



PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRACCIÓN ELÉCTRICA
BASADO EN EL CONCEPTO DE FACTOR DE COMPENSACIÓN REGENERATIVO

ELIANA MARÍA ÁLVAREZ CANO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ÁREA TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA
MEDELLÍN
2017

PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRACCIÓN ELÉCTRICA
BASADO EN EL CONCEPTO DE FACTOR DE COMPENSACIÓN REGENERATIVO

ELIANA MARÍA ÁLVAREZ CANO

Trabajo de Grado para optar al Título de
Magíster en Transmisión y Distribución de Energía

Director

ANDRES EMIRO DÍEZ RESTREPO

Ingeniero Electricista - Máster en Ingeniería

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

07 de Febrero de 2017

Eliana María Álvarez Cano

“Declaro que esta tesis 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.

Firmas

AGRADECIMIENTOS

A Diosito por tantas bendiciones recibidas. A la Universidad por permitirme realizar mis estudios de Maestría. A Armando Bohórquez porque ha sido parte fundamental en mi formación como profesional. A mi Director Andrés Emiro Díez por sus enseñanzas, su paciencia, su pasión con el tema y sus ideas. A Sergio Suarez por su amor y comprensión. A Daniel Arroyave por su aporte con las simulaciones.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece el apoyo de las gerencias de Planeación, Operaciones y Mantenimiento del Metro de Medellín y a la coordinación de laboratorios de ingeniería eléctrica y electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana. A Ruta N por su apoyo mediante el proyecto titulado Redes Multimodales, código 111C-2015.

CONTENIDO

1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN ELÉCTRICA.....	19
1.1.1 Historia de los sistemas de tracción eléctrica	19
1.1.2 Descripción de un sistema de tracción	20
1.1.3 Tipos de sistemas de tracción	29
1.2 ESTADO DEL ARTE EN SISTEMAS DE TRACCIÓN	35
1.2.1 Vigilancia tecnológica.....	35
1.2.2 Tipos de tecnología utilizada en sistemas de tracción.....	37
1.2.3 Contexto nacional	48
1.2.4 Contexto internacional.....	50
1.2.5 Metodologías de diseño basadas en energía recuperable	51
1.3 COMPENSACIÓN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	55
1.3.1 Factor de potencia eléctrico.....	55
1.3.2 Tipos de compensación en sistemas eléctricos.....	58
1.3.3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	60
2. FACTOR DE COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REGENERATIVA EN SISTEMAS DE TRACCIÓN	63
2.1 FORMULACIÓN DE EQUIVALENTES ANALÍTICOS	63
2.2 CONCEPTOS DE ENERGÍA REGENERATIVA.....	68
2.2.1 Definición	68
2.2.2 Componentes.....	68
2.3 TIPOS DE COMPENSACIÓN EN SISTEMAS DE TRACCIÓN.....	70
2.3.1 Compensación natural	70

2.3.2	Compensación forzada.....	71
2.4	PROPUESTA DEL FACTOR DE COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REGENERATIVA.....	71
2.4.1	Definición	71
2.4.2	Construcción del diagrama de energía regenerativa y el triángulo asociado	74
2.4.3	Casos ilustrativos del factor de compensación regenerativo	76
2.4.4	Ejemplos de cálculo del factor de compensación regenerativo	77
2.4.5	Efecto en la tensión de la compensación.....	82
2.4.6	Metodología para la implementación del factor de compensación regenerativo	86
3.	DESARROLLO DEL CASO DE ESTUDIO	87
3.1	<i>OpenTrack</i>	87
3.2	<i>OpenPowerNet</i>	88
3.3	<i>Caso de estudio</i>	91
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	94
4.1	Casos de estudio y análisis de resultados.....	94
4.1.1	Observaciones sobre el análisis de resultados de los casos analizados, del triángulo de energía regenerativa.....	108
5.	CONCLUSIONES.....	109
6.	TRABAJO FUTURO.....	112
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Rangos de tensión permitidos de acuerdo con estándar IEC 60850. (Frey, 2012)	22
Tabla 2.	Comparación de tecnologías. (Technologies, 2014)	47
Tabla 3.	Características sistema de tracción – Metro de Medellín	49
Tabla 4.	Contexto internacional (Frey, 2012)	50
Tabla 5.	Datos obtenidos del flujo de energía – Tranvía con 7 vehículos	94
Tabla 6.	Datos obtenidos del flujo de energía – Tranvía con 12 vehículos	95
Tabla 7.	Datos obtenidos del flujo de energía – Metro Medellín línea B operación normal	97
Tabla 8.	Datos obtenidos del flujo de energía – Metro línea B operación aumentada	99
Tabla 9.	Datos obtenidos del flujo de energía – Metro Línea B sin subestación estadio	100
Tabla 10.	Datos obtenidos del flujo de energía – Metro Línea B con un rectificador	103
Tabla 11.	Datos obtenidos del flujo de energía – Metro línea B con ultracapacitor	105
Tabla 12.	Datos obtenidos del flujo de energía – Metro línea B sin ultracapacitor	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Primer sistema de tracción eléctrica (Chicago). (Andersen, 2007).....	20
Figura 2.	Diagrama completo de un sistema de tracción.	26
Figura 3.	Medellín Metrocable Línea J. (Dale, 2016)	30
Figura 4.	Trolebús UPB.	34
Figura 5.	Vigilancia tecnológica: Publicaciones tracción eléctrica.	35
Figura 6.	Vigilancia tecnológica: áreas de interés, tracción eléctrica.	36
Figura 7.	Vigilancia tecnológica: tipo de publicaciones, tracción eléctrica.....	36
Figura 8.	Vigilancia tecnológica: Países que han realizado publicaciones sobre la tracción eléctrica.	37
Figura 9.	Configuración sistema de tracción con reducción de frecuencia. (Facchinetti, 2013)	39
Figura 10.	Configuración sistema de tracción con conversión AC/DC. (Facchinetti, 2013)	41
Figura 11.	Principio de funcionamiento del frenado regenerativo.....	42
Figura 12.	Comparación de tecnologías de almacenamiento de energía. (Topalian, 2016)	47
Figura 13.	Composición de la energía de frenado – Metro de Medellín.	48
Figura 14.	Coeficiente de fricción según el tipo de terreno (M. Boisvert, 2013).....	51
Figura 15.	Configuración del caso de estudio. (Qiu, 2016)	53
Figura 16.	Flujo de energía del vehículo . (Qiu, 2016).....	54
Figura 17.	Triángulo de potencia.....	56
Figura 18.	Resumen del esquema de la investigación	62
Figura 19.	Circuito magnético.....	64
Figura 20.	Histéresis magnética. (Kamil, 2015)	65
Figura 21.	Relación entre la fuerza magnetomotriz y la fuerza trenmotriz	66

Figura 22.	Flujo de reactiva en un circuito de alterna. Izquierda, sin compensador. Derecha, circuito compensado.....	67
Figura 23.	Triángulo de compensación de energía regenerativa para sistemas de tracción eléctrica	75
Figura 24.	Triángulo de compensación de energía regenerativa para sistemas perfectamente descompensados.....	76
Figura 25.	Triángulo de compensación de energía regenerativa para sistemas perfectamente compensados.....	76
Figura 26.	Triángulo de compensación de energía regenerativa para sistemas de energía regenerativa en adelanto	77
Figura 27.	Triángulo FCR para caso de estudio	78
Figura 28.	Triángulo FCR para $\cos(\phi) = 0.9$	79
Figura 29.	Propuesta de compensación forzada en sistema tipo góndola (Metrocable de Medellin)	81
Figura 30.	Triángulo de compensación de energía regenerativa en adelanto.....	82
Figura 31.	Curva de demanda tranvía de Ayacucho de Medellín en la subestación Oriente	83
Figura 32.	Curva de acumulación de carga en el tiempo para simulación del Tranvía de Ayacucho	84
Figura 33.	Curva de acumulación de carga en el tiempo para simulación del Metro.....	85
Figura 34.	Diagrama de flujo para aplicación de la metodología propuesta	86
Figura 35.	Topología de una red implementada en OpenTrack. (OpenTrack, 2016).....	88
Figura 36.	Interfaz en OpenPowerNet para la edición de archivos de configuración en formato XML.....	90
Figura 37.	Resultados de análisis energético, presentados por la herramienta OpenPowerNet	90
Figura 38.	Caso de estudio, tal como se visualiza en OpenTrack.....	91

Figura 39.	Tranvía Medellín. (Tiempo, 2016)	92
Figura 40.	Líneas que componen el Metro de Medellín. (Metro, 2016).....	93
Figura 41.	Metro de Medellín. (Metro, 2016)	93
Figura 42.	Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Tranvía con 7 vehículos	95
Figura 43.	Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Tranvía con 12 vehículos	96
Figura 44.	Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Metro Medellín línea B operación normal	97
Figura 45.	Perfil de tensión – Operación normal Metro Medellín	98
Figura 46.	Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Metro línea B operación aumentada	99
Figura 47.	Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Metro línea B sin subestación estadio	101
Figura 48.	Perfil de tensión – Operación sin subestación de tracción en Estadio- Línea B	102
Figura 49.	Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Metro línea B con un rectificador	104
Figura 50.	Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Metro línea B con ultracapacitor	105
Figura 51.	Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Metro línea B sin ultracapacitor	107

GLOSARIO

BATERÍA: Se denomina batería, batería eléctrica, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, al dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada, en electricidad.

FACTOR DE POTENCIA: se define como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente que está demandando la carga en un circuito de AC.

FRENO REGENERATIVO: Un freno regenerativo es un dispositivo que permite reducir la velocidad de un vehículo transformando parte de su energía cinética en energía eléctrica. Esta energía eléctrica es almacenada para un uso futuro.

METRO: Es un sistema de trenes urbanos que se caracteriza por ser un transporte masivo de pasajeros con alta capacidad y frecuencia, y separados de otros sistemas de transporte, con plataformas y vías exclusivas.

RECTIFICADOR: Elemento o circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua, utilizando dispositivos semiconductores.

SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICA: Sistema de transporte masivo basado en electricidad, en el cual la energía es entregada a los vehículos a través de la infraestructura destinada para tal fin.

TIRISTOR: El tiristor es un componente electrónico constituido por elementos semiconductores que utiliza realimentación interna para producir una conmutación. Los materiales de los que se compone son de tipo semiconductor, es decir, dependiendo de la

temperatura a la que se encuentren pueden funcionar como aislantes o como conductores.

TRANVÍA: Es el medio de transporte que se caracteriza por su tracción eléctrica y transporte de pasajeros en una ciudad. Circula sobre rieles y en áreas urbanas por las propias calles sin separación del resto de la vía o sector reservado.

TROLEBÚS: Es un bus eléctrico alimentado por una catenaria de dos cables superiores desde donde toma la energía eléctrica mediante dos astas. Es un sistema flexible que no hace uso de vías especiales o carriles en la calzada

ULTRACAPACITOR: Son dispositivos electroquímicos capaces de sustentar una densidad de energía inusualmente alta en comparación con los condensadores normales, presentando una capacidad miles de veces mayor que la de los condensadores electrolíticos de alta capacidad.

RESUMEN

Los sistemas de tracción eléctrica se han planteado como una solución al problema de movilidad de las grandes ciudades al ofrecer alternativas con una buena relación costo-beneficio y bajo impacto negativo en el medio ambiente. Al momento de diseñar estos sistemas, tales como tranvía, metro, trolebús y góndolas, no se tiene en cuenta el aporte del frenado regenerativo en la eficiencia energética del sistema, con la relevancia que este aspecto merece. De tenerse en cuenta esta variable, se podría obtener un diseño óptimo que permita reducir la capacidad instalada del sistema como el dimensionamiento de los dispositivos electrónicos, la infraestructura de la red, entre otros equipos. Un mejor aprovechamiento de la energía regenerativa se ve reflejado en menores costos operativos, de instalación, mantenimiento, y puesta en servicio. Adicionalmente, reduce el impacto ambiental que tienen dichos sistemas al reducir el consumo de energía por parte de los vehículos y demás servicios auxiliares que hacen parte del sistema de tracción.

Con el fin de establecer una metodología que permita evaluar el uso de la energía regenerativa en el diseño de sistemas de tracción, inicialmente se realiza un estudio de vigilancia tecnológica para conocer metodologías similares que se hayan planteado para la aplicación en otros casos y un levantamiento del estado del arte actual en tecnologías asociadas al control y operación de estos sistemas. Posteriormente se propone una metodología que, basándose en el principio del factor de potencia eléctrico con el cual se evalúa la relación entre la potencia que hace trabajo útil (activa) y la potencia aparente del sistema (que incluye una componente reactiva), permita establecer una analogía con los sistemas de tracción, que dé lineamientos para un adecuado diseño de los mismos, respecto a la gestión de la energía regenerativa.

El objetivo de este trabajo es plantear una metodología de evaluación de sistemas de tracción eléctrica basada en el concepto de factor de compensación regenerativo, evaluando su desempeño ante diversos casos de estudio que toman como base el diseño

del metro de Medellín y el Tranvía, los cuales fueron simulados en las herramientas computacionales OpenTrack y OpenPowerNet. Los resultados obtenidos muestran que el factor de compensación propuesto permite dar valiosas señales técnicas sobre la gestión de la energía regenerativa en el sistema como por ejemplo identificar cuando se tienen parámetros asociados a los equipos y a la operación, que no se encuentran diseñados adecuadamente, revelando posibilidades de mejoras en concepción, diseño y operación de un sistema de tracción eléctrica.

PALABRAS CLAVE: Sistema de tracción eléctrica, frenado regenerativo, factor de compensación, tren eléctrico, tranvía, OpenTrack, OpenPowerNet.

ABSTRACT

Electric traction systems have been proposed as a solution to the mobility problem of large cities by offering cost-effective alternatives with low impact on the environment. When designing these systems, such as tram, metro, trolleybus and gondola, the contribution of regenerative braking in the energy efficiency of the system is not taken into account. If this variable is considered, an optimum design could be obtained by reducing the sizing of electronic devices, network infrastructure, among others. This is reflected in lower operating costs, installation, maintenance, and commissioning. In addition, it lowers the environmental impact of such systems by reducing energy consumption of vehicles and other ancillary services that are part of the traction system. In order to establish a methodology that takes into account the regenerated energy in the design of traction systems, initially a study is carried out to identify similar methodologies that have been proposed for their application in other systems around the world. Subsequently, a methodology based on the principle of the electric power factor is proposed in which consumed and recoverable energies can establish an analogy with the traction systems.

The objective of this work is to propose a methodology of evaluation of electric traction systems based on the concept of regenerative compensation factor, evaluating its performance in various study cases carried out using Medellín's metro and tram models. These were simulated in the OpenTrack and OpenPowerNet computational tools. The results obtained show that the proposed compensation factor allows to identify parameters of the system that are not designed properly.

Keywords: Electric traction system, regenerative braking, compensation factor, electric train, tram, OpenTrack, OpenPowerNet.

INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Medellín se cuenta actualmente con sistemas de transporte masivo basados en electricidad como tranvía, metro y metrocable que son una solución sostenible a la problemática de la movilidad. Dada la acogida que ha tenido este tipo de tecnología en Colombia, debido al buen desempeño obtenido durante la operación de los sistemas que actualmente se tienen en servicio en la ciudad de Medellín, se ha visto la necesidad de evaluar nuevas metodologías que permitan realizar diseños eficientes que tengan en cuenta las diferentes dinámicas de dichos sistemas.

Debido a la similitud que se encuentra entre un sistema de corriente alterna compensado y un sistema de tracción con vehículos que implementen frenado regenerativo, surge la idea de plantear un símil del factor de potencia eléctrico aplicado a sistemas de tracción, el cual sirva como medida para evaluar que tan aprovechada esta la energía regenerativa en estos.

Por medio de simulaciones desarrolladas con las herramientas OpenTrack y OpenPowerNet, las cuales permiten modelar tanto la infraestructura de los sistemas de tracción como los parámetros de la red eléctrica, se busca analizar el comportamiento del factor de compensación propuesto ante variaciones en diferentes aspectos del sistema, con el fin de evaluar la metodología presentada.

En el capítulo 1 se dan las bases conceptuales sobre sistemas de tracción y el factor de potencia, posteriormente se presenta los equivalentes analíticos entre los sistemas de tracción y los sistemas de corriente alterna, buscando con esto definir el factor de compensación propuesto y la metodología asociada a este. A continuación, se desarrolla el caso de estudio simulado en las herramientas computacionales seleccionados del Metro y el Tranvía de Medellín y se analizan los resultados. Finalmente se presentan las propuestas para trabajos futuros y las conclusiones.

CAPÍTULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN ELÉCTRICA

En los últimos años los sistemas de transporte masivo han ido evolucionando y se han adaptado a las necesidades ambientales, sociales y tecnológicas del entorno. Con el fin de buscar alternativas limpias que contribuyan a satisfacer dichas necesidades se han venido desarrollando tecnologías que permiten la implementación de dichos sistemas reemplazando los combustibles fósiles comúnmente utilizados. Una de estas alternativas consiste en reemplazar los motores convencionales de combustión interna por motores eléctricos, lo cual trae consigo los mencionados beneficios, pero asimismo agrega complejidad debido al número de subsistemas que se requiere para su adecuado funcionamiento. De acuerdo con lo anterior, a continuación, se explicará un poco de la historia de estos sistemas y el detalle del principio de funcionamiento, sus componentes y los diferentes tipos de sistemas de tracción eléctrica.

1.1.1 Historia de los sistemas de tracción eléctrica

La electrificación de los sistemas ferroviarios como medios de tracción surgió a finales del siglo XIX, aunque experimentos en tracción eléctrica se remontan a mediados de este siglo. Thomas Davenport en Vermont construyó el primer sistema de rieles circular energizado mediante baterías en 1834.

Robert Davidson en Escocia creó la primera locomotora eléctrica en 1839 y la puso en funcionamiento en el trayecto entre Edinburgh y Glasgow a 4 millas por hora. En 1880 Thomas Edison construyó un pequeño sistema de tracción eléctrico usando un dinamo como motor, el cual había sido inventado el año anterior, y los rieles como el medio de transporte de la corriente la cual fluía a través de los rines de metal que anteriormente eran de madera.

Posteriormente en 1912 se implementó el primer sistema de tracción eléctrica en Chicago que corrió en paralelo a dos sistemas de tracción de vapor. Esta línea era propiedad de Commonwealth Edison Company y era solamente utilizada para transportar carga. Este sistema de tracción tenía una longitud de una milla, se componía de 4 locomotoras eléctricas y estuvo operativo entre los años 1912 y 1970. En la Figura 1 se puede visualizar el trayecto de este sistema y uno de los vehículos que lo componía.

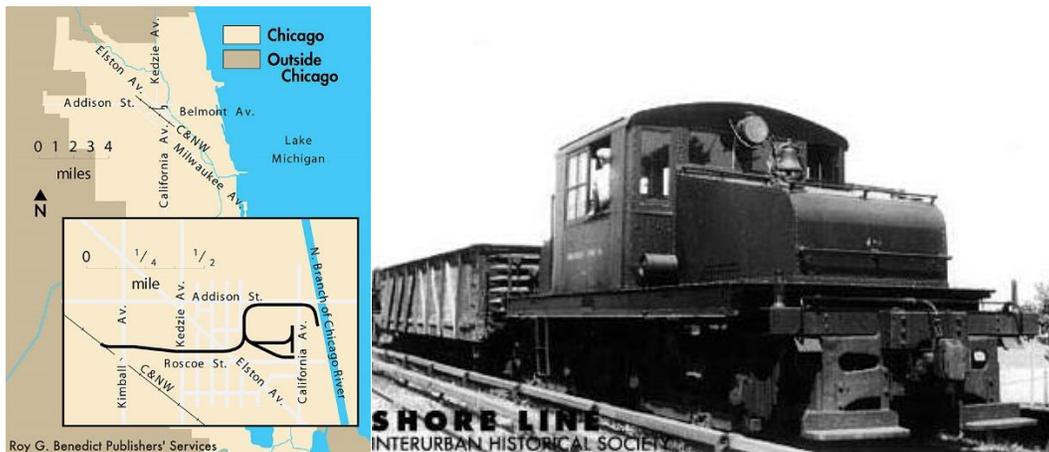


Figura 1. Primer sistema de tracción eléctrica (Chicago). (Andersen, 2007)

La tracción eléctrica ofrecía varios beneficios sobre la tracción de vapor (predominante en la época), particularmente en cuanto a la rápida aceleración (ideal para servicios urbanos) y la potencia, ideal para cargas pesadas que eran llevadas a través de trayectos montañosos. (Andersen, 2007).

1.1.2 Descripción de un sistema de tracción

Un sistema de tracción eléctrica suministra energía eléctrica a los vehículos (metros, tranvías, entre otros) para que puedan operar sin un sistema a bordo que le proporcione la fuerza motriz necesaria. Hay diversos sistemas de tracción eléctrica alrededor del mundo. Estos ofrecen diversas ventajas respecto a los sistemas de tracción convencionales, pero requieren una inversión de capital significativa para su instalación.

La principal ventaja de un sistema de tracción es su elevada tasa de potencia con relación al peso, la cual supera la tasa en sistemas de tracción con la fuente de energía a bordo, tales como *diesel* y vapor. Adicionalmente estos sistemas permiten alcanzar en menor tiempo una aceleración elevada y proporcionan más fuerza de tracción en tramos con pendiente elevada. En vehículos equipados con frenado regenerativo, los tramos en descenso requieren poco uso de los frenados de aire dado que los motores del vehículo se convierten en generadores que entregan energía al sistema de suministro o a resistencias a bordo que convierten este exceso de energía en calor.

Otras ventajas de estos sistemas es que no requieren de tubos de escape, generan menos ruido y requieren de menos mantenimiento que los sistemas de tracción convencionales. Además, producen menos emisiones de carbón que los trenes de *diesel* especialmente en países donde la electricidad es producida a través de fuentes renovables.

Las principales desventajas son los elevados costos del equipo necesario para la implementación de estos sistemas especialmente para líneas de larga distancia con poco tráfico de pasajeros. Por esta razón, las áreas urbanas con estaciones cercanas entre si y alto tráfico de pasajeros son las óptimas para este tipo de tecnología.

Clasificación de los sistemas de tracción de acuerdo con las características de la red

Los sistemas de tracción pueden ser clasificados por tres parámetros (Frey, 2012):

- Nivel de tensión
- Tipo de alimentación (corriente alterna o corriente directa)
- Sistema de contacto (tercer riel o catenaria)

Nivel de tensión

Seis de los niveles de tensión más utilizados han sido seleccionados por estándares europeos; estos son independientes del sistema de contacto que se use. Los rangos de tensión permitidos están definidos en el estándar BS EN 50163 y IEC 60850 y tienen en cuenta el número de trenes que componen el sistema y la distancia de estos respecto a la subestación de tracción como se muestra en la Tabla 1

SISTEMA DE ELECTRIFICACIÓN	UMBRAL INFERIOR – TENSIÓN TRANSITORIA	UMBRAL INFERIOR – TENSIÓN PERMANENTE	TENSIÓN NOMINAL	UMBRAL SUPERIOR – TENSIÓN PERMANENTE	UMBRAL SUPERIOR – TENSIÓN TRANSITORIA
600 V DC	400 V	400 V	600 V	720 V	800 V
750 V DC	500 V	500 V	750 V	900 V	1 kV
1500 V DC	1000 V	1000 V	1500 V	1800 V	1950 V
15 KV AC, 16.7 HZ	2 KV	2 KV	3 KV	3 KV	3 KV
15 KV AC, 16.7 HZ	11 KV	12 KV	15 KV	17.25 KV	18 KV
25 KV AC, 50 HZ	17.5 KV	19 KV	25 KV	27.5 KV	29 KV

Tabla 1. Rangos de tensión permitidos de acuerdo con estándar IEC 60850. (Frey, 2012)

Tipo de alimentación

Corriente directa

Los primeros sistemas de tracción eran energizados por sistemas de corriente directa de bajo nivel de tensión. Los motores eléctricos eran alimentados directamente de la fuente de tracción y eran controlados mediante una combinación de resistencia y relés que conectaban los motores en serie o paralelo. Los niveles de tensión más comunes eran 600V y 750V para tranvías y metros, y 1500V para líneas de largas distancias. En los niveles de tensión más bajos comúnmente se utilizan sistemas de contacto de tercer o cuarto riel, mientras que en tensiones superiores a 1kV normalmente se utilizan sistemas aéreos por cuestiones de seguridad.

Durante mediados del siglo XX, convertidores rotativos y rectificadores de mercurio eran utilizados para convertir la corriente alterna (AC) en corriente directa (DC). Actualmente esta conversión se realiza mediante rectificadores de silicio una vez se reduce la tensión de la red principal.

Los sistemas de directa requieren de cables de mayor calibre debido a las altas corrientes que se generan en estos, lo cual lleva a unas pérdidas resistivas

mayores, por ejemplo, en el reino unido, la corriente máxima que puede ser consumida por un tren es 6800A a 750V. Las estaciones de alimentación son monitoreadas constantemente y solo permiten un tren por sección. La distancia máxima que puede haber entre dos estaciones de alimentación es de 2.5km. Comparativamente, en el sistema de 3kV la distancia máxima es de 25km.

