la práctica. Aunque podría simularse otras configuraciones para una mejor distribución de la nueva SET y la SEU, esto sería labor del estudio detallado de la solución.

Desde otro punto de vista y como ejercicio académico, se sabe que el consumo promedio de energía por kilometro recorrido en el año 2015 fue de 8,97 kWh/km y en el caso del sistema de compensación la energía ahorrada por el uso del compensador, suponiendo que la flota de trenes recorriera 2300 km/año en la extensión y tomando como base el ahorro de energía medido en el prototipo en operación comercial (111 kWh) con un almacenamiento de 1 kWh, se espera que con un almacenamiento de 4 kWh la energía recuperada no sea inferior a 444 kWh, en cuyo caso el ahorro de energía por kilometro



recorrido sería de 0,19 kWh/km, lo que equivale al 2,13 % del consumo promedio por kilómetro recorrido por la flota.

### **3.4 EVALUACIÓN FINANCIERA**

#### **3.4.1 Modelo financiero**

El planeamiento usual del sistema de suministro de energía en el Metro de Medellín, indica que la distancia máxima entre dos subestaciones de tracción es de aproximadamente 4 km. Como se mencionó en el numeral 3.3.1, la Extensión al Norte haría que la longitud a la cola del circuito fuera de 7,5 km, lo que permite concluir que serían necesarias dos nuevas SET para satisfacer la demanda, una a 4 km de SET Bello/Patio y la otra en la cola del circuito.

El uso de esquemas de compensación, como el que se ha evaluado a nivel de prototipo en este sistema de transporte, permite considerar la posibilidad de reemplazar la nueva SET que se instalaría en la cola del circuito por una SEU de 4 kWh, configuración que puede observarse en la Figura 22, lo que plantea dos escenarios para la evaluación de la factibilidad financiera de la extensión que obviamente requeriría el sistema de suministro de energía.

- Instalar una nueva SET en la cola del circuito ó
- Instalar una SEU de 4 kWh en la cola del circuito

Otra condición del planeamiento del sistema es que, el uso de una nueva SET o de una SEU en la cola del circuito debe ser transparente para la operación, es decir que, cualquiera de las dos soluciones que se implemente debe garantizar la atención de la demanda, incluye en condiciones degradadas (N-1), lo que incluye a la SEU. En dichas condiciones el modelo financiero se dirige a la evaluación de los costos asociados a cada

uno de los escenarios planteados. En otras palabras, no se requiere evaluar ingresos, toda vez que en cualquier escenario las condiciones operativas serían las mismas.

Debe tenerse en cuenta también que para la Extensión al Norte se requiere de un compensador de 4 kWh y el prototipo con el que se hicieron las pruebas es de 1 kWh. En dichas pruebas en un día típico de operación comercial se recuperaron 111kWh, en 19 horas de operación continua, es decir, que para el compensador de 4 kWh la recuperación de energía sería de 444 kWh, lo cual se valida en el cálculo realizado en la Ecuación 1. Adicionalmente puede considerarse éste un dato conservador, teniendo en cuenta que el prototipo de compensador probado es susceptible de optimización para mejorar la recuperación de energía, lo cual debe considerarse entre las recomendación para continuar con la segunda etapa del proyecto.

Es importante mencionar también que el Metro de Medellín por estar conectado en el nivel de tensión 4 y de acuerdo con su política, negocia la energía en contratos de largo plazo con el operador de red (EPM), lo cual garantiza estabilidad en los precios y es manejable una proyección del incremento anual del costo de energía del 3%.

En el modelo se utilizó una tasa anual de descuento del 14%, dato que se considera conservador, teniendo en cuenta que una tasa de este nivel no se encuentra actualmente en el mercado financiero.

Otro dato conservador en el modelo es que se consideran los 365 del año como día típico laboral, pues se parte de las medición realizada en condiciones reales con el prototipo en dicha condición. Los dominicales y festivos la recuperación de energía del compensador mejora debido a que la frecuencia de los trenes es menor y por ende las posibilidades de disipación de energía en estos es mayor, lo que redunda un mayor recuperación de

energía por el compensador y como consecuencia el promedio diario de recuperación sería mayor.

Volumetricamente hablando un sistema de compensación de 4kWh no alcanza un 10 % del volumen de una SET convencional en el Metro de Medellín, por lo que considerar el costo del mantenimiento un 10 % de lo cuesta mantener una SET, también se considera conservador, aunque dichas cantidades sean despreciables en este modelo.