Si se requiere alimentar servicios auxiliares como ventiladores y compresores directamente de la fuente de tracción estos deben ser más grandes debido al aislamiento extra que requieren por la alta tensión de operación. Por otra parte, pueden ser alimentados de un generador a bordo que también sirve para alimentar las fuentes de iluminación interna del vehículo, las cuales de ser alimentadas de la fuente de tracción requerirían resistencias en serie lo cual las haría poco óptimas. Actualmente se utilizan convertidores de estado sólido y luces fluorescentes para este fin. (Frey, 2012)

Corriente alterna

Estos son los sistemas de tracción cuya infraestructura está compuesta por líneas aéreas. La corriente alterna puede ser transformada en niveles de tensión inferiores al interior de cada vehículo, lo cual permite tensiones más altas en la red y por lo tanto corrientes menores a lo largo de las líneas, lo cual implica pérdidas menores de energía. (Rashid, 2010)

- **Corriente alterna de baja frecuencia:** En estos sistemas los motores de tracción son alimentados a través de un transformador con múltiples taps. Cambiando los taps se logra variar la tensión del motor sin necesidad de instalar resistores que disipen el exceso de potencia; los servicios auxiliares son alimentados por fuentes de tensión separadas del devanado principal del transformador. Estos sistemas usaban motores de directa que podían ser utilizados con alterna (motor universal), dado que invertir la corriente tanto del estator como del rotor no cambia la dirección del torque. Sin

embargo, la inductancia de los devanados hizo que los primeros diseños de grandes motores fueren poco prácticos a las frecuencias de distribución estandarizadas, por lo que se requería bajar a frecuencia en el rango de 15 a 30Hz. Sin embargo, la presencia de corrientes parasitas en los motores y la complejidad de los sistemas necesarios para cambiar el valor de la frecuencia, hizo que esta tecnología fuese quedando en desuso. Desde 1979 el motor de inducción trifásico se ha convertido en el tipo de motor más utilizado para este tipo de sistemas, este es alimentado por un convertidor que suministra una tensión constante a un inversor modulado por ancho de pulso que le suministra la frecuencia variable a los motores trifásicos. La principal complejidad de sistemas trifásicos es la necesidad de instalar tres conductores (incluidos los rieles), por lo que se requieren dos conductores aéreos. Los primeros vehículos que utilizaron esta tecnología usaban un colector en forma de arco que cubría los dos cables aéreos, pero los vehículos modernos utilizan un sistema de pantógrafo, el cual funciona bien a una velocidad máxima de 30km/h.

- **Corriente alterna a frecuencia estandarizada:** En la década de los 50, tras el desarrollo en Francia y la antigua Unión Soviética se generalizó el uso sistemas monofásicos de corriente alterna con frecuencia estandarizada. Hoy en día estos sistemas de tracción usan un conjunto de transformador y rectificador para proporcionar la corriente directa necesaria para los motores. La velocidad es controlada conectando y desconectando taps en el transformador. Los vehículos más sofisticados utilizan tiristores o IGBTs para producir frecuencia variable de corriente alterna la cual es posteriormente suministrada a los motores de tracción de inducción. Este sistema es muy económico, pero también tiene sus desventajas: las fases de la fuente externa tienen cargas diferentes y por lo tanto hay una

interferencia electromagnética significativa, además de contaminación acústica.

En la Figura 2 se presenta el diagrama completo de un sistema de tracción con sus componentes eléctricos y mecánicos para los diferentes tipos de sistema de transporte masivo movido por electricidad, donde:

1. Transformador de acople a la red.
2. Subestación de tracción.
3. Rectificador AC/DC o conversor de frecuencia (según el tipo de alimentación del sistema).
4. Línea aérea.
5. Metro
6. Trolebús
7. Tranvía
8. Tercer riel
9. Riel (contacto de retorno)
10. Ultracapacitor.
11. Batería.

Sistema de contacto

Tercer riel

La mayoría de sistemas de tracción utilizan líneas aéreas, pero la opción de un tercer riel puede ser implementada hasta tensiones de 1200V. Aunque el uso de un tercer riel no requiere del uso de corriente directa en la práctica todos los sistemas que usan este tipo de contacto son de CD porque pueden transportar un 41% más de potencia que un sistema de alterna operando a la misma tensión pico.

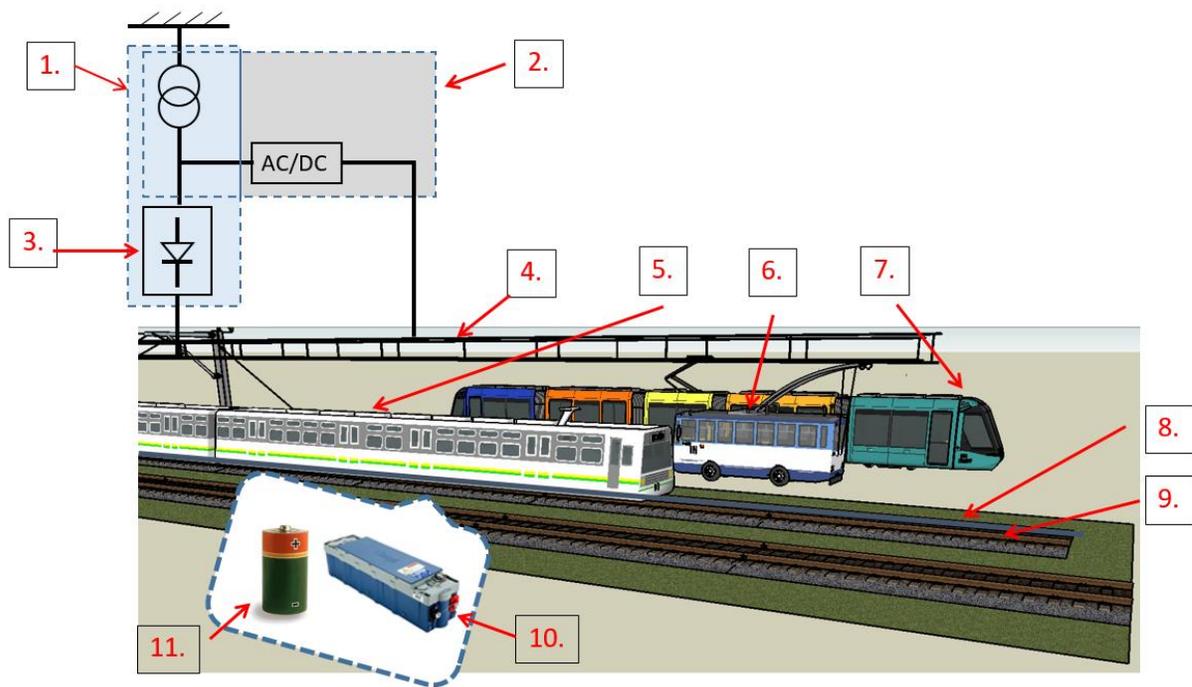


Figura 2. Diagrama completo de un sistema de tracción.

El tercer riel es más compacto que las líneas aéreas y puede ser utilizado en túneles de pequeño diámetro lo cual es un factor importante para sistemas subterráneos. Estos sistemas pueden ser diseñados con un contacto superior, lateral o inferior. El contacto superior es el menos seguro dado que este está expuesto a las personas que pasan cerca al carril, a menos que este sea recubierto por un material aislante, adicionalmente son más susceptibles a interferencias ambientales (nieve, hojas entre otras).

Los sistemas de DC con tercer riel son limitados a tensiones bajas lo cual limita el tamaño, velocidad y servicios auxiliares de los trenes. En la práctica la velocidad máxima que alcanzan estos vehículos es 160km/h, porque por encima de esta velocidad no se puede asegurar el contacto entre el vehículo y el riel. Algunos tranvías utilizan sistema de tercer riel el cual está instalado bajo tierra y hace contacto a través de una pequeña ranura en la carretera. En Estados Unidos la

mayoría de tranvías (por ejemplo en Washington) son operados de este modo para evitar el impacto visual que produce un sistema de tracción cableado.

Cuarto riel

El sistema subterráneo de Londres en Inglaterra es una de las pocas redes de tracción que usan el sistema de cuarto riel. Este riel adicional es el conductor de retorno que en sistemas de tercer riel y de líneas aéreas va por los rieles de conducción.

Este esquema fue introducido por los problemas de las corrientes de retorno que en lugar de ser transportadas por los rieles aterrizados fluían a través de la estructura de hierro del túnel. Esto puede causar daño electrolítico e incluso arco si los segmentos del túnel no están eléctricamente acoplados. Este problema era aún más grave porque las corrientes de retorno tenían la tendencia de fluir a través de las tuberías de hierro que conformaban el sistema de acueducto y gas.

El sistema de cuarto riel soluciona esto dado que crea un punto a tierra artificial, el cual es derivado a partir de una conexión que usa múltiples resistencias en serie lo cual mantiene las corrientes parasitas en otros circuitos al mínimo.

En algunas líneas del metro de París en Francia también operan con sistema de cuarto riel pero por razones diferentes a las expuestas anteriormente. Dado que las llantas de estos vehículos están hechas de caucho y corren sobre rieles de acero y en algunos segmentos, concreto, no es posible que las llantas puedan conducir las corrientes de retorno por lo que se usa un sistema de cuarto riel para poder conducir la corriente en estas zonas.

Líneas aéreas

En ferrocarriles se denomina catenaria a la línea aérea de alimentación que transmite energía eléctrica a las locomotoras u otro material motor. En las líneas aéreas, el polo positivo de la instalación es normalmente la catenaria y el negativo son los carriles sobre los que circula el tren. Las corrientes provenientes de la

subestación de tracción (transformadora o rectificadora de la tensión de la red general) llegan al tren por la catenaria a través del pantógrafo y vuelven a la subestación a través de los carriles de la vía férrea. (Montesinos Ortuño, 2002)

Hay varios tipos de líneas aéreas de contacto para ferrocarriles y otros vehículos de tracción eléctrica:

- **Línea tranviaria:** La línea tranviaria es la más sencilla de las aplicaciones de este tipo. Consiste en un hilo de contacto suspendido en apoyos consecutivos sobre la vía férrea. El tren toma energía de este hilo a través de un pantógrafo o de un trole.
- **Líneas de trolebús:** Las líneas de trolebús son una derivación de las líneas tranviarias, consistiendo la diferencia fundamental de las mismas en que debe existir un segundo hilo, paralelo al primero, para el retorno de la corriente (negativo).
- **Catenaria aérea flexible:** La catenaria flexible consiste en dos cables principales, de los cuales el superior tiene aproximadamente la forma de la curva conocida como catenaria y se llama "sustentador"; en algunos países hispanohablantes se denomina también "cable portador" o "cable mensajero". Mediante una serie de elementos colgantes (péndolas) sostiene otro cable, el de contacto, llamado hilo de contacto, de modo que permanezca manteniéndose en un plano paralelo al plano de las vías. A veces hay un tercer cable intermedio para mejorar el trazado del de contacto, al que se suele llamar "falso sustentador" o "sustentador secundario".
- **Catenaria aérea rígida:** La catenaria rígida se distingue de las otras en que el elemento que transmite la corriente eléctrica no es un cable, sino un carril rígido. Lógicamente para mantener este carril rígido paralelo a la vía, ya que su peso es muy grande, no basta tensarlo o suspenderlo de otro cable con más

flecha, sino que es necesario aumentar el número de apoyos en los que hay que suspenderlo, para disminuir la distancia entre ellos.

1.1.3 Tipos de sistemas de tracción

Según las condiciones del entorno donde se desea instalar la solución de transporte eléctrico masivo, existen varios tipos de tecnologías que pueden ser seleccionadas. Estas son descritas a continuación.

Góndola o metro cable

Una góndola es un tipo de vehículo aéreo que usa una o dos cuerdas estacionarias como soporte mientras una tercera cuerda proporciona el mecanismo de propulsión. Con esta forma de desplazamiento el gancho de una cabina de un teleférico eléctrico esta fija a la cuerda de propulsión y no puede ser desacoplada durante la operación.

Un motor eléctrico se encarga de desplazar la cuerda de propulsión. Las góndolas son construidas como sistemas continuos, es decir que tienen una cuerda que se mueve continuamente y circula a través de dos estaciones terminales. Otro tipo de sistema similar es el tranvía aéreo en el que los vehículos van de un extremo a otro del sistema propulsados por un cable cerrado que se termina y cambia de dirección cuando la cabina llega a las estaciones terminales.

En la Ciudad de Medellín se implementó en el año 2004 el primer sistema de Góndolas llamado Metro Cable, Figura 3, este fue diseñado para solucionar los problemas de movilidad que se presentaban en las zonas suburbanas menos desarrolladas de la ciudad que además tenía la característica montañosa de alta pendiente. Este es considerado el primer sistema de Góndolas en Sur América, y está en constante expansión; para 2010 el sistema consta de dos líneas adicionales y se esperan otras dos para 2017.

Los vehículos de este sistema tienen una velocidad promedio de 16km/h y las tres líneas operativas a 2016 suman una extensión total de 9.37km.



Figura 3. *Medellín Metrocable Línea J. (Dale, 2016)*

Tranvía

Un tranvía es un vehículo sobre rieles que se desplaza a lo largo de vías públicas o en ocasiones a lo largo de un trayecto separado de la vía pública. Los tranvías son alimentados por electricidad, aunque los primeros prototipos de estos sistemas implementados en estados unidos usaban otras fuentes de tracción. Los vehículos de los tranvías suelen ser más pequeños y ligeros que los usados en líneas de tren convencionales. Estos vehículos están equipados con un pantógrafo u otro sistema de colección de energía y pueden ser encontrados en algunas regiones con fuentes de energía híbridas. Entre sus principales ventajas esta la eficiencia en el uso de la vía pública (un vehículo de tranvía puede reemplazar hasta 40 vehículos tradicionales), es más eficiente y tiene costos de operación menores, tienen un tiempo de vida útil mayor. Sus principales desventajas están en los peligros que supone para los peatones y ciclistas (estos últimos debidos a que las llantas de las bicicletas se pueden atorar en los rieles), el incremento en accidentes de tránsito y a niveles moderados de ruido de baja frecuencia.

Tren eléctrico

Es un vehículo alimentado por electricidad desde líneas aéreas, desde un tercer riel o un dispositivo almacenador de energía a bordo del vehículo (tales como batería o ultracapacitor). A los trenes impulsados por electricidad con sistemas motores a bordo

impulsados por combustible como las turbinas de *diesel* o gas, son conocidos como trenes híbridos, dado que el motor eléctrico es utilizado como sistema de transmisión de potencia. Por otro lado, en los trenes eléctricos la electricidad es utilizada para energizar los motores que le da la fuerza motriz al vehículo lo cual implica que emiten menos gases a la atmósfera y son más eficientes que los trenes tradicionales.

Una ventaja de electrificar sistemas de trenes es la disminución en la contaminación de los vehículos. La electrificación también resulta en mayor desempeño, menos costo de mantenimiento y menos costo energético. Las centrales de generación, aun cuando generan energía a partir de combustibles fósiles, generan en conjunto menos gases contaminantes que las fuentes móviles de los vehículos que funcionan con combustible. Adicionalmente la potencia usada por los trenes eléctricos puede provenir de fuentes limpias o renovables como la energía geotérmica, hidroeléctrica, solar y eólica. Los trenes eléctricos además son más silenciosos que los trenes a base de combustible, dado que no hay ruido proveniente del tubo de escape y menos ruido mecánico. Adicionalmente pueden tener un incremento de potencia instantáneo mucho mayor a la de los trenes a base de combustible, alcanzando de esta forma aceleraciones altas en poco tiempo.

Los trenes eléctricos se benefician de la alta eficiencia de los motores eléctricos, la cual típicamente se encuentra por encima del 90%. Eficiencia adicional puede ser obtenida a partir del frenado regenerativo, el cual permite que la energía cinética sea recuperada durante el proceso de frenado para devolver algo de potencia a la línea. Los trenes modernos usan un sistema de inversión de AC para proporcionar este frenado regenerativo.

La principal desventaja de la electrificación es el costo de la infraestructura (líneas aéreas, tercer riel, subestaciones de tracción, sistemas de control). En estados unidos se imponen elevados impuestos en líneas electrificadas, y su regulación referente a trenes a base de combustible es mucho más laxa que la regulación asociada a vehículos eléctricos, debido a que la mayoría de redes de tracción eléctrica son para uso privado. En Europa las redes de

tracción son consideradas parte de la infraestructura del transporte nacional, al igual que las calles, autopistas y canales y por lo tanto son financiadas por el estado. Esto facilita las grandes inversiones que se requieren para la electrificación de estos sistemas, los cuales a largo plazo tienen grandes impactos positivos económicos y técnicos.

Trolebús

Un Trolebús es un bus eléctrico que extrae energía de cables aéreos (generalmente suspendidos de los postes de la calle) usando poleas. Dos pares de cable y polea se requieren para completar el circuito eléctrico. Esto los diferencia de un tranvía dado que este utiliza el riel como trayecto de retorno requiriendo solamente un cable y una polea o pantógrafo. También difieren de los buses eléctricos, dado que estos últimos reciben su nombre porque reciben su energía de baterías.

La potencia de estos sistemas comúnmente es suministrado a tensiones de 600V de corriente directa, pero existen ciertas excepciones a este estándar.

Actualmente existen alrededor de 300 sistemas de Trolebús en operación en 43 países. En total han existido más de 800 sistemas de Trolebús, pero no más de 400 concurrentes.

Entre las ventajas de estos sistemas se encuentran:

- Comparado con los tranvías, la instalación de la infraestructura requerida por un Trolebús es mucho más económica dado que no requiere de rieles o estaciones adicionales para subida o descensos de pasajeros
- Las llantas de goma de los Trolebús tienen una mayor adhesión que las llantas de acero de los tranvías, dándoles mayor capacidad para subir pendientes y para frenar
- A diferencia de los tranvías, los vehículos pueden ser desplazados hacia los laterales de la línea aérea siempre que la polea lo permita, esto les da mayor maniobrabilidad ante situaciones de tráfico denso

- Los Trolebús suelen ser más silenciosos que los Tranvías y pueden ser operados más fácilmente dado que su control es similar a los buses tradicionales

Por otro lado, entre las desventajas se encuentra:

- Comparado con los tranvías los Trolebús requieren de mayor control dado que el conductor debe darle dirección al vehículo.
- Las llantas de goma de estos vehículos tienen un mayor coeficiente de fricción, lo cual reduce su eficiencia energética
- Comparado con los buses tradicionales presentan inconvenientes a la hora de replantear las rutas que estos siguen, dado que estos están sujetos a la infraestructura previamente construida
- Estéticamente la cantidad de cables aéreos requeridos producen una mayor congestión visual

En la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, en el año 2014, se realizó la implementación de un piloto de trolebús moderno en el campus Universitario, el cual consistió en un circuito de 400m, cuyo diseño de la fuente rectificadora fue realizado directamente por el grupo T&D de la UPB. Consistió en un transformador de 112,5 kVA, un puente rectificador de seis pulsos de onda completa con una salida en corriente directa de 647 V y 166 A.

El trolebús utilizado en el circuito implementado en la Universidad Pontificia Bolivariana, mostrado en la Figura 4, es de fabricación bielorrusa, marca Belkommunmash, modelo BKM 42003. Tiene una longitud de 12 metros, catalogándose en la categoría de buses padrones, y su altura con respecto al suelo es de 20 cm estando inclinado para recoger pasajeros en la estación, y de 35 cm cuando está en circulación, lo que lo convierte en un bus de piso bajo. Su sistema de tracción es Skoda, y cuenta con un sistema de respaldo energético a batería que le permite operar en cortos trayectos sin conexión a la catenaria. El motor del bus tiene una potencia de 180 kW. Su peso en vacío es 10.9 toneladas, muy liviano si se compara con el bus a batería que llegó recientemente a Bogotá de 13.8 T,

siendo el sobrepeso causado por las baterías, que es de 2.9 T. Si se desea respetar un peso máximo de 18 T, la capacidad de carga de pasajeros es de 62 pasajeros para el bus eléctrico de batería y de 105 pasajeros para el trolebús con respaldo a batería. Si se asume un consumo de energía idéntico para ambos de 1.2 kWh/km, el consumo por pasajero resulta siendo de 19.4 Wh/pasajero para el bus a batería, y de apenas 11.5 kWh/pasajero para el Trolebús, que es casi la mitad. (Hincapie, 2012)



Figura 4. Trolebús UPB.

Con el piloto realizado se realizaron algunas medidas de las cuales se encontró que, en promedio, el bus consume algo más de 1kWh/km, lo que se encuentra dentro de los promedios reportados por los operadores de esta clase de sistemas. Cabe anotar que, en topografías más agrestes, como las que normalmente se encuentran en Medellín, este consumo puede aumentar un 75% por kilómetro.

1.2 ESTADO DEL ARTE EN SISTEMAS DE TRACCIÓN

En esta sección se realizará una vigilancia tecnológica del tema a tratar para evaluar la pertinencia del tema en la actualidad. También sobre los diferentes subsistemas que componen un sistema de tracción, explicando el funcionamiento de cada uno de estos y sus avances tecnológicos actuales.

1.2.1 Vigilancia tecnológica

En la herramienta SCOPUS se realizaron ecuaciones de búsqueda para determinar las áreas de impacto del tema de tracción eléctrica y su evolución en los últimos años, con el objetivo de identificar los avances relacionados con los temas de interés para este estudio. En la Figura 5 se puede apreciar cómo desde el año 2000 aproximadamente, se ha presentado una creciente tendencia en la investigación y publicación de documentos relacionados con la tracción eléctrica, lo que indica que es un tema vigente de interés mundial.

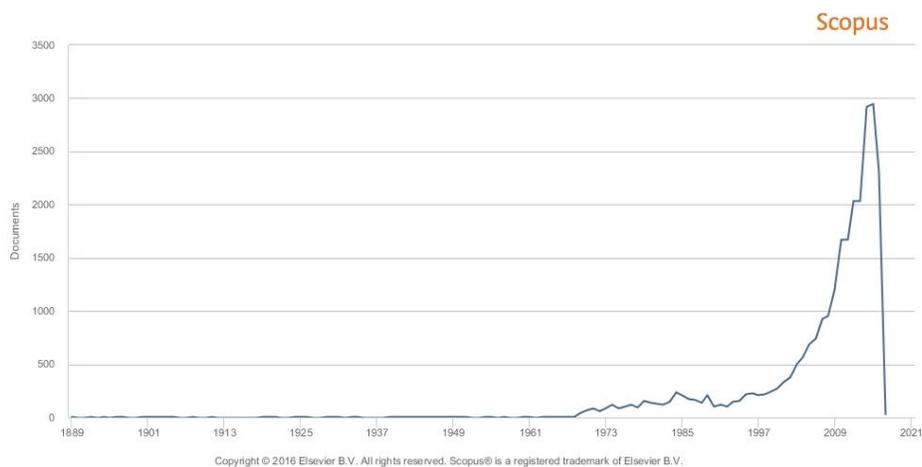


Figura 5. Vigilancia tecnológica: Publicaciones tracción eléctrica.

También, se muestra en la Figura 6 y Figura 7 otros resultados obtenidos de la vigilancia tecnológica tales como los tipos de publicaciones relacionados con el tema y las áreas de interés en este tipo de publicaciones.

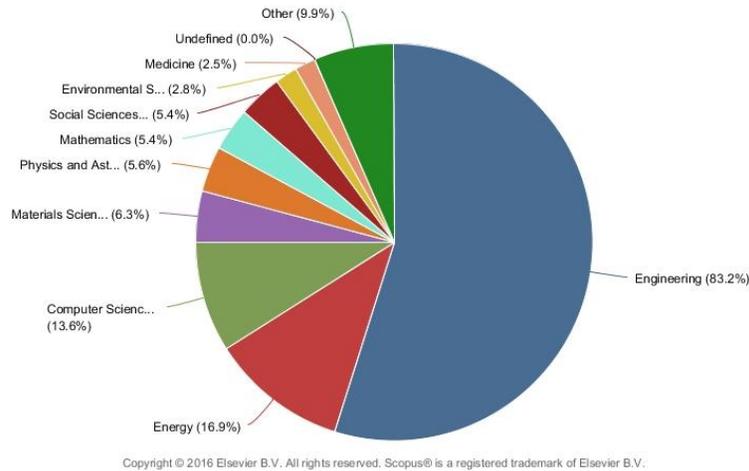


Figura 6. Vigilancia tecnológica: áreas de interés, tracción eléctrica.

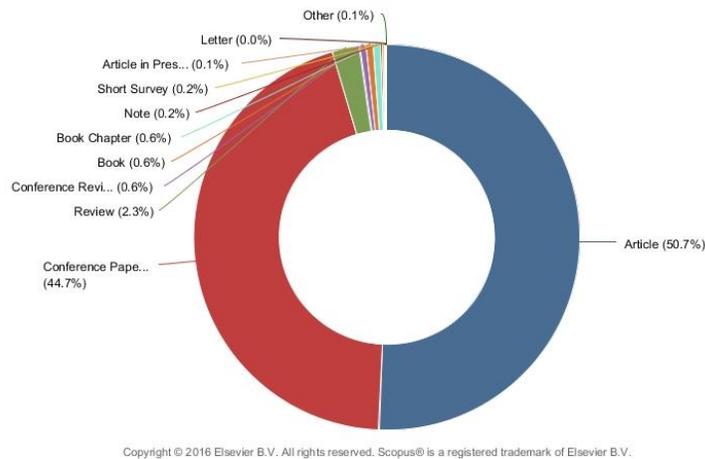
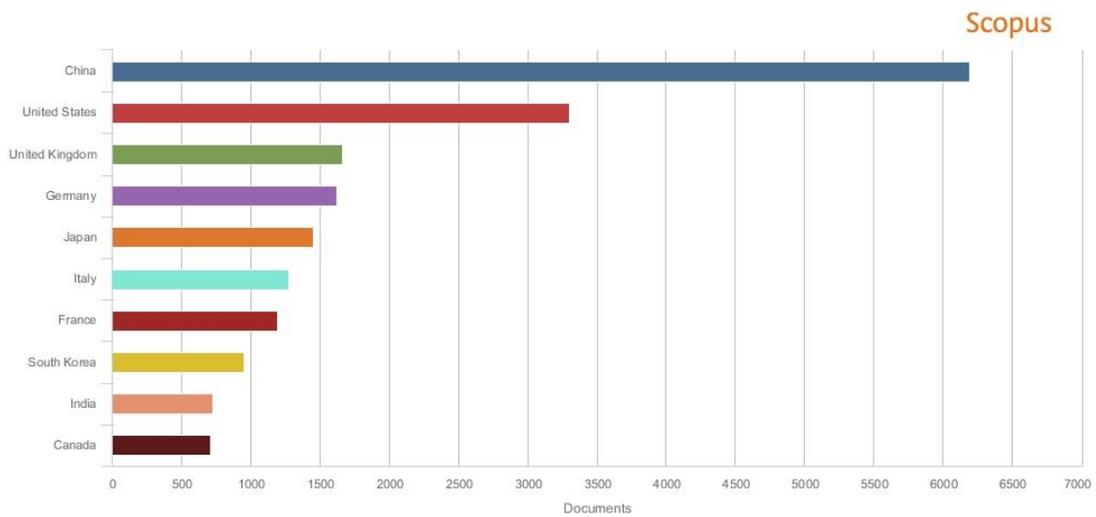


Figura 7. Vigilancia tecnológica: tipo de publicaciones, tracción eléctrica.

En la Figura 8 se presenta los países en donde más se han realizado publicaciones referentes a la tracción eléctrica, como se puede apreciar la mayor cantidad de publicaciones provienen de países que son potencia mundial y grandes desarrolladores de tecnología como lo son China, Estados Unidos y Canadá.



Copyright © 2016 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Figura 8. Vigilancia tecnológica: Países que han realizado publicaciones sobre la tracción eléctrica.

1.2.2 Tipos de tecnología utilizada en sistemas de tracción

1.2.1.1. Acople del sistema de tracción a la red eléctrica

A continuación, se describen las diferentes tecnologías utilizadas en el acople de la red de distribución al sistema de tracción según sus tipologías más características.

- a) Sistemas de tracción a alta velocidad a 25kV y 50 Hz
- b) Sistemas de 15 kV y 16.7 Hz
- c) Sistemas de 3kV, 1.5kV o 750V DC

Para cada tipología, su caracterización se subdivide en:

- Interfaz con la red externa
- Subsistema de suministro de potencia de tracción y línea de tracción

a) Estos sistemas suelen ser utilizados en sistemas de tracción de alta velocidad.

Comparado con los sistemas de directa y de tensiones menores de alterna, este presenta una ventaja económica, dado el reducido número de subestaciones de tracción que se requieren.

En estos sistemas, las subestaciones de tracción normalmente son conectadas a la red principal de distribución; normalmente no se suelen implementar ciclos dentro de la red de distribución para interconectar subestaciones adyacentes.

Los subsistemas que componen este tipo de red de tracción son:

- Transformadores para reducir el nivel de tensión de la línea proveniente de la red de distribución al nivel del sistema de catenarias
- Breakers para proteger el equipo de las subestaciones de tracción
- Sistema aéreo de catenarias que incluyen el cable de contacto y el cable mensajero
- Cable de alimentación aéreo
- Circuito de aterrizamiento y de retorno que incluye los rieles sobre los que transita el vehículo

b) Estos subsistemas constan de los siguientes elementos:

- Sistema de conversión que modifica el nivel de tensión, la frecuencia y el número de fases entre la red pública y las catenarias.
- Transformadores auxiliares que son operados a la frecuencia nominal del sistema
- Autotransformadores que se utilizan para controlar las corrientes de retorno
- Impedancias armónicas que mitigan la propagación de armónicos. Estos son utilizados principalmente como filtros activos

En el diagrama de la Figura 9 se muestra la distribución general de una subestación de conversión típica:

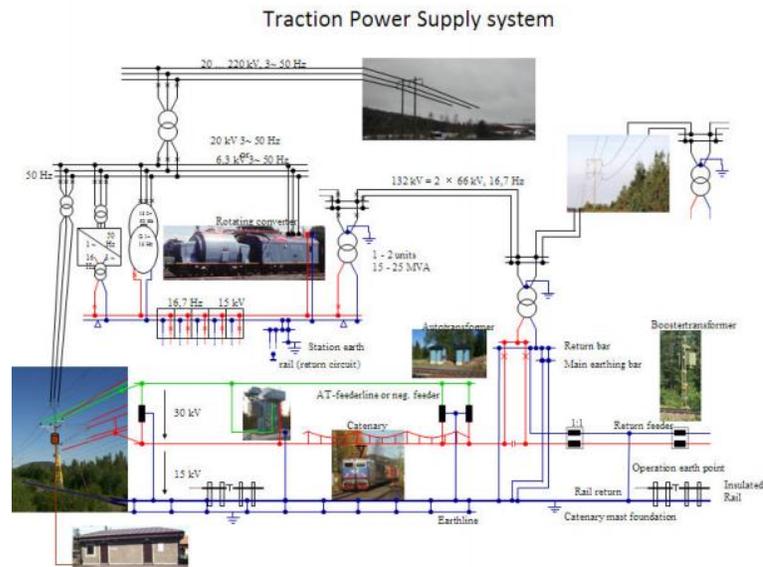


Figura 9. Configuración sistema de tracción con reducción de frecuencia. (Facchinetti, 2013)

Un cambiador de frecuencia o convertidor de frecuencia es un dispositivo electrónico o electromecánico que convierte corriente alterna (CA) de una frecuencia a corriente alterna de otra frecuencia.

Tradicionalmente, estos dispositivos eran máquinas electromecánicas llamadas conjunto motor-generador. También se usaron dispositivos con rectificadores de arco de mercurio o tubos de vacío. Con la llegada de la electrónica de estado sólido, se ha hecho posible construir cambiadores de frecuencia completamente electrónicos. Estos dispositivos usualmente consisten en una etapa rectificadora (que produce corriente continua) la cual es invertida para producir CA de la frecuencia deseada. El inversor puede usar tiristores, IGCTs o IGBTs. Si se desea una conversión de tensión, normalmente se incluirá un transformador en los circuitos de entrada o salida de corriente alterna y este transformador también puede proporcionar un aislamiento galvánico entre los circuitos de entrada y salida de corriente alterna. También se puede añadir una batería al circuito de cc para

mejorar el paseo del convertidor de interrupciones breves en la potencia de entrada.

c) La principal ventaja de un suministro de directa es que la caída longitudinal de tensión a lo largo de la catenaria solo se debe a la resistencia de los conductores dado que la reactancia inductiva siempre es cero. Adicionalmente, la potencia principal para las cargas de tracción es suministrada de la red pública a través de las subestaciones de tracción sin desbalancear la carga a través de las fases, dado que la potencia que se suministra es de directa, las subestaciones pueden estar conectadas de forma paralela a través de la línea disminuyendo así las caídas de tensión. Los principales componentes de las subestaciones de tracción de este tipo de sistemas son:

- Transformadores que reducen el nivel de tensión
- Sistemas de rectificación
- Interruptores de desconexión

En la Figura 10 se presenta el diagrama de la citada configuración:

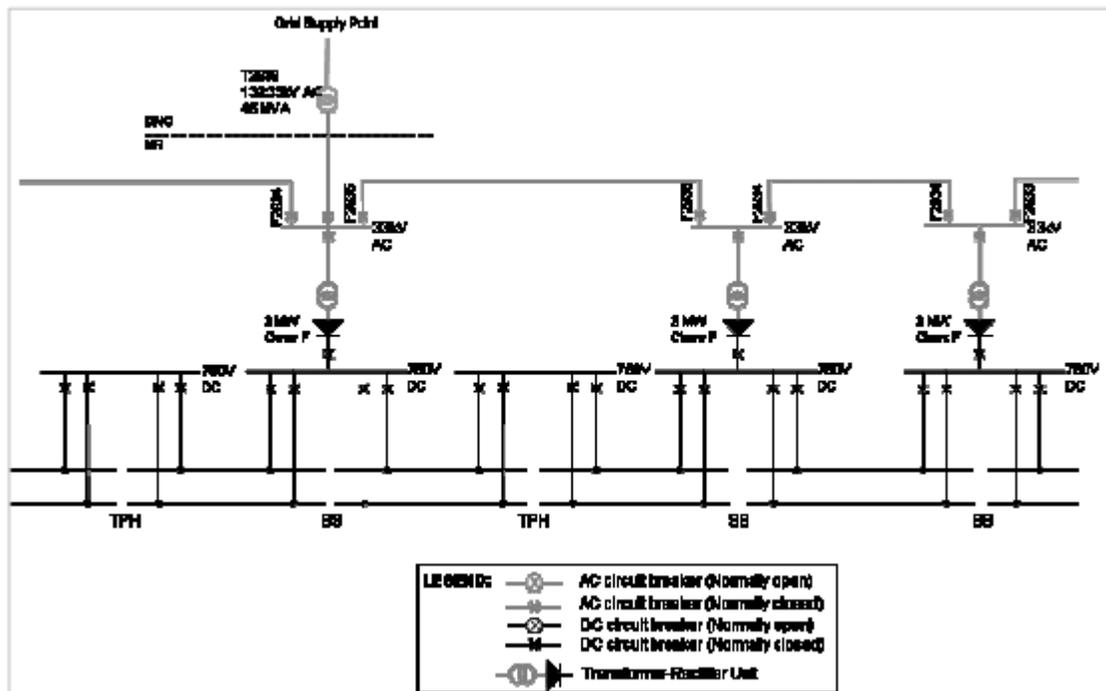


Figura 10. Configuración sistema de tracción con conversión AC/DC. (Facchinetti, 2013)

1.2.1.2. Frenado regenerativo

El frenado regenerativo posibilita la reutilización de la energía consumida por el tren para otros fines, que van desde la alimentación de los sistemas auxiliares a la eventual venta de energía por parte del sistema.

Los motores de tracción eléctrica presentan un comportamiento de generadores durante el proceso de frenado, ya que cuando un tren se encuentra en el proceso de reducir su velocidad para parar, el sentido de la potencia eléctrica en los dispositivos de tracción se invierte, permitiendo la conversión de energía cinética en energía eléctrica. Cuando la energía del frenado regenerativo regresa al sistema de forma natural causa sobretensiones en la red, de tal forma que esta energía puede ser aprovechada eventualmente cuando otro tren la requiera. (López)

En la actualidad el proceso de frenado regenerativo presenta unas etapas identificables que se presentan en la Figura 11.

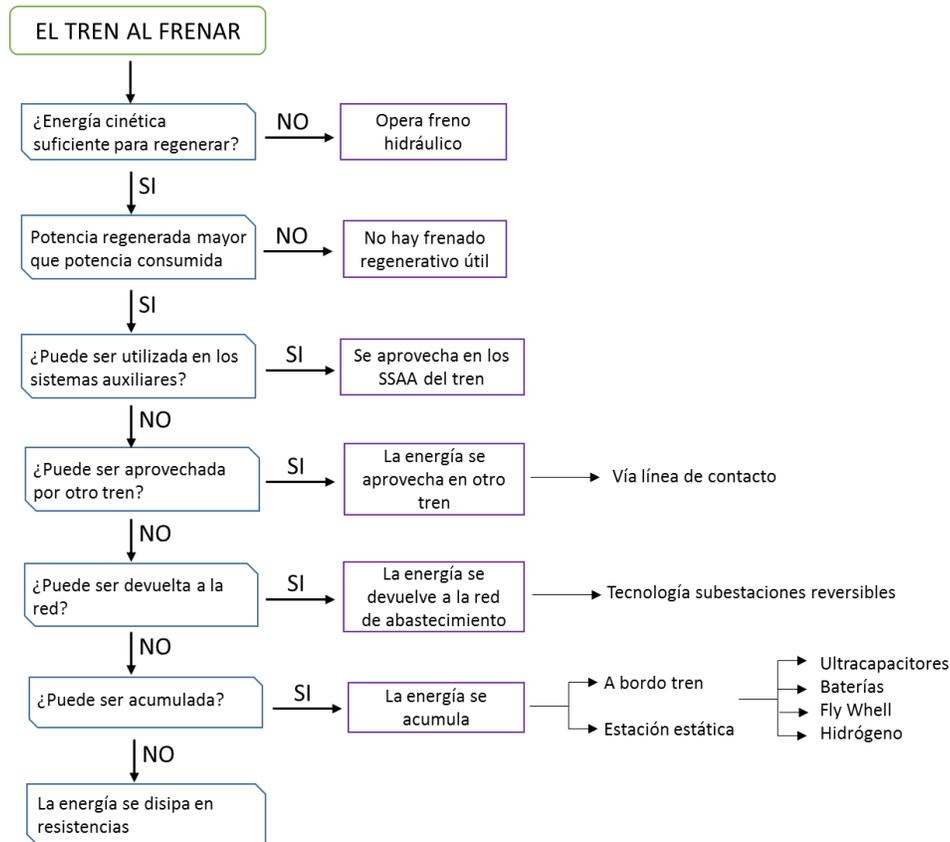


Figura 11. Principio de funcionamiento del frenado regenerativo

Como se evidencia en la Figura 11, para el aprovechamiento de la energía de frenado se tienen diferentes técnicas para incrementar la eficiencia energética, buscando evitar el transporte de la energía en tanto sea posible, entendiendo que este transporte implica pérdidas en los distintos elementos requeridos para el mismo (López A. , 2013). Para este fin se tienen las siguientes alternativas:

Servicios auxiliares: La potencia empleada para la tracción del tren y la energía consumida por los servicios auxiliares (aires acondicionados, iluminación, sistemas de sonido, equipos electrónicos etc.) hace parte de la potencia útil del tren, entendiéndose por potencia útil un reflejo de la energía que se consume en la

subestación de tracción. Una parte de los servicios auxiliares puede ser alimentada directamente del frenado regenerativo del tren, esto se da cuando la energía recuperada es igual o inferior a la demanda por los servicios auxiliares.

Otros trenes: Cuando una unidad se encuentra en el proceso de frenado para ingresar en una estación, el sentido de flujo eléctrico en los dispositivos de tracción se invierte, convirtiendo la energía cinética del tren en energía eléctrica, esta energía es inicialmente llevada hacia la catenaria, donde se presenta un incremento en el voltaje. En condiciones ideales, esta energía es entregada a otra unidad que se encuentre dentro de la misma sección eléctrica para su utilización, por tanto, si se presenta la condición favorable de arranque-frenado, el voltaje del sistema no se ve afectado. Red receptiva implica que hay trenes traccionando que reciben la energía frenando de modo que la tensión no se ve afectada, no receptiva cuando el suministro de frenado en la red provoca que la tensión se salga de los límites establecidos.

En la actualidad en el Metro de Medellín el aprovechamiento del frenado regenerativo se realiza para esta condición, solo cuando se presentan las circunstancias operativas, favorables para el mismo.

Resistencias disipativas: La restricción que tiene un tren frenando para retornar su energía al sistema eléctrico es el sobre voltaje que puede ocasionar en la red de alimentación local debido a la inyección súbita del exceso de energía, el cuál de no ser consumido rápidamente, puede poner en riesgo otros equipos, y por tanto en la mayoría de los casos no hay más remedio que disipar esta energía en forma de calor, en las resistencias de frenado (frenado reostático).

En el Metro de Medellín la energía de frenado que no es posible recuperar ya que no se presentan las condiciones favorables de arranque y frenado dentro de la misma sección eléctrica es disipada en forma de calor por medio de resistencias al interior de la misma unidad. Esta condición operativa no es deseable, debido a que

hay un desaprovechamiento energético y además estas resistencias implican costos adicionales de mantenimiento y reposición por las altas temperaturas que se alcanzan en las resistencias.

Subestaciones reversibles: Consiste en subestaciones que permiten revertir el flujo de potencia desde el sistema de corriente directa (CD), hacia la red de corriente alterna (CA), cuando los trenes se encuentran recuperando energía almacenada en forma de movimiento, convirtiéndola en electricidad, gracias al frenado regenerativo.

Para que la alternativa de venta de energía fuera de la frontera comercial del sistema de tracción eléctrico, sea viable técnica y económicamente, se debe contar en el sistema con una topología que permita el transporte de energía desde la subestación de energía hasta el usuario final con el menor porcentaje de pérdidas posible, debido a que si se tienen largos trayectos esta alternativa no presentaría ningún beneficio en cuanto al aprovechamiento eficiente de la energía.

Por la topología del sistema de alimentación del Metro de Medellín, en el cual la frontera comercial se encuentra muy alejada de las subestaciones de tracción, considerar la venta de energía de frenado no parece ser una alternativa realista, pues dicha energía debe ser transportada a través de un largo recorrido, en el que se presentarían pérdidas por transformación en la subestación de tracción, pérdidas en el sistema dedicado de subestación de transmisión, y nuevamente pérdidas de transformación en las subestaciones principales. Desde este punto la energía tendría pérdidas asociadas al transporte hasta el usuario final.

1.2.1.3. Acumulación de energía (Fuentes estacionarias)

Los almacenadores de energía se caracterizan por entregar determinadas densidades de energía (energía almacenable por unidad de volumen) y densidades de potencia (rapidez con que puede almacenarse o entregarse la energía guardada).

Los dos usos principales de los almacenadores de energía son el ahorro en el consumo de energía y el aporte para la estabilización de tensión en la red, por tanto, el control del elemento almacenador varía depende su aplicación.

Pueden ser instalados a bordo del tren o en estaciones estáticas, dependiendo de las necesidades, el primero tiene la ventaja de facilitar la continuidad del servicio incluso en casos de falla del sistema y se usa generalmente en tranvías o trolleybuses con el fin de permitir la circulación por tramos no electrificados, esta opción tiene algunas limitaciones, principalmente por el peso y el volumen. La segunda se usa para mejorar la eficiencia energética de la red, ya que puede reducir picos de consumo, compensar caídas de tensión y sobretensiones de la catenaria, reducir la potencia nominal de las subestaciones y en algunos casos el número de las mismas, equilibrar el consumo de las fases de la red, de esta forma se mejora la seguridad y estabilidad de la red

Esta tecnología se encuentra en continuo desarrollo tanto en lo que respecta al elemento empleado para el almacenamiento de energía como en las técnicas para el control óptimo de la carga y descarga de estos dispositivos.

En sistemas de tracción eléctrica algunas tecnologías empleadas para el almacenamiento de energía son:

Baterías: Consisten en celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en energía eléctrica, se caracterizan por tener una alta densidad energética pero una baja densidad de potencia, lo que hace que a pesar de que las baterías pueden almacenar mucha más energía por unidad de peso, la tasa de entrada o salida de esa energía (Potencia) es relativamente baja en comparación con la de los capacitores o ruedas volantes.

Por las acciones electroquímicas de carga y descarga sufren un desgaste en la vida útil superior a otras tecnologías, además las baterías tienen un fuerte impacto

ecológico dada la toxicidad de los materiales empleados y de los residuos que generan. Esta alternativa es aplicada a bordo del tren.

Ruedas volantes: Esta tecnología consiste en transformar la energía eléctrica en mecánica y guardarla en forma de movimiento para su posterior reutilización, por medio de la acumulación de energía cinética en un disco al que se le hace girar en unas condiciones de rozamiento casi nulo. Tiene la característica de absorber y entregar energía en poco tiempo y requiere de un espacio considerable y preparado de manera especial en la subestación para su instalación. Esta alternativa es aplicada en estaciones estáticas.

Ultracapacitor: Su principal característica es la capacidad de absorber y ceder una gran cantidad de energía en corto tiempo. En comparación con los capacitores clásicos, estos nuevos componentes permiten almacenar una mayor cantidad de densidad de energía, junto con una gran cantidad de densidad de potencia, incluso la densidad de energía no es comparable a la de los acumuladores electroquímicos. El ciclo de vida de un ultracapacitor es muy largo, típicamente soporta cerca de un millón de ciclos de carga; para un uso común en un vehículo equivalen a decenas de miles de horas de operación, lo que resulta en más de 15 años de vida útil. En el caso de los ultracapacitores no existe la afectación tan importante que sufren las baterías en los procesos de carga y descarga, en gran medida porque no se presentan reacciones electroquímicas. La Tabla 2 presenta una comparación entre los ultracapacitores y otras tecnologías del almacenamiento como la batería de Plomo-Ácido y el condensador electrolítico. (Teymourfar, 2012)

En la Figura 12 se presenta un mapa que enfrenta la densidad energética en el eje de las ordenadas y la densidad de potencia en el eje de las abscisas. Es importante hacer énfasis en la diferencia entre la densidad energética y la densidad de potencia que, aunque parezcan conceptos iguales difieren sustancialmente, permitiendo caracterizar y diferenciar los diferentes dispositivos de

almacenamiento. Por ejemplo, las baterías actualmente se caracterizan por tener una alta densidad energética pero una baja densidad de potencia, ubicándose en el extremo superior izquierdo del mapa.

	Batería Plomo-Ácido	Ultracapacitor	Capacitor Electrolítico
Tiempo de carga	1 a 5 horas	0.3 a 30 segundos	10^{-3} a 10^{-6} segundos
Tiempo de descarga	0.3 a 3 horas	0.3 a 30 segundos	10^{-3} a 10^{-6} segundos
Energía (Wh/Kg)	10 a 100	1 a 10	<0.1
Ciclos de vida	1000	>500.000	>500.000
Potencia específica (W/Kg)	<1000	<10000	<100.000
Eficiencia	0.7 a 0.85	0.85 a 0.98	>0.95
Carga/Descarga			

Tabla 2. Comparación de tecnologías. (Technologies, 2014)

Esto quiere decir que a pesar de que las baterías pueden almacenar mucha más energía por unidad de peso que por ejemplo un capacitor, la tasa de entrada o salida de esa energía (Potencia) es relativamente baja en comparación con la de los capacitores. Los capacitores, contrario a las baterías pueden recibir y entregar a gran velocidad la energía (esto es una alta densidad de potencia). (Vito Calderaro, 2015).

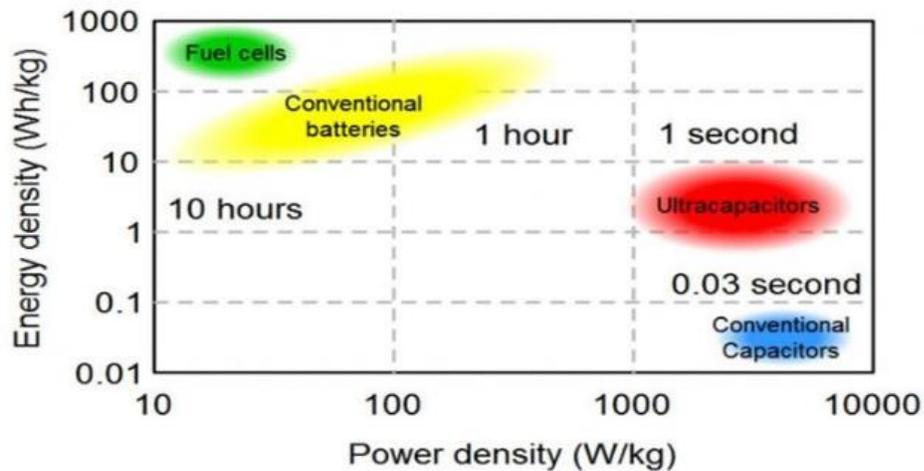


Figura 12. Comparación de tecnologías de almacenamiento de energía. (Topalian, 2016)

1.2.3 Contexto nacional

El sistema de tracción del Metro de Medellín cuenta con tres estaciones alimentadoras conectadas a la red de 110 kV de EPM (Empresas Públicas de Medellín) y poseen transformadores de 31.5/40MVA, encargados de disminuir el nivel de tensión y alimentar dos sistemas de cables a una tensión de 13,8 kV, con los cuales se energizan las nueve subestaciones de tracción que conforman el sistema. Los trenes eléctricos se alimentan por medio de un sistema de catenarias a 1500 VDC, con retorno de corriente a través de los rieles sobre los que reposa el vehículo. Las subestaciones de tracción son las encargadas de reducir y rectificar la señal de 13,8 kV y entregar los 1500 VDC con los cuales se energiza el sistema de catenarias que alimenta los vehículos con que opera el sistema.

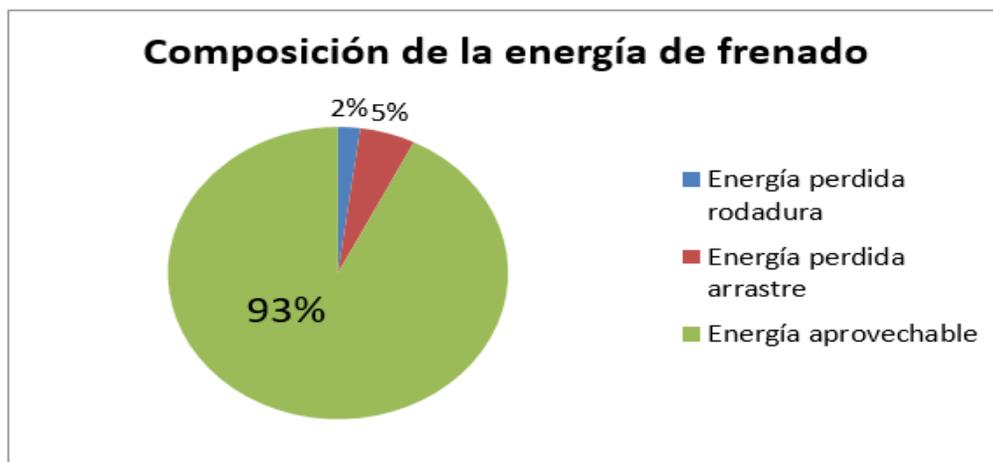


Figura 13. Composición de la energía de frenado – Metro de Medellín.

Para el caso del Metro de Medellín, con la información suministrada por la compañía, se realizó la siguiente estimación de la manera como estaría distribuida la energía cinética disponible al momento de frenar. Como se puede apreciar en la Figura 13 las componentes de pérdida son relativamente pequeñas y la energía aprovechable comprende más del 90%, por tanto, se estudiaron alternativas con el objetivo de determinar la mejor opción para aprovechar esta energía de frenado. (Díez, 2015)

En la práctica solo es posible aprovechar aproximadamente el 40% de la energía disponible al momento de frenado debido a que se debe descontar las pérdidas mecánicas y las pérdidas eléctricas del proceso.