En consecuencia con lo expuesto hasta ahora los datos de entrada al modelo financiero se detallan en la Tabla 7.

**Tabla 7. Datos de entrada al modelo financiero**

c Metro de Medellín - Universidad Pontificia Bolivariana Cifras en COP	
Año de inicio	2017
TRM 01.01.2016	\$3.149
Vida útil de los ultracapacitores	10 años
Vida útil del convertidor cd-cd	30 años
Vida útil de una SET	30 años
Precio de la energía a enero de 2016	\$260
Energía recuperada por el compensador en día típico laboral [kWh/día]	444
Tasa anual de descuento Metro de Medellín	14%
Incremento anual costo de energía	3%
Proyección IPC Colombia	3,10%
Proyección inflación anual USA	2,20%
Inversión SEU	\$1.722.673.792
Inversión SET	\$8.403.004.790
Costo anual mantenimiento SEU	\$1.656.269
Costo anual mantenimiento SET	\$165.627

Los resultados del modelo financiero se aprecian en la Tabla 8.

**Tabla 8. Resultado del Modelo Financiero**

<b>VALOR PRESENTE NETO</b>				
<b>Equipo</b>	<b>Inversión</b>	<b>Costos</b>	<b>Ahorros energéticos</b>	<b>TOTAL</b>
Sistema de compensación SEU	-\$6.214.285.833	-\$1.263.155	\$377.560.106	-\$5.837.988.882
Subestación de tracción SET	-\$8.846.874.332	-\$12.631.546	0	-\$8.859.505.878
<b>AHORROS EN VPN</b>	<b>\$2.632.588.499</b>	<b>\$11.368.392</b>	<b>\$377.560.106</b>	<b>\$3.021.516.996</b>
<b>AHORRO NOMINAL ANUAL</b>				<b>\$ 100.717.233</b>

Los resultados muestran un VPN favorable al sistema de compensación en la inversión, en los costos, en el ahorro energético y como consecuencia un ahorro nominal anual de \$ 100.717.233, lo que le da viabilidad financiera al proyecto. El modelo financiero completo se adjunta este trabajo de grado en el Anexo 2.

Con base en lo anterior queda claro que la implementación de un sistema de compensación con ultracapacitores como medio de almacenamiento no lo determina el potencial de ahorro de energía, lo hace viable el ahorro en la magnitud de la inversión en infraestructura eléctrica.

### **3.4.2 Estrategia financiera**

El modelo financiero valida la tesis de que un esquema de compensación como el planteado, posibilita a una empresa de transporte como el Metro de Medellín, postergar la inversión en una SET en función de la demanda y hacer uso de los recursos teniendo en cuenta una futura inversión en la infraestructura eléctrica. Los beneficios en el flujo de caja de la empresa dependen del buen uso de dichos recursos.

## CONCLUSIONES

- El crecimiento de las ciudades conlleva un incremento en la demanda de servicios de transporte, que en el caso de sistemas de transporte eléctrico implica inversiones en infraestructura eléctrica. Como se demostró, el uso de esquema de compensación es una alternativa que permite reducir los costos de inversión en infraestructura eléctrica y por lo tanto debe ser tenido en cuenta en la planeación de los sistemas de suministro de energía.
- Si bien los ultracapacitores tienen todavía un costo elevado y representan cerca del 60 % del costo de un sistema de compensación, se ha demostrado con hechos y datos su viabilidad técnica y financiera en extensiones de línea, como la extensión al Norte proyectada en el Metro de Medellín.
- Mediante mediciones reales durante la operación comercial del Metro de Medellín con el prototipo desarrollado en funcionamiento, se comprobó que el ahorro de energía no tiene peso en el modelo y que por sí solo no daría viabilidad financiera a este tipo de proyecto, pero las virtudes de compensación de tensión y los potenciales ahorros en infraestructura para repotenciación y el incremento de la vida útil de los equipos, por la limitación de las sobretensiones, hacen vislumbrar que equipos de esta naturaleza harán parte de las redes convencionales de alimentación.
- En este trabajo de grado se propone una metodología de planeamiento para que la incorporación de sistemas de compensación sea una realidad desde las etapas previas al diseño de nuevos proyectos, expansiones o repotenciones de la infraestructura de alimentación de sistemas multimodales de transporte y no solamente utilizados como medidas remediales en sistemas saturados o deficitarios. La implementación de

la metodología en el Metro de Medellín permitió comprobar su validez y pertinencia en el planeamiento y evaluación financiera de redes de alimentación de sistemas de transporte eléctrico.