En la Tabla 3 se presentan algunas características y especificaciones técnicas del sistema de tracción Metro de Medellín.

DATOS	LÍNEAS		
	LINEA A	LINEA B	LINEA /ENLACE
TIPO DE SISTEMA	Férreo	Férreo	Férreo
LONGITUD DE LAS LINEAS	23,2km	5,5km	3,2km
ESTACIONES	19	6	N/A
VEHÍCULOS	55 unidades de tren (165 coches: 126 de primera generación y 39 de segunda generación)		
TIEMPO DE RECORRIDO (Vuelta completa)	76 min	21 min	La línea C no presta servicio comercial salvo en eventos especiales de la ciudad
VELOCIDAD COMERCIAL (Y velocidad máxima)	40 km/h (Máx. 80 km/h)		
FRECUENCIA MÁXIMA (Hora pico)	4,25 min	4,75 min	
CAPACIDAD (Pasajeros /hora sentido) 7 pasajeros *m2	29,280	13,100	
INICIO OPERACIÓN COMERCIAL	30/11/1995	29/02/1996	29/02/1996
COBERTURA	5 municipios: Medellín, Bello, Envigado, Itagui y Sabaneta	Centro y Occidente de Medellín	N/A

Tabla 3. Características sistema de tracción – Metro de Medellín

1.2.4 Contexto internacional

En la Tabla 4 se resumen las características de algunos sistemas de tracción alrededor del mundo:

País	Características
Austria	El sistema de tracción de Mariazeller en Austria opera con un sistema de tracción monofásico a 25HZ. Este trayecto tiene sus propias líneas que transportan las corrientes de tracción con una tensión de operación de 27kV, estas líneas son montadas en los pilones del cable aéreo sobre la catenaria.
Alemania	En Alemania normalmente se utilizan cables de un solo conductor para suministrar las corrientes de tracción, pero en el tren ICE se utilizan cables de dos conductores acoplados. Estas corrientes de tracción son suministradas por las líneas de la planta de energía nuclear Neckarwestheim hasta las estaciones de tracción y allí a la subestación central Stuttgart en Zazenhausen.
Escandinavia	En Suecia, Noruega y algunas áreas de la anterior república democrática alemana, sistemas de corriente alterna trifásica son convertidos a sistemas monofásicos de corriente alterna con una frecuencia de 16.7Hz en las subestaciones.
Sur África	En la república de Sur África se utiliza una amplia gama de esquemas de tracción, tanto en alterna como en directa incluyendo sistemas monofásicos de 50 y 25kV
Reino Unido	En el reino unido el sistema de tracción al sur este de Inglaterra esta alimentado por una línea de 750V de directa la cual se obtiene a partir de la rectificación de la corriente alterna de 33kV que proviene de la red de distribución.
Republica Checa Y Eslovaquia	En la Republica Checa y Eslovaquia existen sistemas de tracción de 3000V de CD y 25000V de AC sin estaciones de conmutación.
España	España cuenta actualmente en la línea 1 del Metro de Bilbao con subestaciones reversibles, y el ente regulador de este país remunera la energía regresada a la red, lo cual resulta ser un incentivo más para la aplicación de estos sistemas de venta de energía. En este caso, no se modificó la subestación de tracción, simplemente se adicionó una nueva instalación que incluye un sistema convertidor CD/CA, para inyectar la energía en el devanado de baja tensión del transformador que alimenta el rectificador. Para que la solución de cambiar una subestación convencional, como las que actualmente cuenta el sistema de Medellín, por otra reversible sea viable económicamente, se deben aprovechar la mayor cantidad de elementos existentes, como transformadores, líneas, entre otros. (Ortega, 2011)

Tabla 4. Contexto internacional (Frey, 2012)

1.2.5 Metodologías de diseño basadas en energía recuperable

En esta sección se revisan dos metodologías propuestas en la literatura para el diseño de sistemas basadas en el concepto de energía recuperable.

Comparación de dos estrategias para frenado regenerativo óptimo, con sensibilidad a variaciones en la masa, pendiente y condición del terreno

Esta propuesta se basa en un modelo que incluye el deslizamiento longitudinal, las fuerzas de fricción y las fuerzas normales en cada llanta del vehículo. La definición de deslizamiento longitudinal (λ) está dada por:

$$\lambda = \frac{Vd}{|V|} \quad (1)$$

Donde Vd es la diferencia entre W , que es la velocidad tangencial de la llanta y V , que es la velocidad lineal del vehículo.

El modelo de Burckhardt's permite formular la fuerza de fricción en la llanta como una función del deslizamiento, así:

$$\mu(\lambda) = C1(1 - e^{-C2\lambda}) - (C3 * \lambda) \quad (2)$$

Las 3 constantes $C1$, $C2$ y $C3$ dependen del tipo de terreno como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

Surface : Conditions	C1	C2	C3
1: Asphalt: Dry	1,2801	23,99	0,52
2: Asphalt: Wet	0,857	33,822	0,347
3: Concrete: Dry	1,1973	25,168	0,5373
4: Cobblestones: Dry	1,3713	6,4565	0,6691
5: Cobblestones: Wet	0,4004	33,708	0,1204
6: Snow	0,1946	94,129	0,0646

Figura 14. Coeficiente de fricción según el tipo de terreno (M. Boisvert, 2013)

Cuando hay aceleración longitudinal, la fuerza normal en la llanta se modifica de tal forma que esta tiene un impacto en las fuerzas de tracción del vehículo. La fuerza normal en la llanta esta expresada como

$$F_z = \frac{(I_f mg \cos(p)) + mgh \sin(p) + (hm\dot{v}) + F_a(v)h}{(I_r + I_f)} \quad (3)$$

Donde l_r y l_f son las distancias entre las llantas y el centro de gravedad, h es la altura del centro de gravedad, m la masa del vehículo, g la gravedad, p la pendiente del camino, la derivada de v la aceleración longitudinal y f_a la fuerza de fricción del aire. Finalmente la dinámica del vehículo se puede expresar como:

$$\dot{v} = \frac{1}{m} (F_z \mu(\lambda) - F_a(v) - F_R(v) - mg \sin(p)) \quad (4)$$

Donde $F_R(v)$ es la resistencia de rodadura. La aceleración angular está dada por:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J} (T_b - R F_z \mu(\lambda)) \quad (5)$$

Donde R es el radio de la llanta, J es el momento de inercial de la llanta y T_b es el torque frenante aplicado a la llanta

La eficiencia total del sistema es definida como la tasa proveniente de la batería y la potencia total extraída del vehículo

$$\eta = \frac{P_{bat_{in}}}{\left(\frac{T_b}{R} + F_{aereo} + F_{roll} + F_g\right)v} \quad (6)$$

Donde F_g es la fuerza debida al gradiente del camino. Como se puede observar, en este enfoque solo se busca comparar la energía recuperada con la consumida por el vehículo, sin darle ningún significado adicional a dichas variables. (M. Boisvert, 2013)

Nueva metodología para evaluar la contribución de la energía regenerada en la mejora de la eficiencia energética en sistemas de tracción

La configuración del caso de estudio se muestra en la Figura 15:

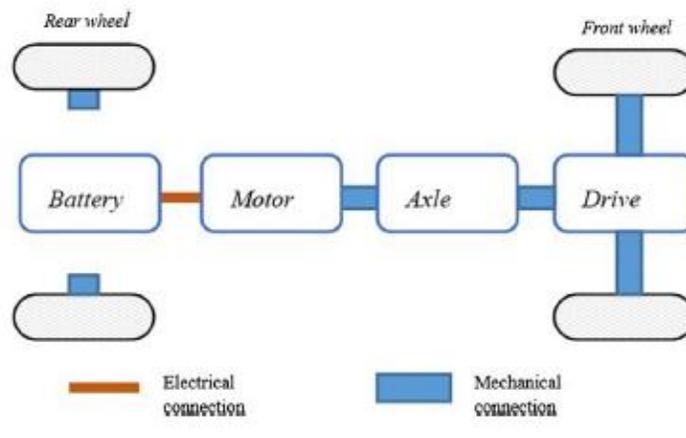


Figura 15. Configuración del caso de estudio. (Qiu, 2016)

El vehículo seleccionado es un carro eléctrico con una configuración típica: es impulsado por sus llantas frontales las cuales son accionadas por un motor sincrónico de imán permanente que funciona en dos estados, como motor o generador. Una batería está conectada al motor y puede ser cargada y descargada durante un trayecto.

Asumiendo que el camino es plano y seco con un alto coeficiente de adhesión y despreciando el consumo de potencia de los accesorios el flujo de energía del vehículo puede ser analizado de la siguiente forma (ver Figura 16)

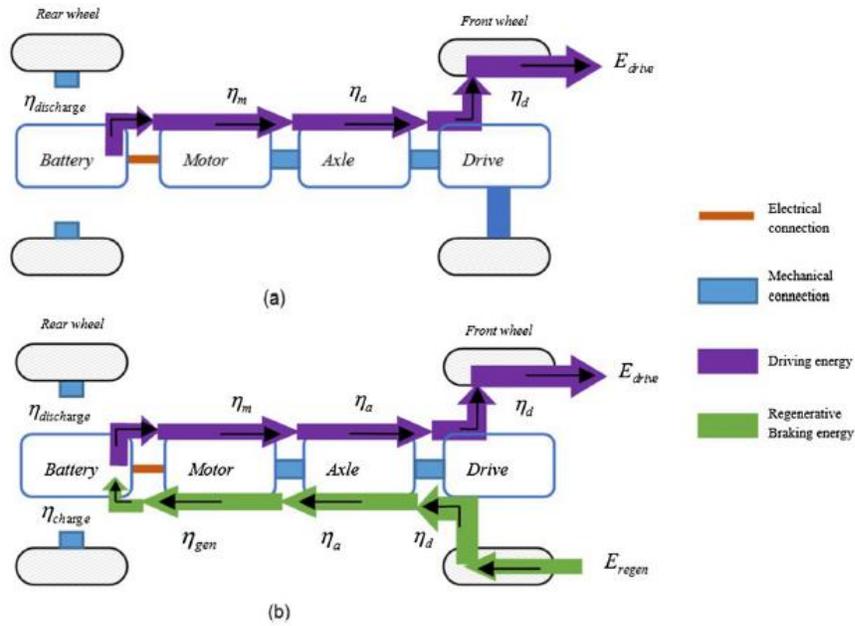


Figura 16. Flujo de energía del vehículo . (Qiu, 2016)

La energía total consumida E_{drive}^* , la cual es utilizada para mover las llantas es calculada de la siguiente forma:

$$E_{drive}^* = \int_{a \geq 0}^{inf} P_{drive} \quad (7)$$

$$P_{drive} = fmg u + imgu + \frac{C_D A u^3}{21.15} + \delta m g u * \frac{du}{dt} \quad (8)$$

Donde P_{drive} es la potencia requerida por los neumáticos, f es el coeficiente de fricción de rodadura, i es el coeficiente de fricción de gradiente, m es la masa del vehículo, c es el coeficiente de resistencia del aire, a es el área frontal del vehículo, $delta$ es el coeficiente de conversión de masa rotacional, u es la velocidad del vehículo a es la aceleración del vehículo y el termino $a \geq 0$ indica que la integral solo tiene en cuenta el proceso de manejo (no la desaceleración).

Para calcular la energía de frenado regenerativo utilizamos el flujo de energía mostrado en la Figura 16. La energía total consumida para conducir el vehículo E_{drive} está dada por

$$E_{drive} = E_{drive}^* - \eta_d \eta_a \eta_{gen} \eta_{charge} \eta_{discharge} \eta_m \eta_a \eta_d E_{regen} \quad (9)$$

$$E_{regen} = \int_{P_{regen} < 0}^{inf} F_{mot_brk} u dt \quad (10)$$

Donde E_{regen} es la energía recuperada por el frenado regenerativo durante el proceso de manejo considerado (según el término de la integral), F_{mot_brk} es la fuerza de frenado del motor, P_{regen} es la potencia del frenado regenerativo, η_d es la eficiencia del sistema de transmisión mecánico, η_a es la eficiencia del eje, η_{gen} es la eficiencia del motor trabajando como generador, η_m es la eficiencia del motor y η_{charge} y $\eta_{discharge}$ son la eficiencia de carga y descarga de la batería respectivamente. (Chen Lv, 2016)

La energía del frenado regenerativo es convertida de la energía cinética del vehículo a energía eléctrica durante el proceso de desaceleración y almacenado en una batería durante procesos de no desaceleración. La energía recuperada es eventualmente liberada de la batería y entregada al vehículo, combinando las ecuaciones 11 a 14 la contribución dada por el frenado regenerativo a la reducción de energía consumida por el vehículo puede ser obtenida por:

$$\sigma = \frac{\Delta E_{drive}}{E_{drive}^*} * 100\% = \frac{\eta_d \eta_a \eta_{gen} \eta_{charge} \eta_{discharge} \eta_m \eta_a \eta_d E_{regen}}{E_{drive}^*} \quad (11)$$

1.3 COMPENSACIÓN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

En este capítulo se repasa el concepto de compensación en sistemas eléctricos, con el fin de establecer la base teórica necesaria para definir el concepto de factor de energía regenerativa en sistemas de tracción, propuesta principal de este trabajo de grado.

1.3.1 Factor de potencia eléctrico

El concepto de factor de potencia eléctrico ha tenido una utilidad definitiva para la gestión energética de sistema de potencia, por cuanto permite el diseño de sistemas de compensación de energía reactiva, que reducen de manera importante las pérdidas de los sistemas eléctricos. Las pérdidas reducidas gracias al uso de los sistemas de compensación

incluyen las causadas por efecto Joule en la transmisión y las de los equipos eléctricos como transformadores.

El factor de potencia sirve como indicador de gestión energética por cuanto determina la razón entre la potencia activa y la potencia aparente. La potencia aparente, como puede derivarse de su nombre, determina la capacidad que aparentemente se requiere desde la fuente para efectuar un trabajo dado, y está constituida por la potencia activa (que hace el trabajo requerido) y la reactiva, que representa un flujo energético entre la fuente y la carga, que no hace trabajo útil, pero que “congestiona la red” con el subsecuente incremento de pérdidas. Esta energía reactiva tiene un comportamiento similar a la de la energía regenerativa de los sistemas de tracción, pues está también oscila entre la fuente y la carga.

1.3.1.1 Factor de potencia

Este factor se define como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente que está demandando la carga cuya relación se puede observar en la Figura 17:

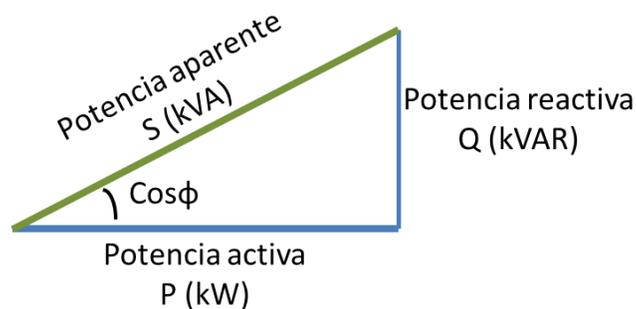


Figura 17. Triángulo de potencia

La potencia eléctrica es la tasa a la cual la energía eléctrica es transferida en un circuito eléctrico (ya sea consumida o absorbida). Así como la potencia mecánica, la potencia eléctrica es la tasa a la cual se realiza un trabajo. De acuerdo con lo anterior, se tiene que:

$$P = \frac{vQ}{t} = V_{rms}I_{rms} \quad (12)$$

En los sistemas de corriente alterna, esta potencia es compleja. La componente real es conocida como potencia activa, y se refiere a aquella potencia que se convierte en energía útil, es decir que se disipa en el circuito y se convierte en otra forma de energía (calor, movimiento). Por otro lado, la parte imaginaria es conocida como potencia reactiva, la cual es almacenada en forma de campo eléctrico y magnético por ciertas componentes del circuito, y se caracteriza por fluctuar entre dichas componentes y las fuentes de energía del circuito. Con base en lo anterior, la potencia aparente está dada por:

$$S = P + jQ \quad (13)$$

A esta potencia compleja se le conoce como potencia aparente, pues se refiere a la potencia que “parece” ser producida por la fuente, si bien en la realidad no toda esta potencia se transforma en trabajo “útil”.

Por lo tanto, para que un sistema eléctrico sea considerado óptimo (desde el punto de vista económico), se busca que la mayor componente de esta potencia sea la activa. Para determinar si una carga está compensada de forma adecuada (la potencia aparente que recibe de la fuente es en su mayoría activa) se utiliza el concepto de factor de potencia. Este factor se define como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente que está demandando la carga en un instante de tiempo determinado.

En la representación mostrada en la Figura 17, $\cos(\phi)$ corresponde a la relación entre la potencia activa (cateto adyacente) y la potencia aparente (hipotenusa). Como se puede observar entre mayor sea P , más agudo es el ángulo que se forma entre S y P , y por lo tanto, el coseno de dicho ángulo se acerca más a la unidad.

1.3.2 Tipos de compensación en sistemas eléctricos

Los métodos de compensación del factor de potencia utilizados en las instalaciones eléctricas de baja tensión son:

Instalar Condensadores de Potencia en paralelo con la carga inductiva a compensar: Este método es el que se utiliza en la actualidad en la mayoría de las instalaciones dado que es más económico y permite una mayor flexibilidad.

En principio los condensadores pueden ser instalados en cuatro posiciones bien definidas de una instalación eléctrica:

- **Compensación individual:** En este caso los condensadores se instalan junto a las cargas inductivas a compensar, y se obtienen las siguientes ventajas:
 - Suprime las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva.
 - Se reducen las pérdidas por efecto joule en los conductores.
 - Se reducen las caídas de tensión.
 - Se optimiza la instalación ya que la potencia y corriente reactiva no circula por la misma, sino que es suministrada por el condensador que está en paralelo con la carga.
 - Descarga el transformador de potencia.

En instalaciones complejas presenta principalmente la desventaja de un elevado costo de instalación y mantenimiento. Esta solución es utilizada para aquellas cargas de consumo constante y con muchas horas de servicio.

- **Compensación parcial por grupos:** En este caso los condensadores se instalan en tableros de distribución secundarios o Centros de Control de Motores (CCM). Representa una solución intermedia, cuando se tienen tableros secundarios o CCM que alimentan muchas cargas de poca potencia, donde no se justifica una compensación individual. Presenta las siguientes ventajas:
 - Suprime las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva.

- Se optimiza una parte de la instalación, ya que la potencia y corriente reactiva no circula por los cables de alimentación de estos tableros secundarios.
- Se reducen las pérdidas por efecto joule en los cables de alimentación de estos tableros.
- Descarga el transformador de potencia.

Si las cargas tienen una variación importante en el consumo, se debe utilizar una compensación del tipo automática.

- **Compensación global centralizada:** En este caso se instalan en el tablero general de baja tensión de la instalación eléctrica. Presenta las siguientes ventajas:
 - Suprime las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva.
 - Se ajusta la potencia aparente S (kVA) a la necesidad real de la instalación.
 - Descarga el transformador de potencia.

Es una instalación más simple, centralizada y no interfiere con las cargas en el mantenimiento. Presenta las desventajas de que no se reducen las pérdidas en los cables, y en instalaciones complejas con carga variable se debe instalar una compensación del tipo automática

- **Compensación en media tensión:** En este caso los condensadores se instalan del lado de media tensión; es posible siempre que la instalación se alimente de la Red Pública de Distribución en media tensión. No es una solución muy utilizada en las instalaciones, salvo en instalaciones industriales importantes.

Utilizar máquinas sincrónicas: Las máquinas sincrónicas pueden funcionar como generadores de potencia reactiva, ya sea accionando cargas mecánicas o funcionando en vacío, siendo en este último caso conocidos como capacitores sincrónicos. La generación de potencia reactiva depende de la excitación, necesitando ser sobreexcitados para poder satisfacer sus propias necesidades de energía reactiva y entregar a su vez energía reactiva al sistema. Este tipo de compensación no es muy utilizada, se utiliza sólo en el caso de que

existan en la instalación motores sincrónicos de gran potencia (mayores a 200 HP) que funcionan por largos períodos de tiempo.

El estudio de estos sistemas de compensación de potencia reactiva será relevante cuando se estudien los métodos para la compensación de la energía regenerativa propuesta por este trabajo de grado, se podrá examinar los interesantes paralelos y analogías entre unos y otros.

1.3.3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de este trabajo de grado, se aplica la metodología propuesta en el Seminario de Investigación de la maestría en Transmisión y Distribución. La metodología se fundamenta en la identificación de un problema el cual se estructura a partir de una reflexión preliminar orientada por raíces, elementos y perceptores.

Las RAÍCES del problema son carencias, faltantes, vacíos individuales o parciales que acumulados se convierten en la causa del PROBLEMA. Una raíz generalmente está latente, en cierta manera es imperceptible y oculta y sólo el investigador puede hacerlas aparecer como partes manifiestas del PROBLEMA. La metodología las separa por jerarquía en dos grupos, las principales y las secundarias, según su relevancia respecto al problema que ha surgido.

Los ELEMENTOS son las herramientas materiales o conceptuales que se tienen a mano para resolver el PROBLEMA. La metodología los discrimina en dos grupos, como primarios y secundarios.

Primarios: Tracción eléctrica, sistemas eléctricos de distribución, planeación de sistemas de tracción. Estos fueron conocimiento adquirido durante el desarrollo de la Maestría.

Secundarios: Herramientas de cálculo (Excel), Conceptos de programación, artículos relacionados, normas internacionales, Scopus, IEEE, OpenTrack, OpenPowerNet.

Finalmente, los PERCEPTORES son las instituciones, personas o entidades que se ven afectados por el Problema y que serán beneficiados por la solución investigativa. Según el

tipo y grado de impacto del problema, los perceptores se clasifican en directos e indirectos.

Directos: Operadores de sistemas de transporte basados en tracción eléctrica, empresas que diseñan sistemas de tracción.

Indirectos: Universidades – Grupos de Investigación, usuarios de transporte masivo, compañías de consultoría, planeadores de ciudad.

En la Figura 18, se presenta el esquema general e integrado de la investigación realizada en este trabajo. Se incluyen las raíces, los elementos y los perceptores que sustentan la investigación, permiten identificar un problema y generar una propuesta de investigación.

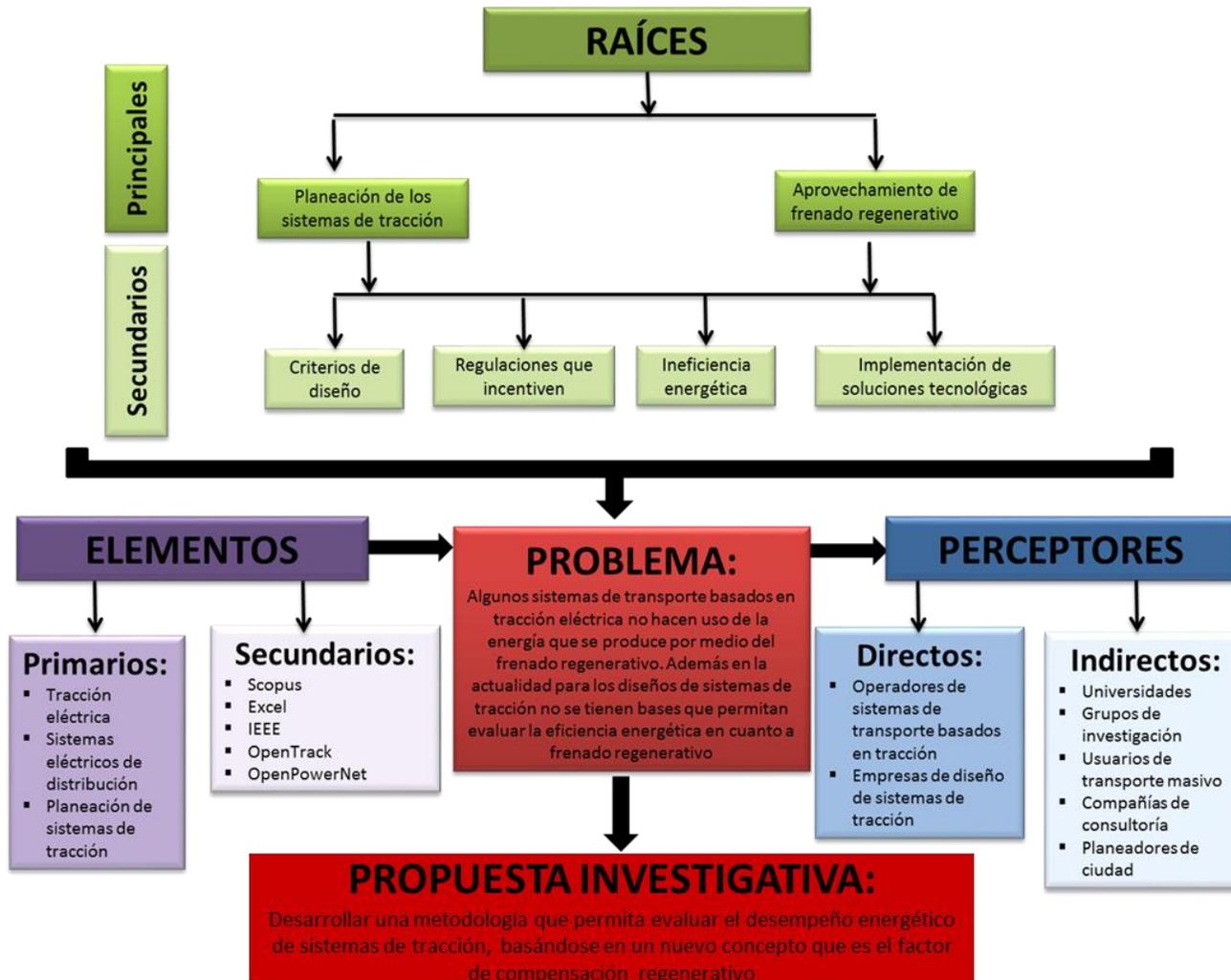


Figura 18. Resumen del esquema de la investigación

CAPÍTULO 2

2. FACTOR DE COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REGENERATIVA EN SISTEMAS DE TRACCIÓN

En este capítulo se dan las bases conceptuales necesarias para el planteamiento de la nueva metodología de diseño de sistemas de tracción basada en el concepto del factor de compensación de energía regenerativa, tras lo cual se procede a la definición del mismo. Es importante resaltar que se desea la analogía con la compensación de potencia para darle valor pedagógico, facilidad de comprensión y así mejorar la capacidad de análisis.

2.1 FORMULACIÓN DE EQUIVALENTES ANALÍTICOS

En los capítulos 1 y 2 se han definido todos los conceptos asociados a sistemas de tracción y factor de potencia eléctrico. En esta sección se desarrollan una serie de equivalentes analíticos que son una antesala a la definición del factor de compensación de energía regenerativo:

- Para el primer equivalente, se parte de un circuito magnético como el mostrado en la Figura 19, compuesto por una fuente y un núcleo de hierro rodeado por N espiras. Cuando se energiza la fuente variable se produce un flujo magnético en el núcleo, proporcional a la corriente generada por la fuente y al número de espiras. Como se puede observar, a medida que se aumenta el número de amperio espiras (la corriente), se incrementa la magnitud del flujo magnético a través del núcleo. En este proceso, desde el punto de vista energético, la energía que se almacena en forma de campo magnético es transportada y cedida por las cargas eléctricas. El área bajo la curva que relaciona el flujo magnético, con los amperios espiras, es proporcional a la energía almacenada por este sistema en forma de campo magnético. De la figura 19 se obtiene que dicha área está dada por:

$$\text{Area bajo la curva} = \frac{1}{2} * b * h = \frac{1}{2} * (N * I_o) * \left(\frac{N * I_o}{Rel} \right) = \frac{1}{2} * L * I_o^2 \quad (14)$$

Donde Rel es la reluctancia del núcleo y L es la inductancia.

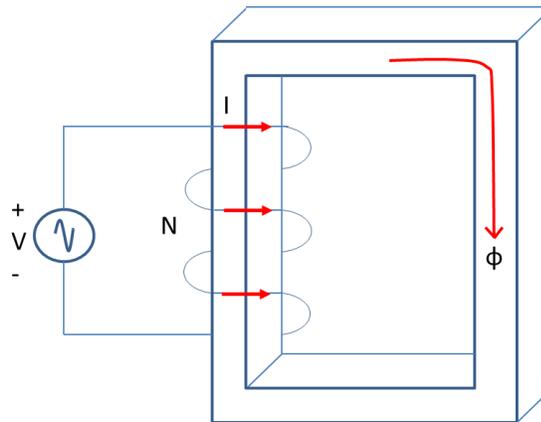


Figura 19. Circuito magnético

- Cuando se tiene un circuito con una bobina ideal la energía entregada por la fuente es recibida por la bobina, almacenada en forma de campo magnético, y tras un ciclo esta la retorna a la fuente nuevamente, esto se repite mientras la fuente esta energizada, sin presentarse en ningún momento pérdidas. Sin embargo, en el caso de un núcleo magnético si existen pérdidas. En el instante inicial cuando se energiza la fuente el comportamiento de la curva de flujo versus corriente es lineal (ver Figura 20.a) sin embargo en un determinado valor de corriente esta comienza a saturarse, es decir se obtiene menos flujo ante incrementos de corriente (ver Figura 20.b). En este estado, si se reduce la corriente de la fuente el flujo magnético que se produce en el hierro es mayor al que se produjo en la etapa de energización debido a la magnetización del material (ver Figura 20.c). Si se reduce la corriente completamente y se regresa al estado anterior la curva no seguirá la trayectoria seguida previamente (ver Figura 20.d). Las pérdidas que se presentan en el hierro son proporcionales al área de la curva obtenida (ver Figura 20.e), este comportamiento es conocido como histéresis.

En un sistema de tracción eléctrica se presenta una situación similar: cuando un vehículo eléctrico gana velocidad almacena energía en forma de energía cinética. Cuando el vehículo frena, devuelve energía al sistema de tracción eléctrica a través

del frenado regenerativo; sin embargo esta energía que retorna no es igual a la energía cinética que gana el vehículo debido a las pérdidas que se generan en el sistema. Este comportamiento es similar a la histéresis de un material ferromagnético, y será definido como **histéresis de tracción**.

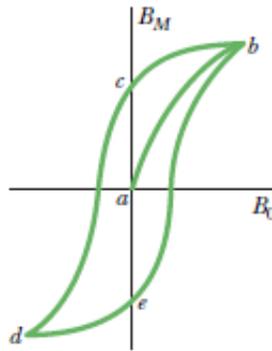


Figura 20. Histéresis magnética. (Kamil, 2015)

- El siguiente equivalente, consiste en una analogía con la fuerza magnetomotriz. Para esta se considera un vehículo eléctrico sobre el que se ejerce una fuerza f . Por la segunda ley de Newton se tiene que:

$$f = m * a \tag{15}$$

Si se considera una aceleración constante y teniendo en cuenta que esta es el cambio de la velocidad con respecto al tiempo se obtiene que:

$$v = \frac{f*t}{m}; f = \frac{m*v}{t} \tag{16}$$

La fuerza definida por la expresión anterior se relaciona con la velocidad como se observa en la Figura 21.b, para hacer un símil con la curva de magnetización, pero en este caso el área que se almacena bajo la curva corresponde a energía cinética, y no a la magnética. Calculando la energía de este sistema se obtiene:

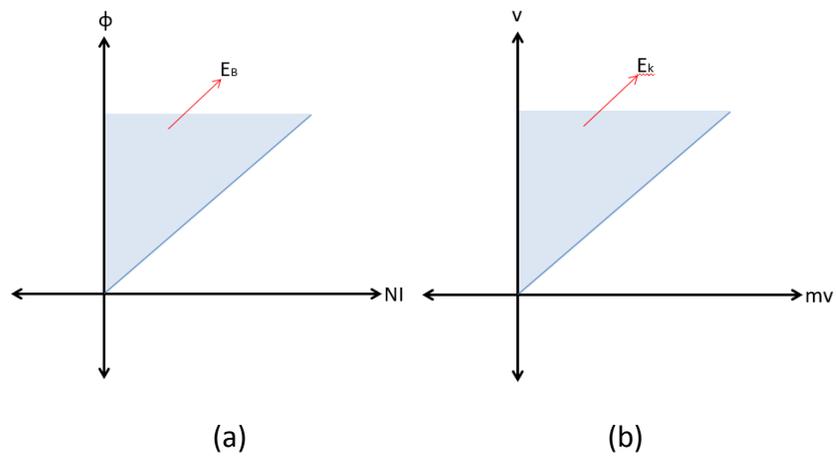


Figura 21. Relación entre la fuerza magnetomotriz y la fuerza trenmotriz

$$\text{Area bajo la curva} = \frac{1}{2} * b * h = \frac{1}{2} * (m * v) * (v) = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (17)$$

Esta expresión corresponde a la energía cinética del vehículo, la cual es similar a la expresión obtenida anteriormente para la energía almacenada en forma de campo magnético por el núcleo de hierro. De lo anterior se encuentra que la fuerza expresada en la ecuación (f) es similar a la fuerza magnetomotriz en un circuito magnético. Por lo tanto, esta fuerza en el caso de sistemas de tracción eléctrica se podría definir como **fuerza tren-motriz**, que además corresponde a la cantidad de movimiento del tren.

- El concepto de compensación puede ser visto en sistemas de tracción eléctrica de un modo similar al concepto de compensación de reactivos en sistemas eléctricos de corriente alterna (AC). En un sistema AC se busca asegurar el suministro de potencia reactiva a las cargas, manteniendo un diseño óptimo en la red. Para este fin, se diseñan sistemas de compensación que son ubicados cerca a la carga, logrando así que la potencia fluya entre el compensador y la carga, evitando que la fuente sea quien la provea. Estos compensadores almacenan esta energía en forma de campo eléctrico o magnético.

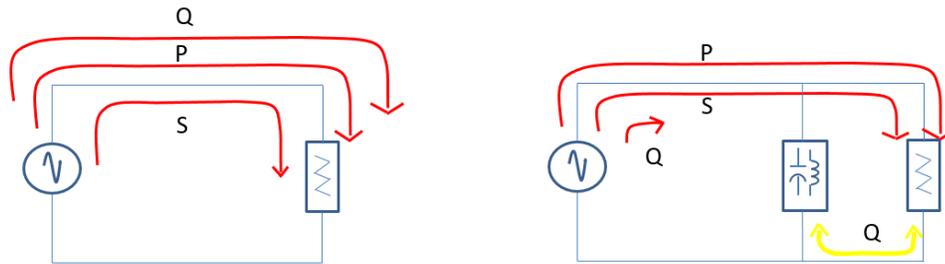


Figura 22. Flujo de reactiva en un circuito de alterna. Izquierda, sin compensador. Derecha, circuito compensado

En la Figura 22 se muestra como la instalación de un compensador reduce el uso de los activos de la red para transportar la potencia reactiva y el costo de la misma. Para determinar si una carga esta compensada de forma adecuada se utiliza el concepto de factor de potencia, el cual se explicó en la sección 1.3.1. En el triángulo de potencia la hipotenusa S es una medida de la potencia que realmente está suministrando la fuente, por tanto lo ideal es que S se aproxime lo más posible a P es decir que $\text{Cos}(\Phi) \approx 1 = \text{fp}$. Por ejemplo si la carga es muy inductiva el compensador debe ser de tipo capacitivo y viceversa.

En corriente alterna se tiene la restricción por normatividad que la Q no puede ser más grande que la mitad de la P . Esto implica que $\text{Cos}(\Phi)$ no puede ser menor a 0.9, debido a que un valor inferior a este se considera ineficiente y puede ser penalizado bajo la regulación vigente en Colombia. Así como en los circuitos de AC el factor de potencia determina la relación existente entre la potencia real de trabajo y la potencia total consumida por la carga, se plantea una analogía con la compensación que debe existir en los sistemas de tracción por medio de una teoría del **factor de compensación regenerativo**.

2.2 CONCEPTOS DE ENERGÍA REGENERATIVA

2.2.1 Definición

Como ya se vio en el capítulo 1, los sistemas de tracción eléctrica pueden ser alimentados por un sistema de conversión AC/DC, o directamente de la red de AC, ya sea a frecuencia nominal o frecuencia reducida. Dada la dinámica natural de estos sistemas, un vehículo eléctrico tiene tanto energía cinética como energía potencial. En un sistema sin desniveles topográficos, la energía que podría ser recuperada al ser transformada en eléctrica, es la energía cinética del vehículo, menos las pérdidas del proceso. En caso de que se tenga un sistema con pendiente, la energía recuperable es la suma de la energía cinética y la energía potencial, que tiene el vehículo por tener una diferencia de altura, descontando las pérdidas.

Esta energía recuperada puede ser aprovechada con sistemas de control externos (de manera forzada) o mecánicos (natural, en la cual se devuelve la energía al sistema sin ningún mecanismo de control externo). En un sistema de tracción eléctrica se pueden definir dos tipos de energía, una energía útil para el movimiento que es consumida por los vehículos que componen el sistema (**energía de tracción**) y una energía recuperable que se refiere a aquella que se puede convertir a otro tipo de energía aprovechable nuevamente por el sistema (**energía regenerativa**). La fricción, por ejemplo, no se puede recuperar, dado que es una energía que se disipa en forma de calor; sin embargo, la energía cinética y potencial si pueden ser reaprovechadas nuevamente por el sistema, por medio de sistemas de compensación.

2.2.2 Componentes

En esta sección se definen los factores y variables que permiten determinar el valor de la energía requerida para traccionar y la cantidad de energía que puede ser regenerada.

Energía de tracción: El modelo propuesto para la definición de esta energía parte de la elección de un ciclo de conducción especificado como un vector de velocidades del

vehículo en función del tiempo (M. Boisvert, 2013). Esta información es utilizada para calcular el torque necesario para operar el vehículo en cada instante de tiempo considerando la resistencia de rodamiento de la llanta la resistencia aerodinámica la pendiente y la inercia del vehículo. Estos efectos combinados componen lo conocido como fuerza de tracción que es básicamente la fuerza requerida para desplazar el vehículo hacia adelante transmitida a las llantas. (Perrotta & Ribeiro, 2016). Esta fuerza (denominada F_t) debe superar la resistencia del vehículo en movimiento que está compuesta por:

- Fricción de rodadura, F_{ro} , se debe principalmente a la fricción de las llantas del vehículo contra el camino. La fricción en los mecanismos internos también debe ser considerada.
- Fricción aerodinámica: El arrastre aerodinámico F_I es consecuencia de la fricción del vehículo moviéndose a través del aire.
- Fuerza necesaria para superar el peso del vehículo y la pendiente del terreno: La fuerza de pendiente F_{st} es la fuerza necesaria para desplazar el vehículo a través de un perfil con pendiente. Puede tener un impacto negativo en el movimiento del vehículo actuando como una resistencia, pero puede tener un efecto positivo si el vehículo está en descenso.

Energía regenerativa: La cantidad de energía que puede ser potencialmente regenerada depende de los siguientes factores:

- Impedancia de los conductores que componen la red de tracción (rieles, cable mensajero, cable de contacto, mecanismos de empalme, entre otros). Lo deseable es que dichas impedancias tengan un valor muy bajo, de lo contrario, aumentan las pérdidas por calentamiento.
- Impedancia interna de los elementos de control, como los sistemas de rectificación, para evitar las mencionadas pérdidas por calentamiento.

- El perfil de tensión a lo largo del trayecto, el cual a su vez depende de otros factores como: el despacho de los vehículos que componen el sistema de tracción, la distancia entre las diferentes estaciones y el número de subestaciones reversibles.
- La eficiencia de los motores del vehículo como generadores, en los cuales se pueden dar pérdidas de conversión.
- La calidad de los sistemas mecánicos de acople, los cuales pueden generar pérdidas por calentamiento debido a la fricción entre los diversos mecanismos.

2.3 TIPOS DE COMPENSACIÓN EN SISTEMAS DE TRACCIÓN

A continuación se clasificará la compensación de los sistemas de tracción en dos: la compensación natural y la compensación forzada.

2.3.1 Compensación natural

Se refiere al tipo de compensación en la cual no intervienen elementos externos al vehículo, es decir, que se da por las dinámicas inherentes al sistema. En este tipo de compensación se encuentra:

- Control de despacho, que se refiere a la programación de los vehículos que circulan a través del sistema de tracción.
- Consignas operativas, como el control de tensión (reducir el perfil para aumentar la energía regenerada), o controlar el máximo número de vehículos que puede ser despachado en un instante de tiempo determinado.
- Prescindir de una subestación de tracción, modificando de esta forma el perfil de tensión para aumentar la energía regenerada en ciertos tramos del sistema.
- En sistemas de alta pendiente se puede aprovechar mejor el frenado regenerativo, dado que la energía potencial que tienen los vehículos se puede transformar en energía eléctrica con pocas pérdidas.

2.3.2 Compensación forzada

Es el tipo de compensación que se da por medio de elementos cuyo propósito es el aprovechamiento forzado de la energía regenerativa, usualmente utilizando un sistema de control especial, en conjunto con un sistema de almacenamiento de energía o de aprovechamiento externo de la misma. Entre los tipos de compensación forzada se encuentran:

- Ultracapacitores
- Ruedas volantes
- Baterías
- Subestaciones reversibles

Estos métodos fueron explicados en detalle en el capítulo 1.

2.4 PROPUESTA DEL FACTOR DE COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REGENERATIVA

2.4.1 Definición

De acuerdo con el análisis realizado en el capítulo anterior, se define ahora, en sistemas de tracción, el factor de compensación de energía regenerativa que está compuesto por los siguientes elementos:

- **Energía Activada de tracción:** es análoga a la Potencia Activa del triángulo de potencia, y corresponde a la energía que ha sido “activada” en un proceso de tracción, y que es susceptible de ser recuperada o compensada. Para determinarla, se escoge un nodo de evaluación, midiendo la energía aportada desde una dirección del sistema, en período de un tiempo determinado. La analogía con la potencia activa de los sistemas de AC, es muy adecuada porque esta energía activada proviene del consumo en el tiempo de potencia activa. En un sistema de trenes, la energía activada es la que ha sido transmitida a un vehículo, y se

encuentra almacenada en energías cinética y potencial. Para efectuar el análisis de la energía activada, pueden ser escogidos diversos puntos de interés, como por ejemplo la subestación de tracción, que agregaría la energía que ha sido activada en todos los vehículos que alimenta, o en pantógrafo de un vehículo, donde tiene en cuenta la energía activada en esa unidad específica. A esta energía activada, se le asigna el mismo cateto que tiene la potencia activa en el bien conocido triángulo de potencia, o sea que se considerará como una cantidad real. El triángulo de energía que se pretende construir a partir de esta variable, será análogo al triángulo de potencia, presentado formalmente en la siguiente sección.

- **Energía regenerativa:** es la energía susceptible de ser recuperada en un proceso de regeneración de energía. En principio, se asume que la energía regenerativa base es igual a la activada, como si el sistema fuera ideal, y toda la energía pudiera ser recuperada, sin existir pérdidas. Si el sistema no recupera energía, se considera perfectamente descompensado, mientras que, si logra recuperarla toda, es un sistema perfectamente compensado. La energía regenerativa se postula como una variable análoga a la potencia reactiva, por su gran similitud, pues ambas se encuentran oscilando entre la fuente y la carga. Como tal, en la propuesta metodológica, a la energía regenerativa se le asignará el mismo cateto que tiene la potencia reactiva en el triángulo de potencia, y para esto se asumirá como una variable imaginaria. La compensación de energía regenerativa, al igual que la compensación de potencia reactiva, consiste en la reducción de la energía neta consumida, que es finalmente, la no recuperada. Esta compensación de energía regenerativa puede ocurrir de diversas maneras, las cuales ya han sido explicadas algunas, pero se recomienda sintetizar en dos grandes familias: la compensación natural y la forzada. Partiendo de la energía regenerativa base, la energía compensada comienza a restarse de esta hasta obtener la energía neta.

- **Energía neta consumida:** Es la diferencia entre la energía activada por la fuente en un ciclo de trabajo, y la recuperada en ese mismo período. En el caso de un sistema de tracción es la energía neta medida en el transformador de la subestación de tracción, y si el balance se efectúa en el pantógrafo del vehículo, es la diferencia entre la energía activada y la energía regenerada por la unidad bajo estudio, todo esto en el período de evaluación. Esta es la energía susceptible de ser reducida mediante una buena gestión de la energía regenerativa de forma que las fuentes del suministro de la energía experimentarían un alivio que podría ser aprovechado en otros recursos. Si la cantidad de energía en sentido de la recuperación supera la energía activada base, la energía neta queda negativa, y por tanto el signo de la cantidad imaginaria es negativo. El triángulo de energía queda análogo a un triángulo de potencia de una carga con factor de potencia en adelanto. Para que esto ocurra, por conservación de la energía, se requiere una fuente de energía desde el lado de la carga. El método podría ser utilizado para evaluar sistemas de generación distribuida, que aportan energía a un sistema de alimentación. En un sistema de tracción, este balance con energía neta negativa, podría ocurrir cuando el balance se hace en una subestación de tracción en la cual, además, se tienen una estación de carga de buses a batería con la opción V2G, por las siglas en inglés *Vehicle to Grid*. En estos tipos de esquemas, la energía almacenada en baterías y vehículos, podría ser reinyectada a la red, para suplir demanda en condiciones excepcionales.
- **Energía Aparente Activada:** análoga a la potencia aparente, esta cantidad es la hipotenusa del triángulo de energía regenerativa, o la magnitud del número complejo cuya parte real es la energía activada, y cuya parte imaginaria es la parte energía regenerativa. La potencia aparente clásica es un número complejo cuya

parte real es la potencia activa y la parte imaginaria es la potencia reactiva. Esta variable da una idea de la capacidad instalada requerida para permitir los flujos de energía en ambas direcciones, y sería igual a la energía activada, en caso de un sistema perfectamente compensado.

- **Factor de energía regenerativa $\text{Cos } (\phi)$:** es el coseno del ángulo formado entre la hipotenusa y el cateto adyacente del triángulo de energía regenerativa. Es el análogo al factor de potencia de los sistemas en AC, y se interpreta de manera similar, en el sentido en que la compensación busca llevar este valor a la unidad.
- **Ineficiencia de regeneración $\text{Tan } (\phi)$:** Es la razón entre la energía neta consumida y la energía activada. Es 1 en sistemas perfectamente descompensados, y 0 en sistemas perfectamente compensados.

2.4.2 Construcción del diagrama de energía regenerativa y el triángulo asociado

Para la construcción del diagrama de energía regenerativa, en primer lugar, se debe escoger el punto de balance de energía del sistema, bien sea en las subestaciones de alimentación, tracción, pantógrafos de los vehículos, o en un alimentador específico.

A partir del origen del plano complejo, sobre el real, se traza el vector de Energía Activada cuya magnitud es igual a la energía transferida a través del punto de análisis hacia el punto de consumo. Se puede utilizar la misma convención de elemento pasivo de Circuitos Eléctricos, para denotar que el flujo positivo va de la fuente a la carga.

Sobre el final de la energía activada se asigna una energía regenerativa base de igual valor a la activada, en el eje imaginario, constituyendo el cateto opuesto del triángulo de energía.

A partir del valor de energía regenerativa base, se descuenta la compensación de energía regenerativa, que como se ha explicado, puede realizarse de manera natural o de manera forzada.

Descontada la energía regenerada, o sea la devuelta al sistema o fuente, el cateto opuesto tendrá la magnitud de la energía neta consumida. Si la compensación es perfecta, el factor de energía regenerativa, definido como el coseno del ángulo formado entre el cateto adyacente y la hipotenusa (análogo al factor de potencia) será unitario.

Con base en lo anterior el factor de compensación regenerativo para sistemas de tracción estaría dado por la siguiente ecuación, y el triángulo correspondiente se encuentra en la Figura 23 :

$$\text{Factor de compensación regenerativo (FCR)} = \frac{E_{\text{activada}}}{\sqrt{(E_{\text{activada}})^2 - (E_{\text{neta consumida}})^2}} = \frac{E_{\text{activada}}}{E_{\text{aparente activada}}} \quad (18)$$

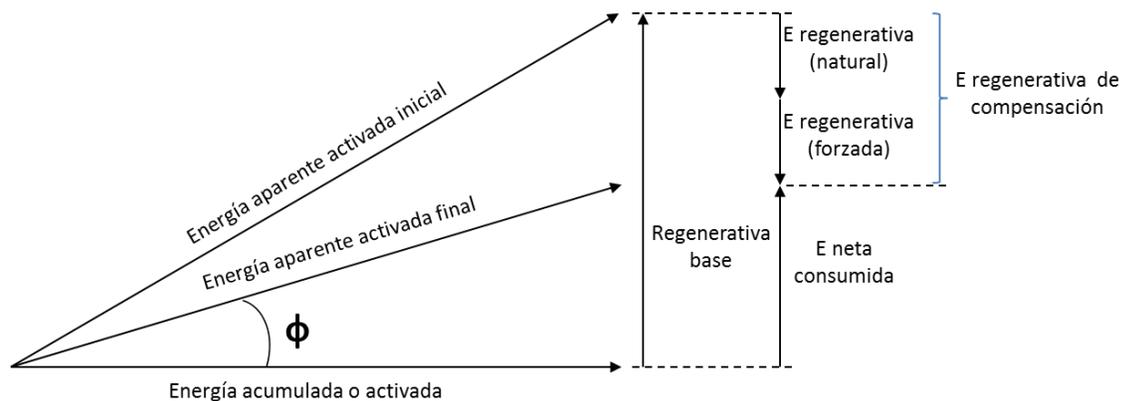


Figura 23. Triángulo de compensación de energía regenerativa para sistemas de tracción eléctrica

2.4.3 Casos ilustrativos del factor de compensación regenerativo

En las Figura 24, Figura 25 y Figura 26 se presentan casos típicos ilustrativos para el factor de compensación regenerativo.