- En la vigilancia tecnológica desarrollada para este trabajo se pudo tener acceso a fuentes de información primaria a nivel industrial logrando validar la pertinencia de los objetivos de este trabajo de grado. Las fuentes de información secundaria permitieron identificar el desarrollo de sistemas de compensación en niveles de tensión y frecuencia diferentes al prototipo desarrollado, en el que se logró bajar los costos en función de la frecuencia utilizada. Esto abre una oportunidad a la Empresa, la Universidad y la industria local de ofrecer consultoría y de potenciar el desarrollo de compensadores para aplicaciones específicas.
- El hecho de desarrollar el prototipo con la participación de la academia y la industria local, permitió apropiarse del conocimiento y desarrollar la industria, tanto en el diseño de convertidores cd-cd como en su desarrollo e implementación.
- Los resultados obtenidos mediante simulación y mediciones reales con el prototipo en operación, evidencian las bondades del modelo computacional desarrollado y queda una herramienta que garantiza confiabilidad en este tipo de estudio.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda simular otras distribuciones de la nueva SET y la SEU, en la estrategia combinada, con el fin de optimizar el rango de tensión que en el nivel bajo se aleje un poco más del límite permitido, tal y como sucede en el caso que ilustra la Figura 26. Inclusive el rango de operación del equipo podría ser dinámico, según el horario operativo.
- Realizar una optimización del sistema de compensación que garantice la máxima recuperación y la máxima devolución de energía posibles, incrementando así el ahorro de energía.
- Considerar en futuros trabajos el análisis del uso de pequeños sistemas de compensación que permitan mantener la regulación de tensión en tramos cortos de línea, con el objetivo de preservar la integridad de los equipos. Tal podría ser el caso de la Línea B en el Metro de Medellín.
- El conocimiento generado en este proyecto, el prototipo desarrollado para el Metro de Medellín y la posibilidad de potenciar la industria, demuestran los beneficios de la alianza universidad, empresa, estado y generan la confianza para recomendar la continuidad de los proyectos de investigación aplicada en este mismo modelo administrativo.
- Desde el punto de vista operativo es recomendable analizar el impacto de los acoples transversales en la red de alimentación eléctrica, en el desempeño del sistema de compensación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Metro de Medellín, “Manual integrado de gestión,” 2015.
- [2] Metro de Medellín, “Informe Corporativo de Gestión 2014,” [https://www.metrodemedellin.gov.co/Portals/4/archivos\\_metro/quienes-somos/INFORMES-CORP/Memoria%20de%20Sostenibilidad%202014.pdf](https://www.metrodemedellin.gov.co/Portals/4/archivos_metro/quienes-somos/INFORMES-CORP/Memoria%20de%20Sostenibilidad%202014.pdf). Metro de Medellín, 2015.
- [3] A. Armstorfer, “Simulation des elektrischen Antriebes einer Nahverkehrsbahn,” no. November, 2011.
- [4] A. E. Diez Restrepo, A. Armstorfer, E. M. Álvarez Cano, M. Figueroa Carrillo, and J. A. Velásquez, “Simulación del Sistema de Tracción del Metro Medellín,” 2011.
- [5] A. Killer, “Ultracapacitor Assisted Regenerative Braking of the Metro of Medellín in Colombia,” 2012.
- [6] Siemens and Ateinsa, “Manual de Mantenimiento Metro de Medellín - Sistema de Tracción.” 1995.
- [7] Siemens and Ateinsa, “Manual de Mantenimiento Metro de Medellín - Sistema de Mando y Control.” 1995.
- [8] M. Melis Maynar and F. J. González Fernández, *Ferrocarriles Metropolitanos: Tranvías, metros ligeros y metros convencionales*, 3rd ed. España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2008.
- [9] P. Barrade, “Energy storage and applications with supercapacitors,” *ANAE Assoc. Naz. Azionamenti Elettr. ...*, 2003.
- [10] L. Battistelli, M. Fantauzzi, D. Iannuzzi, and D. Lauria, “Energy management of electrified mass transit systems with Energy Storage devices,” *Int. Symp. Power Electron. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 1172–1177, Jun. 2012.
- [11] A. Capasso, M. C. Falvo, U. Grasselli, R. Lamedica, R. Bartoni, M. Francisi, and G. Maranzano, “A planning study on power systems of metro-transit transportation system,” *2008 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 1027–1032, Jun. 2008.
- [12] S. D’Avanzo, D. Iannuzzi, F. Murolo, R. Rizzo, and P. Tricoli, “A sample application of supercapacitor storage systems for suburban transit,” *Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propuls.*, pp. 1–7, Oct. 2010.
- [13] X. del T. García, “Ultracapacitor-based storage: Modelling, power conversion and



energy considerations," ... (*ISIE*), 2010 *IEEE ...*, no. 2, pp. 2493–2498, 2010.