- Sistema perfectamente descompensado: sistema en el cual no existe ningún tipo de compensación de energía regenerativa

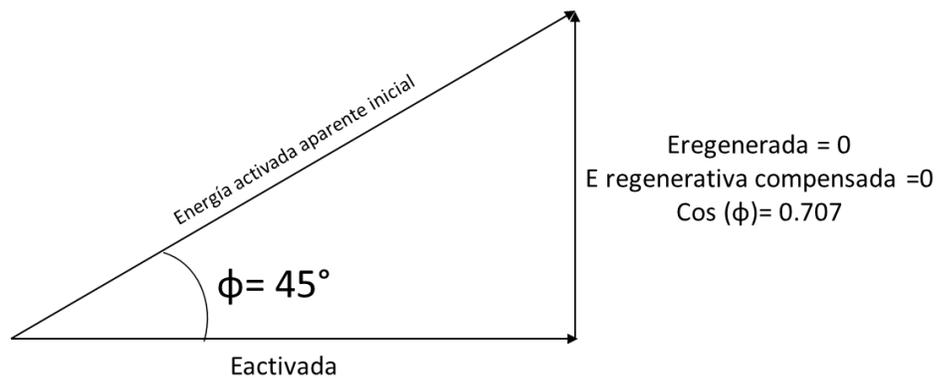


Figura 24. Triángulo de compensación de energía regenerativa para sistemas perfectamente descompensados

- Sistema perfectamente compensado: caso ideal sin pérdidas de ningún tipo, donde el sistema se recupera toda la energía activada

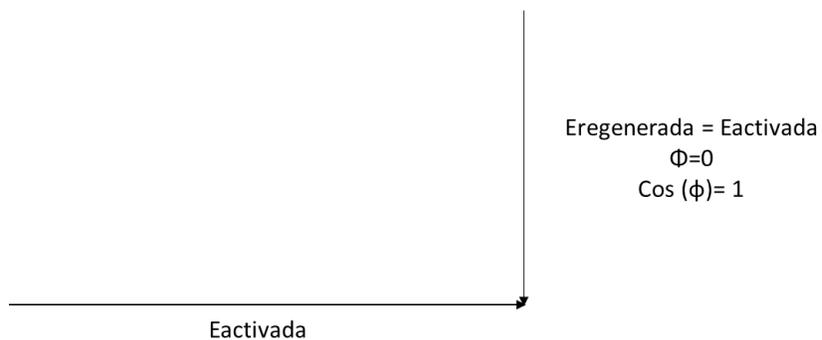


Figura 25. Triángulo de compensación de energía regenerativa para sistemas perfectamente compensados

- Sistema en adelanto: Sistema con aporte de energía desde la carga por generación distribuida u otro tipo de fuente de energía

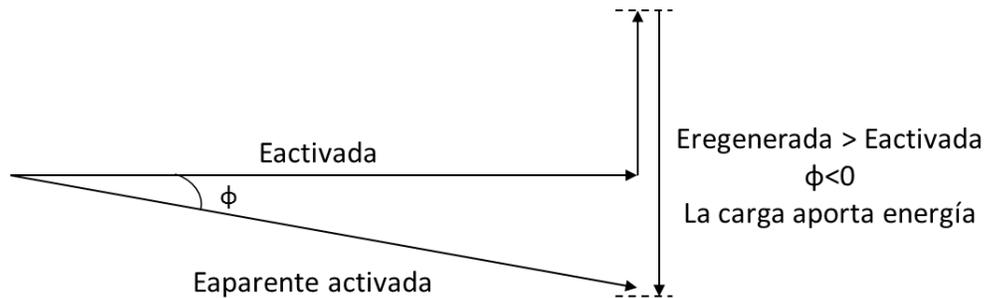


Figura 26. Triángulo de compensación de energía regenerativa para sistemas de energía regenerativa en adelanto

2.4.4 Ejemplos de cálculo del factor de compensación regenerativo

A continuación, se presenta un caso de estudio de un sistema de tracción al cual se le realiza un análisis energético por medio del factor propuesto, y se determina el valor de compensación requerida para un buen desempeño.

- Ejemplo: Un tren a “activado” una energía alcanzando 80 kmh con una masa de 147 T. Al frenar devuelve por recuperación, de manera natural, y a línea de contacto, 2 kWh, disipa en resistencia aerodinámica y fricción la energía restante.
 - a) Calcular la energía activada
 - b) Hacer el diagrama de energía regenerativa
 - c) Calcular el compensador para llevar $\cos(\phi)$ a 0.9
 - d) Hacer el diagrama de energía regenerativa para el caso c)

La evaluación se efectúa en el pantógrafo del tren.

a)

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E = \frac{1}{2}(147000kg) * \left(80 \frac{km}{h} * \frac{1}{3600} \frac{h}{s} * \frac{1000}{1} \frac{m}{km}\right)^2$$

$$E = 36296296.3 J$$

$$E_{activada} = 10.08 \text{ kWh} \approx 10 \text{ kWh}$$

b) En la Figura 27 se presenta el diagrama de energía regenerativa

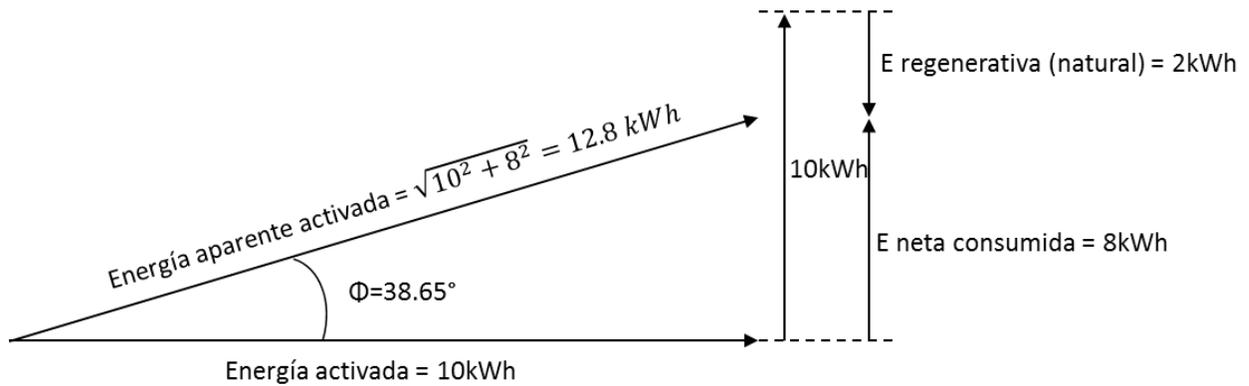


Figura 27. Triángulo FCR para caso de estudio

$$\cos(\varphi) = \frac{10}{12.8} = 0.781$$

$$\varphi = 38.65^\circ$$

Para este caso, el factor de compensación regenerativo es de 0.781, lo cual indica una baja gestión en la regeneración de energía.

c)

$$\cos(\varphi) = 0.9$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0.9) * \frac{180}{\pi} = 25^\circ$$

$$\tan(25^\circ) = 0.4663 = \frac{E_{neta\ consumida}}{E_{activada}}$$

$$E_{neta} = 0.4663 * E_{activada}$$

$$E_{neta} = 0.4663 * 10kWh = 4.663kWh$$

Para lograr un actor de compensación de energía regenerativo de 0.9, la energía neta consumida debe ser de 4.663kWh; es decir que el resto de la energía deberá ser suplida por una compensación. Por tanto, la energía aportada por el compensados deberá de ser:

$$E_{compensador} = 8kWh - 4.663kWh$$

$$E_{compensador} = 3.34kwh$$

Esto podría lograrse con un banco de Ultracapacitores, controlado con un convertidor de DC/DC. Este resultado permite encontrar el tamaño del banco.

d) En la Figura 28 se presenta el diagrama de energía regenerativa teniendo en cuenta una compensación de 3.34kWh

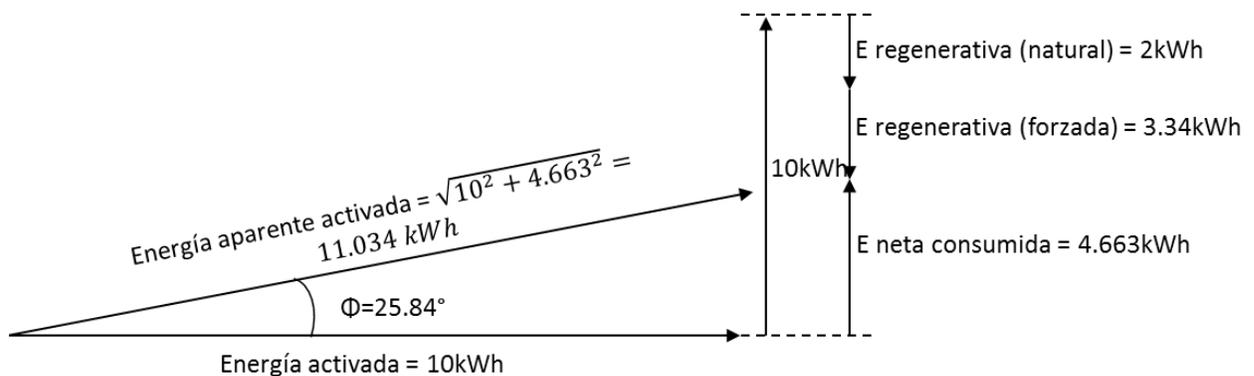


Figura 28. Triángulo FCR para $\cos(\varphi) = 0.9$

$$\cos(\varphi) = \frac{10}{11.034} = 0.9$$

$$\varphi = 25.84^\circ$$

- Con el fin de ejemplificar como se podría mejorar la gestión energética en sistemas de tracción eléctrica mediante técnicas de compensación natural y forzada, se toma como referencia el sistema de góndolas de la ciudad de Medellín, Metrocable.

En estas, el peso de las cabinas que ascienden es compensado de manera natural por las cabinas que descienden, reduciendo el esfuerzo del sistema de tracción.

En este sistema, en las horas de la mañana y de la tarde, se presentan desequilibrios entre el número de pasajeros que desciende versus el número de pasajeros que asciende.

En la mañana, los pasajeros que descienden a trabajar o efectuar actividades en el centro de la ciudad, desde los barrios altos, predominan sobre los que suben.

Por ende, en este período se da una oportunidad de una compensación forzada regenerando energía para algún uso provechoso, como recarga de bicicletas y vehículos eléctricos. Actualmente esta energía es desaprovechada, dado que se dispersa en resistencias disipativas (ver Figura 29 superior).

Una forma de aprovechar dicha energía regenerada es mediante subestaciones reversibles que permitan el aprovechamiento de dicha energía en otras cargas (ver Figura 29 inferior).

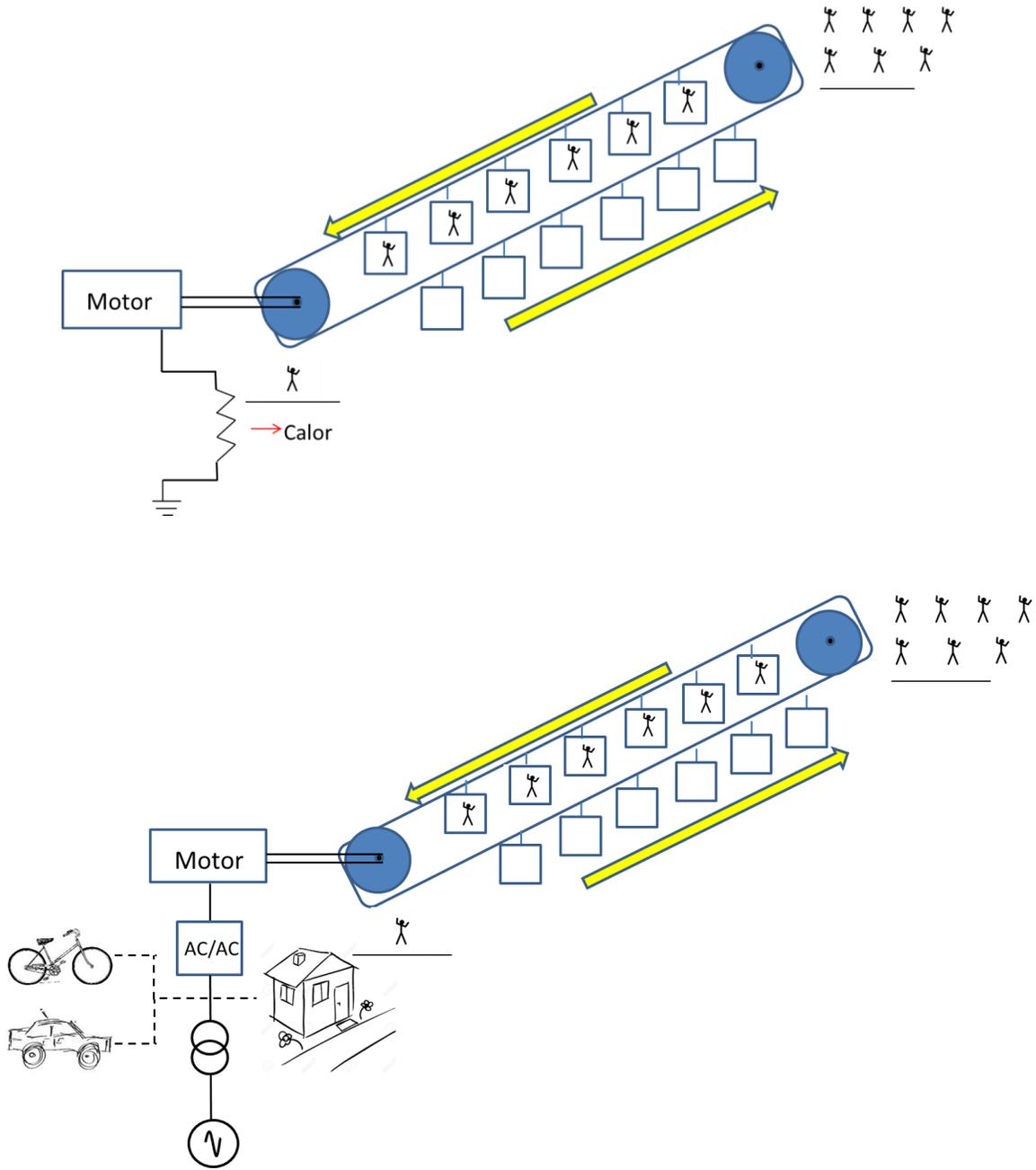


Figura 29. Propuesta de compensación forzada en sistema tipo góndola (Metrocable de Medellín)

Para este caso el triángulo asociado al FCR es el ilustrado en la Figura 30, que corresponde a un factor de compensación regenerativo en adelante:

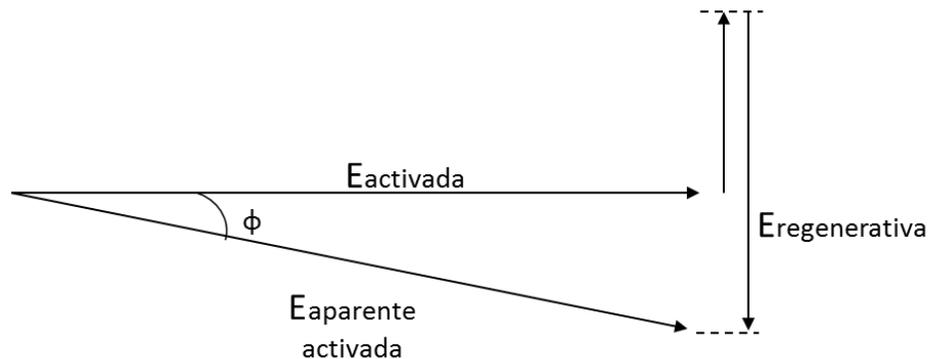


Figura 30. Triángulo de compensación de energía regenerativa en adelanto

2.4.5 Efecto en la tensión de la compensación

Similar al caso de la compensación de potencia reactiva, la compensación de energía regenerativa tiene un efecto importante en la mejora de la regulación de tensión. La explicación de este efecto se encuentra en la disminución de las corrientes pico aportadas desde los alimentadores, siendo reducidos los recorridos de transporte de energía.

La Figura 31 corresponde a la curva de potencia demanda desde la subestación Oriente del Tranvía de Ayacucho, la cual se encuentra ubicada en el punto más pendiente de la línea del tranvía. Como se puede apreciar en las horas valle (de 09:00 a 15:00 aproximadamente), se presentan unos picos que incluso superan las máximas demandas de las horas pico (de 5:00 a 9:00 y de 13:00 a 21:00 aproximadamente), esto se debe a que en las horas valle operan menos tranvías, en esta simulación se encontraban 4 unidades, mientras que en las horas pico operan 7 unidades.

Lo que ocurre en las horas valle, es que la alta demanda energética que producen los tranvías arrancando en alta pendiente, se ve reflejada en la subestación de manera más grave, cuando no hay tranvías frenando que compensen los arranques. En las horas pico, se da un efecto de compensación entre tranvías arrancando y tranvías descendiendo, en la alta pendiente, lo cual genera que los picos máximos en la subestación se reduzcan, aunque la energía final consumida sea mayor que la de las horas valle.

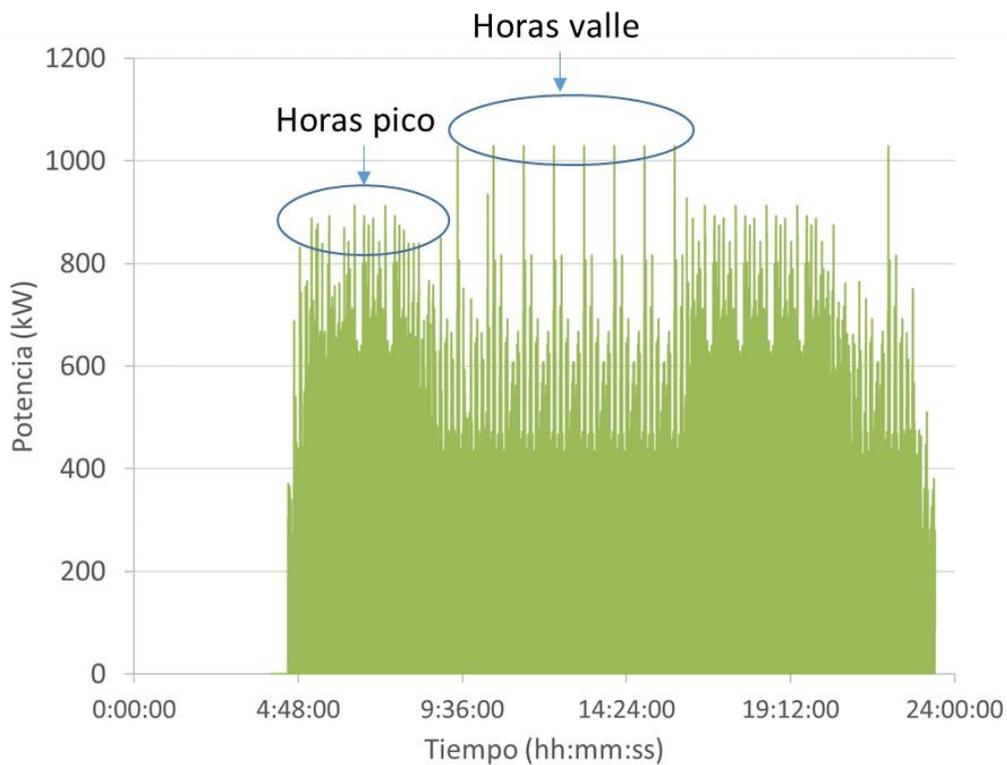


Figura 31. Curva de demanda tranvía de Ayacucho de Medellín en la subestación Oriente

Lo anterior también se puede apreciar en la Figura 32, la cual también corresponde al Tranvía de Ayacucho. En esta se analiza el consumo de demanda energética cuando la flota de vehículos se extiende a 12 trenes, la curva de demanda acumulada en este caso muestra que la operación de 7 vehículos es más exigente en demandas de potencia menores a 100 segundos, puesto que la posibilidad de compensación es menor. Evidentemente después de los 100 s cuando ya importa el consumo de energía de largo plazo, la curva de duración de los 12 vehículos supera la de los 7 vehículos, porque finalmente es un proceso de más energía. De lo anterior se evidencia como la compensación ayuda a reducir los picos de demanda máxima de corta duración lo que favorece también que la profundidad de los huecos de tensión, generados por esas demandas, sean menores; y el esfuerzo sobre los equipos rectificadores de las

subestaciones de demandas instantáneas también sea menor, es decir que estos equipos y el sistema se ve aliviado.

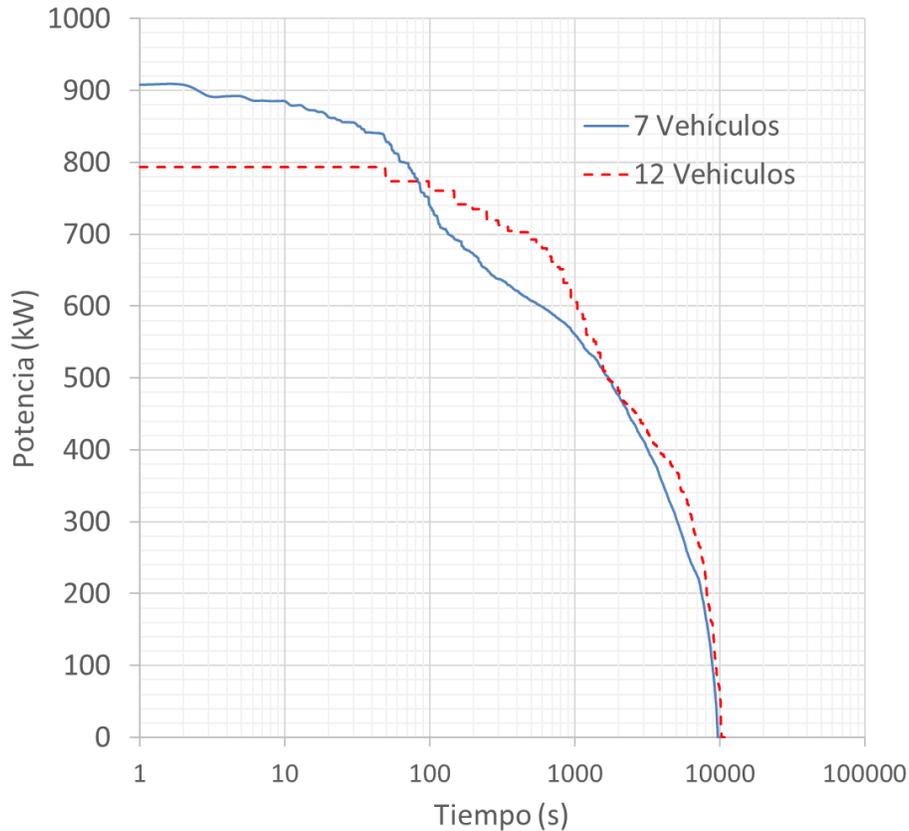


Figura 32. Curva de acumulación de carga en el tiempo para simulación del Tranvía de Ayacucho

En el Metro de Medellín actualmente se cuenta con una flota de 50 trenes, la cual será aumentada a 70 trenes. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.3** se presenta otro ejemplo importante tomado en la subestación Acevedo en el caso de la extensión de la flota a 70 trenes, nuevamente es claro que los 50 trenes provocan esfuerzos mayores de duración menor a los 60 s que la operación con 70 trenes, ya que en la curva se ve un mayor consumo de energía.

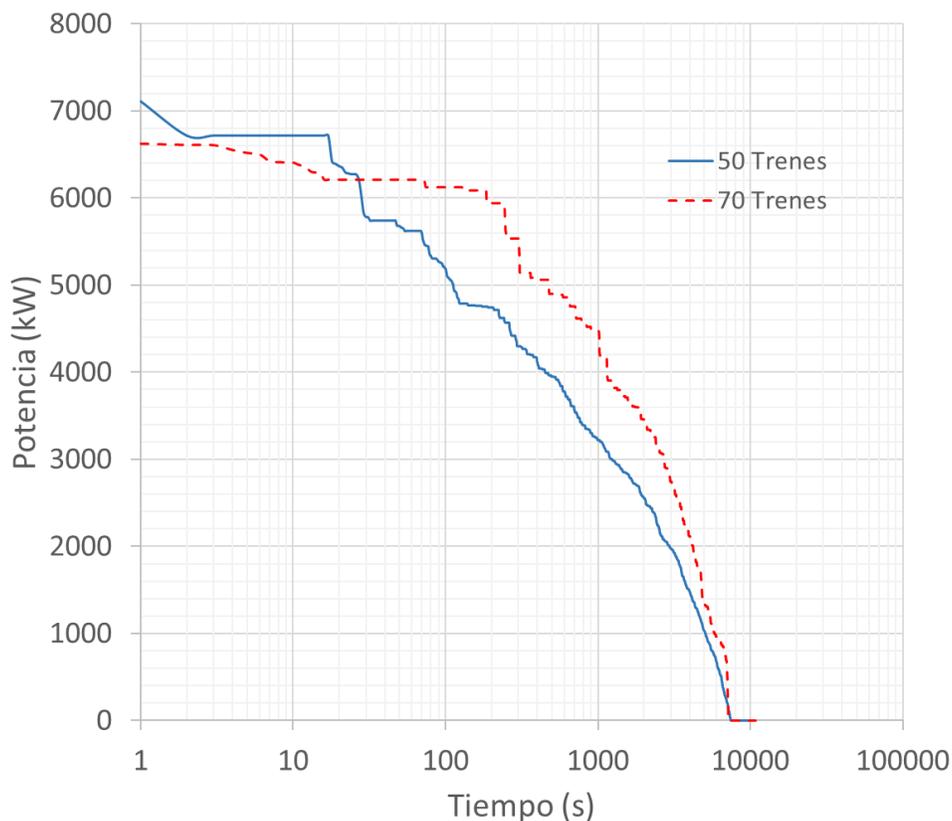


Figura 33. Curva de acumulación de carga en el tiempo para simulación del Metro

Esto se da en subestaciones con altas pendientes o subestaciones con alta densidad de trenes y es un efecto muy común en sistemas no compensados, es decir donde la única compensación es la natural. Cuando ocurre este fenómeno, que la simulación de una flota mayor provoca este efecto de atenuación de las curvas de demanda pico, es porque el sistema tiene una gran posibilidad de compensación, lógicamente puede ser mucho más económico compensar con compensadores tipo ultracapacitor que poner unidades. Muchas veces no justifica poner unidades porque esto tiene el costo operativo de vehículos adicionales; sin embargo, hay que tener en cuenta que más unidades aumentan el confort de los pasajeros, un estudio de detalle determinará si es mejor la compensación forzada o buscar una compensación natural.

En tranvías de alta pendiente es fundamental favorecer intercambio energético entre unidades, ya que la geometría de los trayectos en los sistemas de tracción pueden posibilitar la compensación natural como es el caso de las altas pendientes.

2.4.6 Metodología para la implementación del factor de compensación regenerativo

En la Figura 34, se muestra un diagrama de flujo para la implementación y cálculo del factor de compensación regenerativo, y por medio de este evaluar energéticamente la eficiencia de los sistemas de tracción, bien sean sistemas nuevos o existentes, para ambos casos las acciones a realizar en caso que el factor de compensación sea bajo son diferentes.

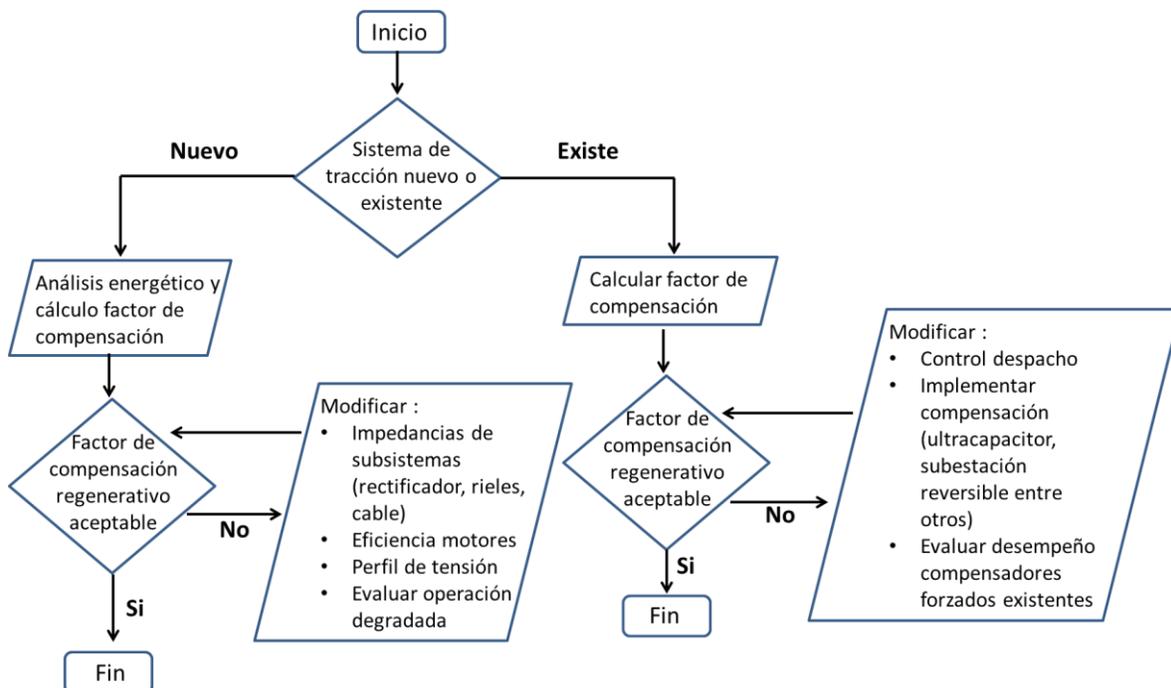


Figura 34. Diagrama de flujo para aplicación de la metodología propuesta

CAPÍTULO 3

3. DESARROLLO DEL CASO DE ESTUDIO

Con el fin de identificar la efectividad del indicador propuesto para el diseño óptimo de sistemas de tracción, se realizan una serie de simulaciones del Metro de Medellín.

En esta sección se explica en detalle el funcionamiento de las herramientas computacionales seleccionadas, *OpenTrack* y *OpenPowerNet*, y se listan las diferentes variables que dichos programas permiten modificar.

3.1 *OpenTrack*

OpenTrack comenzó a mediados de la década de los 90s como un proyecto de investigación en el instituto federal de tecnología de Suiza. El objetivo del proyecto era crear una herramienta para modelado de sistemas de tracción orientada a objetos, que sirviera como una solución práctica a problemas de movilidad complejos. Entre los sistemas de tracción que la herramienta permite simular se encuentran: trenes de alta velocidad, metros, tranvías, entre otros.

OpenTrack permite realizar los siguientes tipos de análisis:

- Determinar los requerimientos de la infraestructura de una red de tracción
- Análisis de la capacidad de líneas y estaciones
- Construcción de tablas de tiempos (para definir el despacho de los diferentes vehículos del sistema)
- Analizar los efectos de fallas en la infraestructura del sistema y posibles retrasos que esta puede ocasionar.
- Cálculo del consumo de potencia y energía en los servicios del tren.
- Simulación de los sistemas de suministro de energía del sistema (mediante la interfaz con el programa *OpenPowerNet*, que será explicado en la sección 3.2)

El programa describe un sistema de tracción en grafos especiales denominados grafos de doble vértice. El usuario puede modificar la topología de la red gráficamente, y modificar los atributos de los conectores del grafo, el cual alberga información como la longitud de un tramo, el gradiente, la máxima velocidad por categoría de tren, entre otros. También permite modificar los parámetros asociados a estaciones, interruptores y rutas. En la Figura 35 se muestra parte de una topología implementada con ayuda de la herramienta. (OpenTrack, 2016)

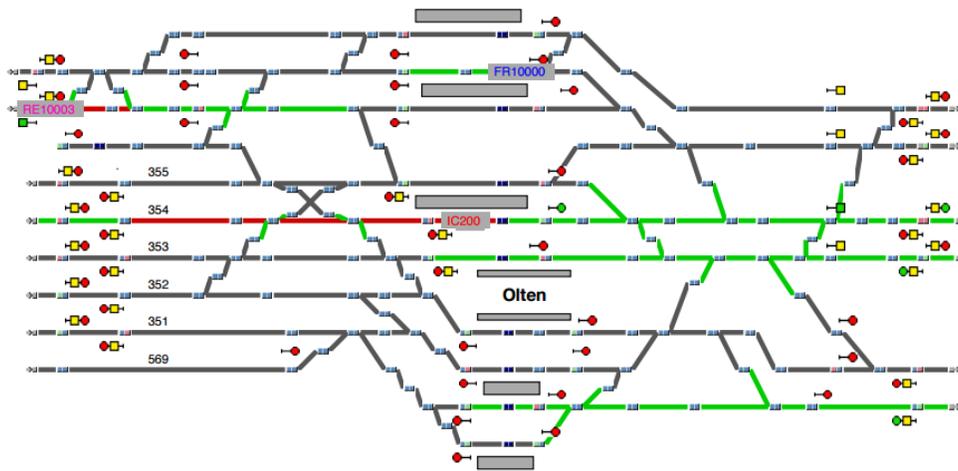


Figura 35. Topología de una red implementada en OpenTrack. (OpenTrack, 2016)

OpenTrack ofrece una interfaz de programación de aplicaciones (API, del inglés *Application Programming Interface*) para conectar el programa con aplicaciones de terceros. La otra aplicación puede enviar comandos estandarizados a *OpenTrack* y recibe mensajes de estado predefinidos de este. (OpenTrack, 2016)

3.2 OpenPowerNet

OpenPowerNet es un *software* de simulación de sistemas de tracción eléctrico desarrollado por el *Institut für Bahntechnik GmbH*. Este está compuesto por dos módulos: ATM, que realiza el modelamiento avanzado de los vehículos, y PSC, que realiza los cálculos del suministro de potencia de la red. A través de la API mencionada en la sección

anterior, es posible comunicar esta herramienta con el *OpenTrack* para así simular la operación completa del sistema de tracción.

Entre los análisis que esta herramienta permite llevar a cabo se encuentran:

- Flujo de carga para redes de tracciones monofásicas, bifásicas y de directa.
- Cálculo del esfuerzo de tracción.
- Cálculo del esfuerzo de frenado y energía recuperada.
- Modelado de las fuentes de alimentación, tales como rectificadores e inversores, transformadores, entre otros.
- Modelado de dispositivos limitadores de tensión.
- Cálculo de las corrientes de corto circuito a través de la línea.
- Balance de energía en la red.
- Análisis de carga en los equipos.
- Cálculo y visualización del campo electromagnético.

Para configurar los parámetros de la red, se usan archivos en formato *xml* (*Extensible Markup Language*). En estos se declaran los valores de diversos atributos de la red, tales como:

- Impedancia del rectificador
- Impedancia por unidad de longitud del cable mensajero y el cable de contacto
- Impedancia de los rieles.
- Estado del interruptor de apertura/cierre del rectificador.
- Tensión nominal del sistema.
- Frecuencia nominal

En la Figura 36 se muestra la interfaz al interior del programa para la edición del *xml*:

[-] PSC	(Network+, Options)
[-] Network	all(Lines?, Connectors?, Substations?, Earth, Times?, Mergers?)
⊙ name	METRO A
⊙ use	true
⊙ voltage_kV	1.5
⊙ frequency_Hz	0
⊙ recordVoltage	true
⊙ recordCurrent	true
[-] Lines	(Line+)
[-] Earth	
[-] Substations	(Substation+)
[-] Substation	(ThreeWindingTransformer*, TwoWindingTransformer*, Autotransformer*)
⊙ name	PBE
[-] Rectifier	(OCSBB, RailsBB)
⊙ name	NA11
⊙ nomVoltage_kV	1.650
⊙ internalResistance_Ohm	0.0001
[-] OCSBB	all(Switch?)

Figura 36. Interfaz en OpenPowerNet para la edición de archivos de configuración en formato XML.

Una vez se realiza el análisis conjunto (ejecutando de forma paralela las dos herramientas), se genera una base de datos con la cual se pueden realizar los análisis deseados. Para este caso, se utiliza la herramienta de análisis energético, cuyos resultados se presentan como se muestra en la Figura 37:

Energy Overview, metro de medellin, Metro A y B	
Network METRO B, 04:59:59.0 - 23:02:04.0	
Total energy at traction power supplies	27.169 kWh
Energy from traction power supplies to catenary system	27.169 kWh
Energy from catenary system to traction power supplies	0 kWh
Total energy at vehicle pantographs	26.464 kWh
Energy from catenary system to vehicle pantographs	38.364 kWh
Energy from vehicle pantographs to catenary system	11.900 kWh
Total losses in catenary system	705 kWh
Losses in substation feeder cables	78 kWh
Losses in ContactWire	174 kWh
Losses in MessengerWire	439 kWh
Losses in Rail	15 kWh
Losses in Earth	0 kWh
Losses in connectors	0 kWh

Figura 37. Resultados de análisis energético, presentados por la herramienta OpenPowerNet

3.3 Caso de estudio

Con el fin de evaluar el comportamiento del indicador propuesto, se utiliza como caso base la implementación de las líneas A y B del metro de Medellín y el Tranvía de Ayacucho. En la Figura 38 se observa el diagrama del Metro tras su implementación en el *OpenTrack*.

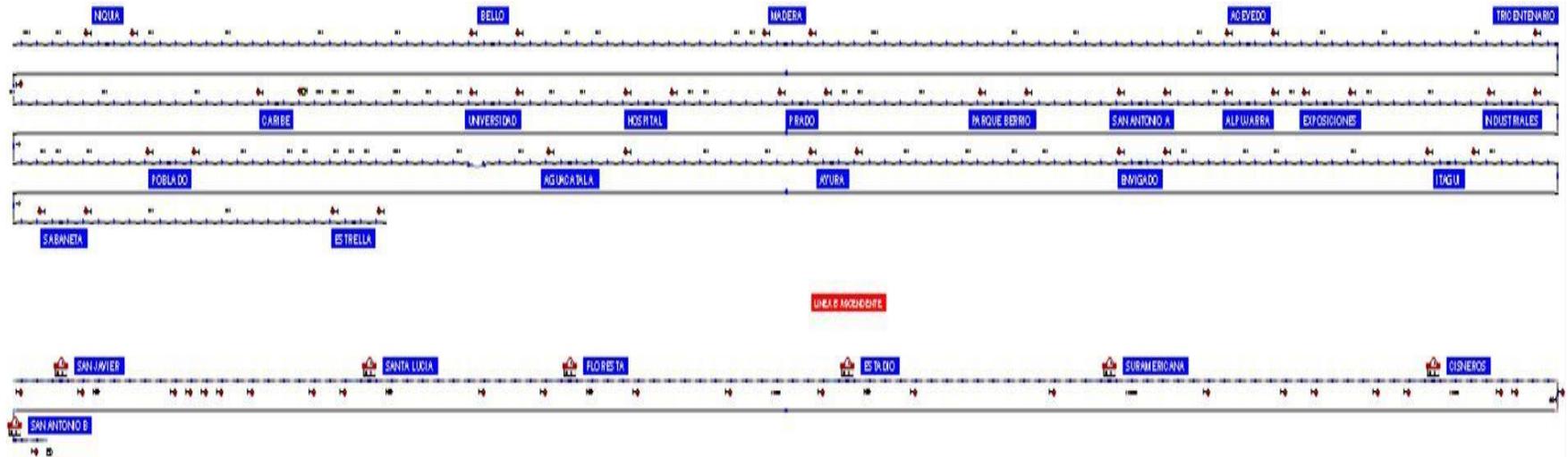


Figura 38. Caso de estudio, tal como se visualiza en *OpenTrack*

La construcción del caso en *OpenPowerNet* fue proporcionado por el grupo de investigación T&D y El Metro de Medellín

Las simulaciones efectuadas para la aplicación de la teoría del factor de compensación regenerativo se realizaron para El tranvía y el Metro de Medellín, a continuación se presenta una breve descripción de estos dos sistemas de tracción.

En la ciudad de Medellín se implementó un tranvía, Figura 39, el cual consta de una línea de 4.3km de extensión, 9 estaciones y una velocidad promedio por vehículo de 25km/h. Este se encuentra comunicado con la línea principal del metro de Medellín y una línea del sistema de Góndolas, Metro Cable.



Figura 39. Tranvía Medellín. (Tiempo, 2016)

En la ciudad de Medellín se inauguró el primer sistema de trenes eléctricos llamado Metro de Medellín, el 30 de noviembre de 1995, que fue el primer sistema de transporte masivo moderno en Colombia y sigue siendo el único sistema de metro actualmente en el país. Está compuesto por dos líneas férreas en servicio comercial (Línea A y Línea B) con una longitud de 31.30 km y una línea férrea de enlace (Línea C) con una longitud de 3.20 km, totalizando 34.50 km de vía férrea.

Hoy, después de 20 años de funcionamiento, el área de influencia directa de la red METRO se extiende por seis municipios: Bello, Medellín, Itagüí, Envigado, Sabaneta y La Estrella y cuenta con rutas integradas a otros municipios cercanos.

En la Figura 40 se presentan las distintas líneas de operación del Metro de Medellín, y en la Figura 41 se muestra un tren del Metro de Medellín.

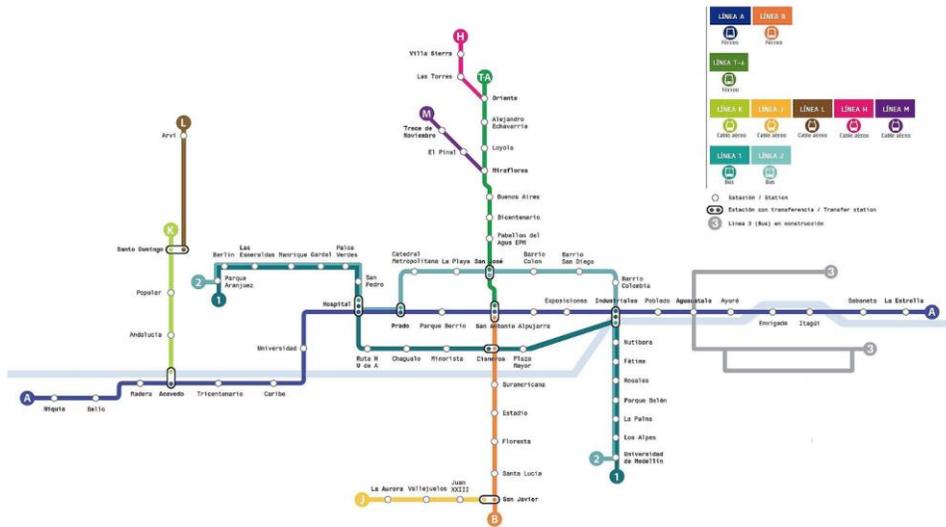


Figura 40. Líneas que componen el Metro de Medellín. (Metro, 2016)



Figura 41. Metro de Medellín. (Metro, 2016)

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los datos obtenidos tras las simulaciones realizadas en los programas de OpenTrack y OpenPowerNet para los sistemas de transporte masivos de Medellín, Metro y Tranvía. Con los datos obtenidos se realizará el cálculo del factor de compensación de energía regenerativa y su diagrama correspondiente.

4.1 Casos de estudio y análisis de resultados

Caso A

En la Tabla 5 se presentan los datos obtenidos para la simulación del tranvía de Ayacucho con 7 vehículos y el cálculo del factor de compensación de energía regenerativa (FCR)

Período de tiempo simulación	4:00 a 11:00
Eactivada (kWh)	10,746
Eregenerativa (kWh)	1,504
Eneta consumida (kWh)	9,242
Eaparente activada inicial (kWh)	15,197
Eaparente activada final (kWh)	14,174
Factor sin regeneración Cos(ϕinicial)	0.707
(ϕinicial)	45.0
Factor de compensación de energía regenerativa Cos(ϕfinal)	0.758
(ϕfinal)	40.7

Tabla 5. Datos obtenidos del flujo de energía – Tranvía con 7 vehículos

En la Figura 42 se presenta el diagrama correspondiente para el caso del tranvía con 7 vehículos.

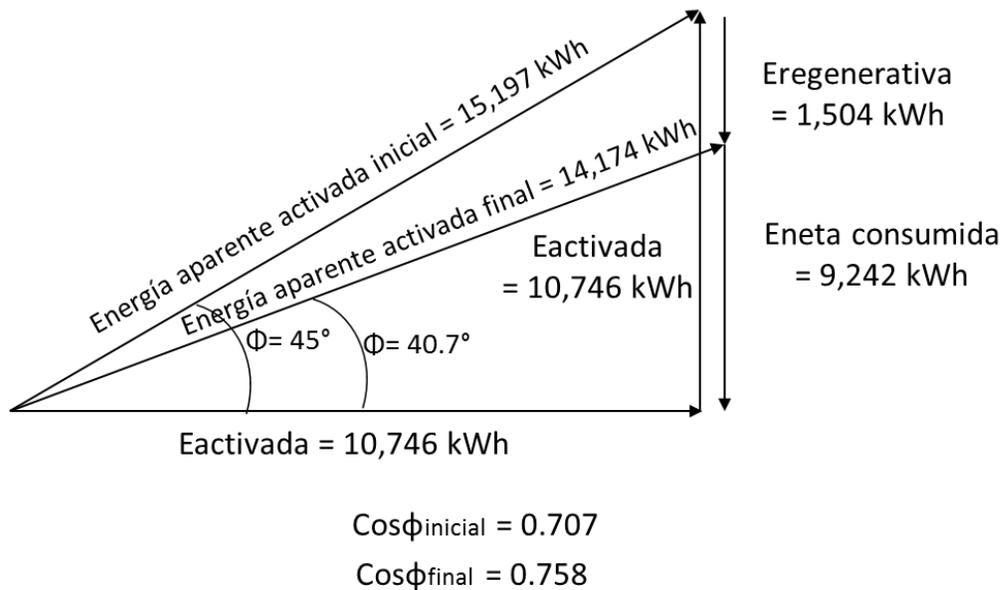


Figura 42. Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Tranvía con 7 vehículos

Caso B

En este caso se busca evaluar el impacto de adicionar un mayor número de vehículos al sistema del tranvía. Los resultados obtenidos tras el análisis energético se presentan en la Tabla 6 para un sistema con 12 vehículos:

Período de tiempo simulación	4:00 a 11:00
Eactivada (kWh)	22,326
Eregenerativa (kWh)	3,765
Enet consumida (kWh)	18,561
Eaparente activada inicial (kWh)	31,574
Eaparente activada final (kWh)	29,034
Factor sin regeneración Cos(ϕ_{inicial})	0.707
(ϕ_{inicial})	45.0
Factor de compensación de energía regenerativa Cos(ϕ_{final})	0.769
(ϕ_{final})	39.7

Tabla 6. Datos obtenidos del flujo de energía – Tranvía con 12 vehículos

El diagrama de la Figura 43, corresponde al triángulo de compensación de energía regenerativa para el caso de estudio:

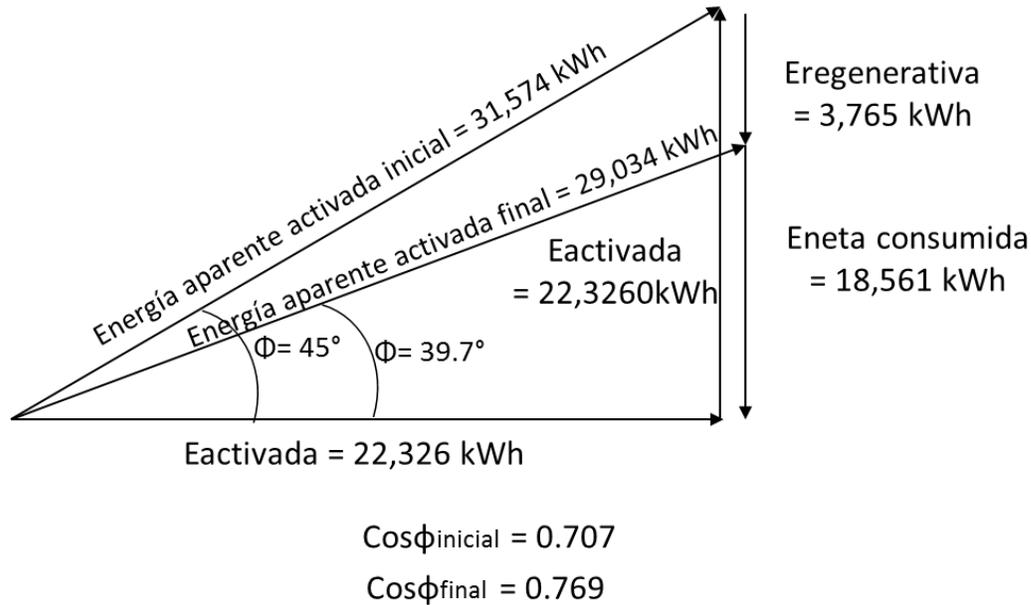


Figura 43. Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Tranvía con 12 vehículos

De los casos A y B se puede observar que no existe una diferencia significativa en los factores de compensación obtenidos, aunque el FCR se ve mejorado levemente con más vehículos gracias a que existe más posibilidad de regeneración. Si bien se aumentó el número de vehículos (lo cual se refleja en un incremento en la energía neta), la energía recuperada crece en proporción a esta. Esto es indicativo de que a pesar que el aumento en la operación podría reducir la eficiencia energética del sistema, esta puede mantenerse óptima siempre que esta se controle en cuanto a despacho, disponibilidad de subestaciones de tracción, entre otros.

Como la simulación comprende hora valle y pico es difícil discernir con mayor amplitud el efecto de la compensación.

Caso C

En la Tabla 7 se presentan los datos obtenidos para la simulación del Metro de Medellín en la línea B en operación normal.

Período de tiempo simulación	5:00 a 11:00
Eactivada (kWh)	23,412
Eregenerativa (kWh)	3,717
Eneta consumida (kWh)	19,695
Eaparente activada inicial (kWh)	33,110
Eaparente activada final (kWh)	30,594
Factor sin regeneración Cos(ϕinicial)	0.707
(ϕinicial)	45.0
Factor de compensación de energía regenerativa Cos(ϕfinal)	0.765
(ϕfinal)	40.1

Tabla 7. Datos obtenidos del flujo de energía – Metro Medellín línea B operación normal

El diagrama de la Figura 44, corresponde al triángulo de compensación de energía regenerativa para el caso de estudio:

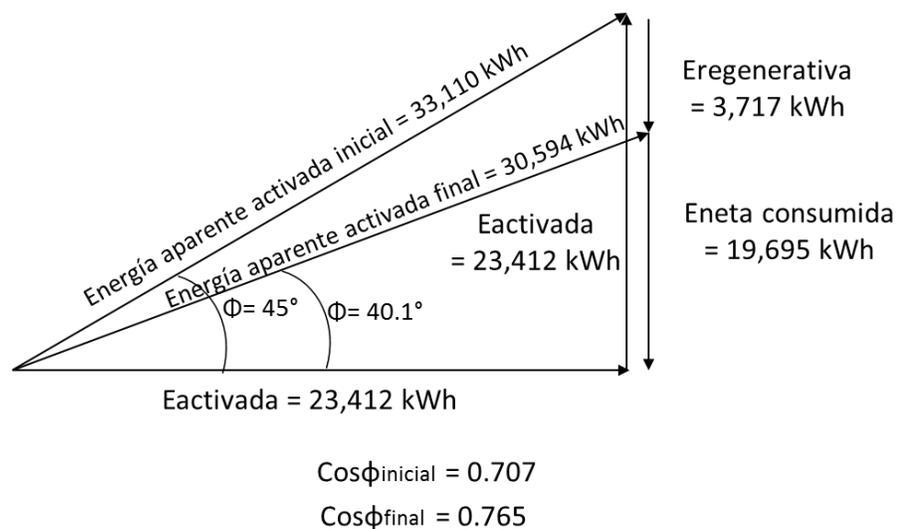


Figura 44. Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Metro Medellín línea B operación normal

En la Figura 45 se observa el perfil de tensión obtenido para este caso. Como se puede observar no se presentan desviaciones significativas respecto a la tensión nominal de operación del sistema (1600 VDC).