- [14] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art," *Veh. Technol. IEEE Trans.*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, 2010.
- [15] T. Konishi, S. Hase, and Y. Nakamichi, "Verification tests of energy storage system for DC electrified railways using EDLC," *Q. Rep. RTRI*, vol. 48, no. 2, pp. 71–77, 2007.
- [16] H. Lee, G. Kim, and C. Lee, "Development of ESS for Regenerative Energy of Electric Vehicle Hanmin Lee, Gildong Kim, Changmu Lee," 2008.
- [17] H. Lee, G. Kim, C. Lee, and E. Joung, "Field Tests of DC 1500 V Stationary Energy Storage System," *Int. J. Railw.*, vol. 5, no. 3, pp. 124–128, Sep. 2012.
- [18] J. Locker and T. Wolfe, "Development of an Ultracapacitor-Based Intermediate Energy Storage System," *Pulsed Power Conf. 2005 IEEE*, pp. 1337–1340, 2005.
- [19] J. Morand, D. Bergogne, and P. Venet, "An energy saver for tramway networks using double active bridge and supercapacitors," ... (*EPE*), 2013 15th ..., 2013.
- [20] I. Szenasy, "Improvement the energy storage with ultracapacitor in metro railcar by modeling and simulation," *IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, Sep. 2008.
- [21] D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Metro trains equipped onboard with supercapacitors: A control technique for energy saving," *SPEEDAM 2010 - Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 750–756, 2010.
- [22] H. Afriat, "System for Supplying very Low Voltage Electrical Energy for an Electrical Traction Vehicle Compraising Onboard Store Energy US20070278059," US20070278059, 2007.
- [23] "Ultracapacitor energy storage offers metro operators 20% savings - Railway Gazette," *Railway Gazette*, 2014. [Online]. Available: <http://www.railwaygazette.com/news/news/asia/single-view/view/ultracapacitor-energy-storage-offers-metro-operators-20-savings.html>. [Accessed: 07-Aug-2015].
- [24] H. Lee, G. Kim, C. Lee, and H. Park, "A Study on Saving Effects of Energy Regenerated from Electric Train," no. Iccas, pp. 519–522, 2013.
- [25] H. Hõimoja, D. Vinnikov, and T. Jalakas, "Analysis and Design of Ultracapacitor-Boosted Back-Up Power Supply for Tramcars," *IEEE Conf. Publ.*, pp. 583–589, 2009.
- [26] Y. Diab, "Evaluating Performance and Reliability of Storage System with Supercapacitors: Application in Trolleybuses," *Damascus Univ. J.*, vol. 30, no. JANUARY 2014, 2014.
- [27] P. Thounthong, S. Sikkabut, P. Mungporn, L. Piegari, P. Leonardo, S. Pierfederici, and

- B. Davat, "DC Bus Stabilization of Li-Ion Battery Based Energy Storage for Hydrogen / Solar Power Plant for Autonomous Network Applications," *IEEE Conf. Publ.*, pp. 1–8, 2014.
- [28] J. Voelcker, "Chinese Electric Bus Catches Fire On Road, Not The First One," *Green Car Reports*, 2011. [Online]. Available: [http://www.greencarreports.com/news/1063473\\_chinese-electric-bus-catches-fire-on-road-not-the-first-one](http://www.greencarreports.com/news/1063473_chinese-electric-bus-catches-fire-on-road-not-the-first-one). [Accessed: 12-Aug-2015].
- [29] S. J. Kashani and E. Farjah, "Applying neural network and genetic algorithm for optimal placement of ultra-capacitors in metro systems," *2011 IEEE Electr. Power Energy Conf.*, pp. 35–40, 2011.
- [30] F. Ciccirelli, D. Iannuzzi, and I. Spina, "Comparison of Energy Management Control Strategy based on Wayside ESS for LRV application," *IEEE Conf. Publ.*, pp. 1546–1552, 2013.
- [31] V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber, and A. Piccolo, "Optimal Siting and Sizing of Stationary Supercapacitors in a Metro Network using PSO," *IEEE Conf. Publ.*, pp. 2680–2685, 2015.
- [32] M. Cerda, J. D. Morenoff, B. B. Hansen, K. J. Tessari Hicks, L. F. Duque, A. Restrepo, and A. V. Díez-Roux, "Reducing Violence by Transforming Neighborhoods: A Natural Experiment in Medellín, Colombia," *Am. J. Epidemiol.*, vol. 175, no. 10, pp. 1045–1053, 2012.
- [33] A. E. Díez, P. Alzate, J. V. Restrepo, L. Castrillon, E. Manrique, and M. Figueroa, "DC compensation systems and their implications on the planning of expansions in Metro systems: a case study of Medellín," *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 195, pp. 281–291, 2015.
- [34] Municipio de Medellín, "Proyecto de Acuerdo Plan de Desarrollo " Medellín un Hogar para la Vida," *Alcaldía de Medellín*, pp. 1–267, 2015.
- [35] Alcaldía De Medellín, "Acuerdo 48 de 2014 Plan de Ordenamiento Territorial Medellín," *Gaz. Of.*, vol. 4267, pp. 1–877, 2014.
- [36] C. Sym, "Informe Final Estudio De Movilización De Pasajeros En Rutas Urbanas De La Ciudad , Mediante Aforos," *Secr. Movil.*, p. 139, 2013.
- [37] E. Alcántara, *Análisis de la movilidad urbana. Espacio, medio ambiente y equidad*. 2010.
- [38] A. De Medellín, "Plan de movilidad segura de Medellín 2013-2020," *Plan Movil. Segura Medellín 2014-2020 (Pmsm 2014-2020)*, vol. 2020, p. 383, 2013.
- [39] U. de Antioquia, "Medellín: crecimiento rápido, movilidad lenta | De La Urbe," *delaurbe*, 2013. [Online]. Available:

<http://delaurbe.udea.edu.co/2013/10/22/medellin-crecimiento-rapido-movilidad-lenta/>. [Accessed: 07-Feb-2016].

- [40] U. EAFIT, "Medellín proyecta su movilidad a 2030," *Academia*, 2014. [Online]. Available: <http://www.eafit.edu.co/agencia-noticias/historico-noticias/2014/noticias-octubre/Paginas/academia-medellin-proyecta-su-movilidad-a-2030.aspx>. [Accessed: 07-Feb-2016].
- [41] MAFEX, "Damos la vuelta al Mundo," *Mafex Mag.*, 2016.
- [42] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, *Plan Maestro de Movilidad para la Región Metropolitana del Valle de Aburrá*. 2009.
- [43] R. Teymourfar, G. Farivar, H. Iman-eini, M. Ieee, and B. Asaei, "Optimal Stationary Super-capacitor Energy Storage System in a Metro Line," *Electr. Power Energy Convers. Syst. (EPECS), 2011 2nd Int. Conf.*, pp. 1–5, 2011.
- [44] M. A. Ibrahim, "Analysis and Simulation of Electrical Railway Systems Using Ultra-Capacitors for Regenerative Braking," *Thesis Master Study Electr. Eng. Univ. Appl. Sci. Kempten*, 2012.
- [45] D. Villegas, A. E. Díez, J. V Restrepo, D. Múnera, A. Bohorquez, L. Castrillon, and E. Manrique, "Medium scale prototype of a regenerative braking system and voltage stabilizer," *Power Electron. Power Qual. Appl. (PEPQA), 2015 IEEE Work.*, 2015.

## **ANEXOS**

ANEXO 1. Vigilancia tecnológica sobre compensadores de tensión en corriente directa y su uso extensivo en sistemas de transporte eléctrico.

ANEXO 2. Modelo Financiero Sistema de Compensación cd-cd Metro de Medellín.

## OTROS APORTES DE ESTE TRABAJO DE GRADO

APORTE 1. *DC compensation systems and their implications on the planning of expansions in metro systems: a case study of Medellin*. Paper publicado en "*WIT Transactions on Ecology and Environment*", 2015.

APORTE 2. *Medium scale prototype of a regenerative braking system and voltage stabilizer*. Paper publicado en "*Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), 2015 IEEE Workshop on*".

APORTE 3. Análisis de oportunidad sistema de compensación cd-cd