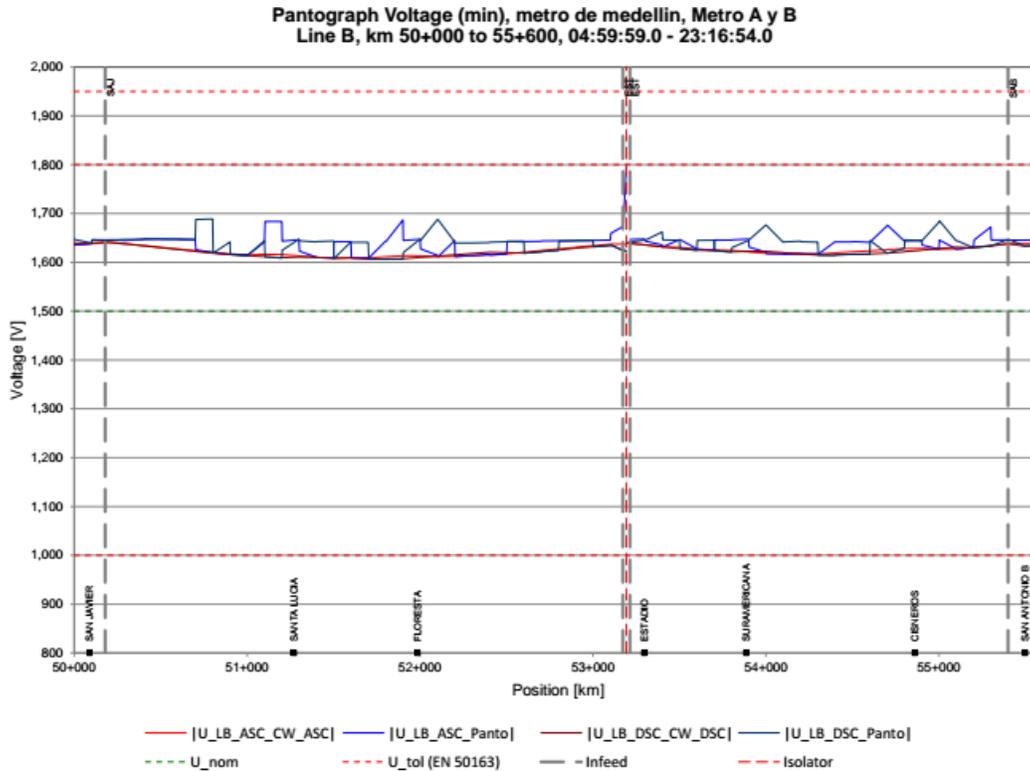


Figura 45. Perfil de tensión – Operación normal Metro Medellín

Caso D

En este caso se busca evaluar el impacto de adicionar un mayor número de trenes en el Metro, pasar de 50 vehículos a 70. Los resultados obtenidos tras el análisis energético se presentan en la Tabla 8:

Período de tiempo simulación	5:00 a 11:00
Eactivada (kWh)	38,634
Eregenerativa (kWh)	11,900
Eneta consumida (kWh)	26,734
Eaparente activada inicial (kWh)	54,637
Eaparente activada final (kWh)	46,982
Factor sin regeneración Cos($\phi_{inicial}$)	0.707
($\phi_{inicial}$)	45.0
Factor de compensación de energía regenerativa Cos(ϕ_{final})	0.822
(ϕ_{final})	34.7

Tabla 8. Datos obtenidos del flujo de energía – Metro línea B operación aumentada

El diagrama de la Figura 46, corresponde al triángulo de compensación de energía regenerativa para el caso de estudio:

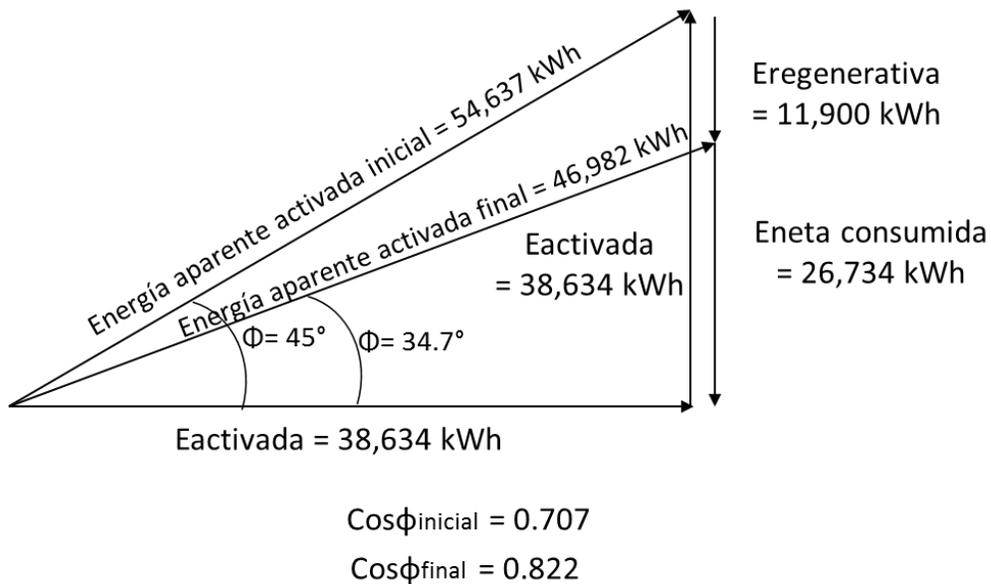


Figura 46. Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Metro línea B operación aumentada

De los casos C y D se puede observar que este caso es por excelencia el ejemplo de regeneración natural, en el cual el incremento de la flota, provoca un incremento significativo de la energía recuperada vía frenado regenerativo.

En este caso el sistema pasa de un factor de compensación en operación con flota normal de 0.765 a 0.822, lo que muestra un aumento significativo de regeneración natural.

Caso E

En la Tabla 9 se presentan los resultados para una simulación correspondiente a la línea B del Metro de Medellín sin una de sus subestaciones, tratando de emular una contingencia o mantenimiento en una de ellas para conocer sus efectos en el FCR, en este caso se elimina de servicio la subestación estadio:

Período de tiempo simulación	5:00 a 8:00
Eactivada (kWh)	7,607
Eregenerativa (kWh)	2,398
Eneta consumida (kWh)	5,209
Eaparente activada inicial (kWh)	10,758
Eaparente activada final (kWh)	9,220
Factor sin regeneración $\text{Cos}(\phi_{\text{inicial}})$	0.707
(ϕ_{inicial})	45.0
Factor de compensación de energía regenerativa $\text{Cos}(\phi_{\text{final}})$	0.825
(ϕ_{final})	34.4

Tabla 9. Datos obtenidos del flujo de energía – Metro Línea B sin subestación estadio

El diagrama de la Figura 47, corresponde al triángulo de compensación de energía regenerativa para el caso de estudio:

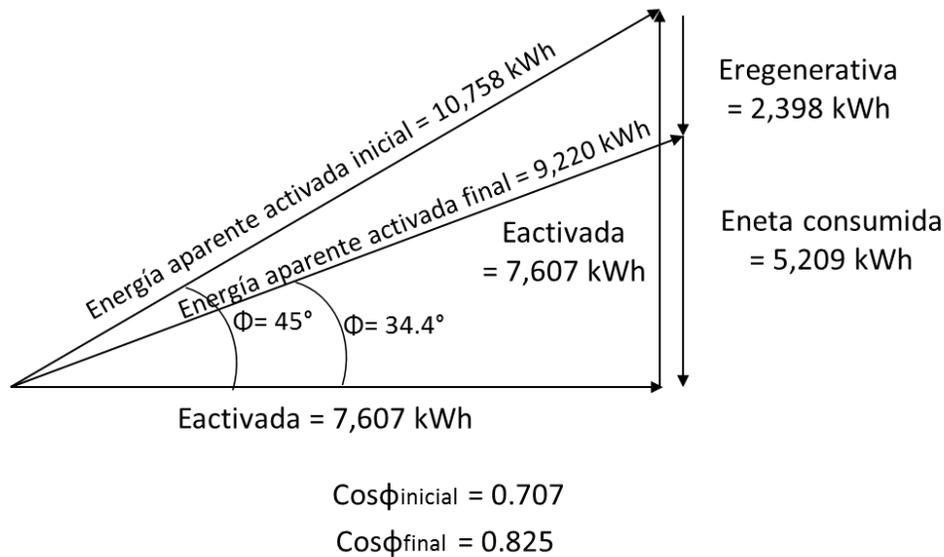


Figura 47. Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Metro línea B sin subestación estadio

En este caso se observa que ante una operación degradada (ante una contingencia o mantenimiento) mejora el factor de compensación. Este fenómeno se explica con el perfil de tensión mostrado en la Figura 48. En este se observa que en las cercanías a la subestación fuera de servicio, se presenta un valle en la característica, los trenes cuando operan cerca a este valle encuentran la red receptiva, es decir que puede recibir la energía sin acercarse al umbral de sobretensión del sistema. Lógicamente debe verificarse que no se comprometa a que el sistema entre en subtensiones: sin embargo, es posible concluir que una fuente muy rígida y con una tensión cercana al límite superior de regeneración, no permite el intercambio de energía entre trenes. Se debe recordar que una de las consideraciones para definir umbrales mayores en los límites de tensión tanto hacia arriba y hacia debajo de la referencia nominal, es precisamente favorecer el intercambio de energía entre trenes.

En ocasiones, cuando el sistema está subutilizado (los trenes que se operan son muy pocos respecto a la capacidad disponible en catenaria) la firmeza o solidez de la fuente provoca que esta esté poco receptiva para el aprovechamiento del frenado regenerativo y

por tanto una operación degradada puede ser recomendable (con esto se refiere a la operación con menos fuentes o elementos de alimentación como rectificadores).

Esto tiene como beneficio adicional reducir los niveles de cortocircuito, con la desventaja de reducir la confiabilidad. Sin embargo, la operación con poca frecuencia indica que la confiabilidad no es un aspecto tan importante, en la medida en que el volumen de pasajeros transportados es menor y las posibilidades de alimentación alternativa son mayores. Estos resultados muestran que por ejemplo, en un sistema concebido a futuro, se puede contemplar el incremento gradual de las subestaciones de alimentación considerando la operación inicial con la mitad de la capacidad instalada, y de esta forma hacer tractivo financieramente el proyecto.

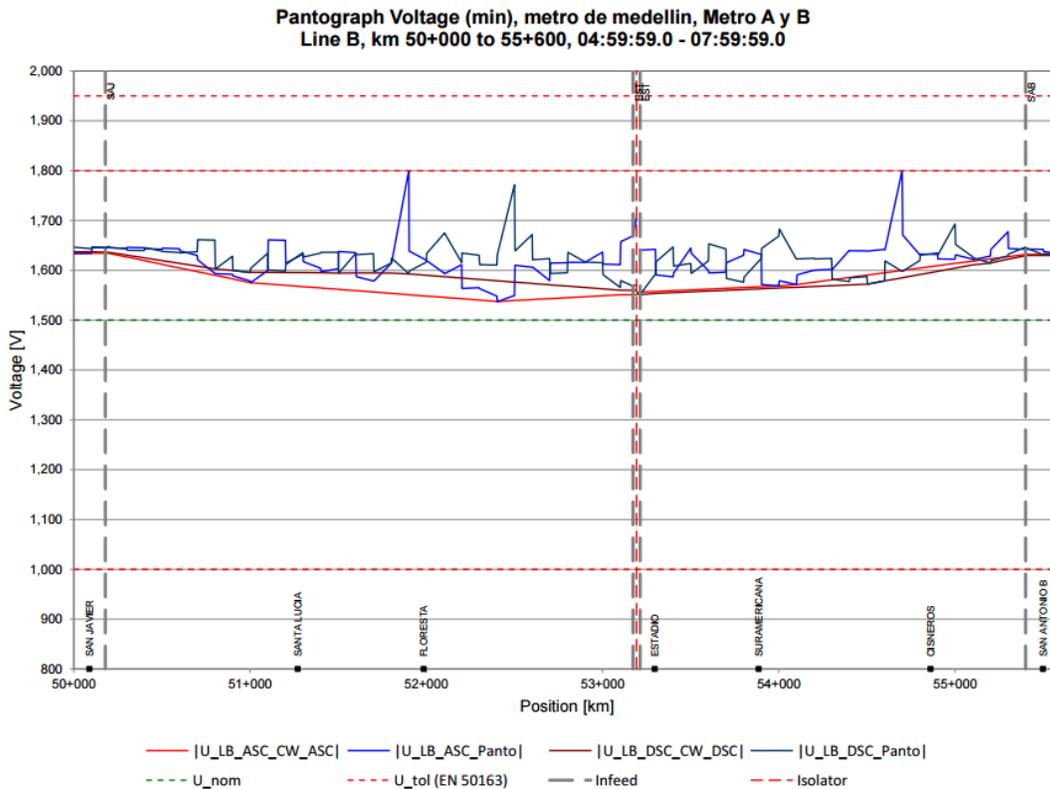


Figura 48. Perfil de tensión – Operación sin subestación de tracción en Estadio- Línea B

Caso F

En la Tabla 10 se presentan los resultados para una simulación correspondiente a la línea B del Metro de Medellín sin un rectificador, tratando de emular una contingencia o mantenimiento en este dispositivo y conocer el impacto en el FCR:

Período de tiempo simulación	4:00 a 11:00
Eactivada (kWh)	27,507
Eregenerativa (kWh)	5,880
Energía consumida (kWh)	21,627
Energía aparente activada inicial (kWh)	38,901
Energía aparente activada final (kWh)	34,991
Factor sin regeneración $\cos(\phi_{inicial})$	0.707
$(\phi_{inicial})$	45.0
Factor de compensación de energía regenerativa $\cos(\phi_{final})$	0.786
(ϕ_{final})	38.2

Tabla 10. Datos obtenidos del flujo de energía – Metro Línea B con un rectificador

El diagrama de la Figura 49, corresponde al triángulo de compensación de energía regenerativa para el caso de estudio:

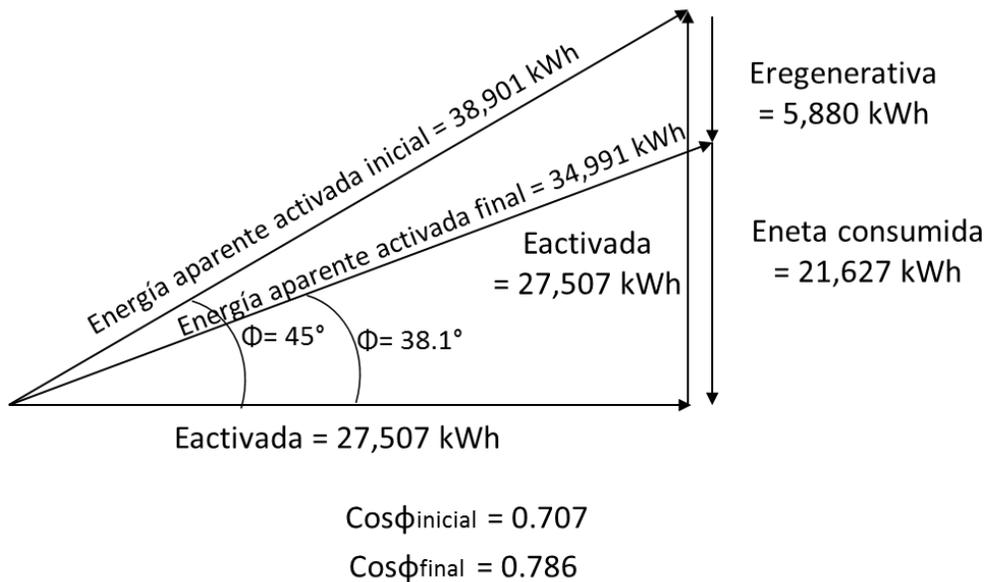


Figura 49. Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Metro línea B con un rectificador

Nuevamente se detecta que una fuente débil facilita el intercambio de energía entre trenes, siempre y cuando no se comprometa los niveles de subtensiones.

Como se puede observar el FCR mejora, en este caso, cuando solo se tiene un grupo de rectificadores. De acuerdo a estos resultados en el caso del metro de Medellín, que se tienen dos sistemas de rectificación idénticos por subestación de tracción de 3.5MVA, se hubiera podido explorar la posibilidad de haber operado los primeros años con un solo grupo rectificador, lo cual hubiera ocasionado que la inversión inicial fuera de menor costo.

Caso G

En la Tabla 11 se presentan los resultados para una simulación correspondiente a la línea B del Metro de Medellín con compensación forzada por medio de un ultracapacitor cuya capacidad de almacenamiento por ciclo es de 0.5kWh regenerativos, se aprovecha esta

última designación para insinuar la propuesta de medir el tamaño de la compensación forzada en kWh regenerativos:

Período de tiempo simulación	5:00 a 8:00
Eactivada (kWh)	5,802
Eregenerativa (kWh)	1,670
Eneta consumida (kWh)	4,132
Eaparente activada inicial (kWh)	8,205
Eaparente activada final (kWh)	7,123
Factor sin regeneración Cos(ϕinicial)	0.707
(ϕinicial)	45.0
Factor de compensación de energía regenerativa Cos(ϕfinal)	0.815
(ϕfinal)	35.5

Tabla 11. Datos obtenidos del flujo de energía – Metro línea B con ultracapacitor

El diagrama de la Figura 50, corresponde al triángulo de compensación de energía regenerativa para el caso de estudio:

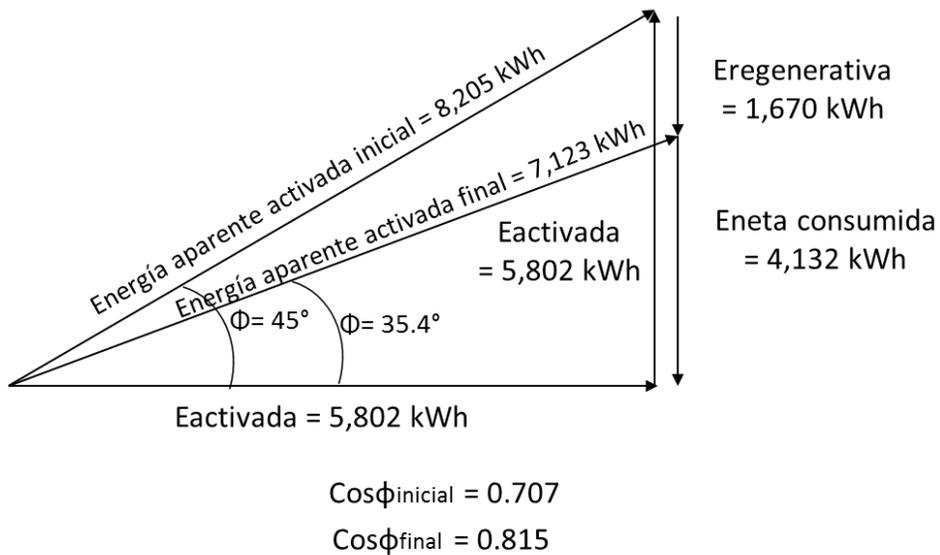


Figura 50. Diagrama factor de compensación energía regenerativa - Metro línea B con ultracapacitor

Caso H

En la Tabla 12 se presentan los resultados para una simulación complementaria al caso G, donde bajo las mismas condiciones del caso de estudio, se retira la compensación con el ultracapacitor para evaluar las diferencias en regeneración y en el FCR:

Período de tiempo simulación	5:00 a 8:00
Eactivada (kWh)	5,802
Eregenerativa (kWh)	1,528
Eneta consumida (kWh)	4,274
Eaparente activada inicial (kWh)	8,205
Eaparente activada final (kWh)	7,206
Factor sin regeneración Cos(ϕinicial)	0.707
(ϕinicial)	45.0
Factor de compensación de energía regenerativa Cos(ϕfinal)	0.805
(ϕfinal)	36.4

Tabla 12. Datos obtenidos del flujo de energía – Metro línea B sin ultracapacitor

El diagrama de la Figura 51, corresponde al triángulo de compensación de energía regenerativa para el caso de estudio:

4.1.1 Observaciones sobre el análisis de resultados de los casos analizados, del triángulo de energía regenerativa

- Las evaluaciones se hacen sobre períodos de tiempo de interés de análisis. Si se efectúa en un ciclo de tracción, arranque – frenado, la energía regenerativa sirve para dimensionar la capacidad del dispositivo de almacenamiento de energía para efectuar una compensación forzada.
- Se recomienda para la evaluación global de sistemas, que el período de análisis se realice con duración de un día de operación típica, tanto en día laboral, como en día festivo. De no ser posible, la muestra de operación intensiva se puede tomar analizando (las tres horas). El período que contenga las tres horas de mayor demanda, con la hora pico como centro del intervalo. Para operación no intensiva, o valle, se toma un período de 3 horas, cuya hora central corresponde a la de menor demanda del sistema.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones aquí presentadas y otras realizadas, se recomiendan los siguientes límites y niveles propuestos para el FCR:
FCR = 0.7 Mal compensado
FCR = 0.8 Normal
FCR = 0.9 Bien compensado

5. CONCLUSIONES

- Existen analogías de comportamientos técnicos casi idénticos entre los sistemas eléctricos de corriente alterna y los sistemas de tracción eléctrica, estas similitudes permiten plantear un factor de compensación regenerativo que así como en los sistemas de potencia se evalúa la eficiencia energética por medio del factor de potencia, se pueda determinar en los sistemas de tracción la eficiencia en cuanto a la regeneración de energía.
- Por medio de la definición de un factor de compensación regenerativo para los sistemas de tracción se puede evaluar el desempeño energético, que permita establecer que tan aprovechada esta la energía disponible al momento de frenado o descenso, dependiendo del sistema que se esté estudiando.
- Establecer criterios que sirvan como herramienta para la planeación de los nuevos sistemas de tracción y la evaluación de los existentes, en cuanto a la eficiencia energética relacionada con el frenado regenerativo, es muy valioso para definir con bases lineamientos operativos en cuanto a despacho de flota, tomar decisiones de instalación de nuevos equipos, diseño adecuado de equipos definición, optimización en el uso de activos del sistema entre otros.
- Es importante evaluar el funcionamiento degradado operando con menos fuentes o elementos de alimentación como rectificadores, ya que permite aprovechar más la energía recuperada proveniente del frenado regenerativo (debido a que la red se encuentra más receptiva), a la vez que incrementa la vida útil de los equipos.
- En el diseño o planeación de un sistema de tracción se debe contemplar las formas de compensación en los sistemas de tracción (compensación forzada y natural), con el fin de implementar estos tipos de compensación y evaluar de acuerdo al tipo de sistema cual es el más indicado.

- Para sistemas futuros, en lugar de construir las subestaciones de tracción con dos rectificadores y transformadores, esto se debe realizar gradualmente con el fin de hacer económicamente viable este tipo de sistemas, siempre que se mantenga la confiabilidad del mismo.
- Para la concepción de las nuevas líneas de metro cable en la ciudad de Medellín, como el caso del Picacho, se debe tener en cuenta el uso de variadores de velocidad regenerativos, con el fin de aprovechar la energía potencial de los usuarios que descienden de los barrios altos de la ciudad y evitar la disipación de energía en forma de calor.
- En casos como el del tranvía de Ayacucho, en el cual se presentan condiciones favorables por la alta pendiente, se debe estudiar el aprovechamiento de la compensación natural con el fin de aprovechar al máximo esta energía disponible, que depende en este caso no solo de la componente inercial sino también la gravitacional.
- Después de efectuar una revisión bibliográfica y una vigilancia tecnológica de los sistemas de aprovechamiento de energía de los frenados regenerativos, este trabajo ha postulado un método para evaluar sistemas de tracción eléctrica, en cuanto a su eficiencia en la gestión de la energía recuperable.

Este método se basa en un diagrama de energía y el triángulo subsecuente de energía activada – regenerativa.

El triángulo de energía activada – regenerativa se ha definido para generar una relación de analogía con el triángulo de potencia activa – reactiva de los sistemas de corriente alterna.

El método de análisis fue aplicado a casos de estudio, permitiendo demostrar su pertinencia, utilidad e impacto pedagógico.

Se aplicó a:

- Sistema metro actual y degradado y expandido en flota

- Tranvía de Ayacucho
- Línea B, con compensador forzado

El método permite diagnosticar la gestión de la energía regenerativa, y dimensionar posibles soluciones de compensación de energía regenerativa, en analogía con la compensación de potencia reactiva.

6. TRABAJO FUTURO

- En este trabajo se establece una metodología que permite determinar, desde el punto de vista energético, que tan eficiente es el diseño y la operación de sistemas de tracción. Y aunque se proponen unos límites para el FCR no se tiene certeza de la precisión de estos valores. Como trabajo futuro se propone tomar este factor y definirlo como la función objetivo de un problema de optimización en el cual se busque el juego de parámetros óptimos para el diseño de un sistema de tracción.
- En el capítulo 2, al establecer los equivalentes analíticos entre los sistemas de corriente alterna y los sistemas de tracción eléctrica, se define el concepto de histéresis de tracción. Al igual que la histéresis magnética, el área de esta histéresis de tracción puede servir como indicativo de que tan bien diseñado está un sistema de tracción, por lo que en un trabajo futuro se propone trabajar el problema de optimización antes citado, usando como función objetivo el área de dicha curva.
- Por medio del factor de compensación regenerativo se podría pensar el aplanamiento de curvas de demanda en los diferentes sistemas de tracción, de tal manera que la energía que se pueda almacenar por medio de un mecanismo de compensación forzada, pueda ser aprovechada en horas valle.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersen, G. M. (2007). *Commonwealth Edison Railroad*. Obtenido de Shore-Line: <http://www.shore-line.org/cer.html>
- Chen Lv, J. Z. (2016). Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles. *Energy Conversion and Management*, 469-482.
- Dale, S. (2016). *MEDELLÍN METROCABLES*. Obtenido de Gondola Project: <http://gondolaproject.com/medellin/>
- Díez, A. (2015). DC compensation systems and their implications on the planning of expansions in Metro systems: a case study of Medellin. *Energy and Sustainability VI*, 281-291.
- Facchinetti, E. (2013). *Sustainable and intelligent management of energy for smarter railway systems in Europe: an integrated optimization approach*. Merlin.
- Frey, S. (2012). *Railway electrification systems and engineering*. Delhi: White Word Publications.
- Hincapie, A. (2012). ANÁLISIS DE RIESGO Y ASEGURABILIDAD DEL SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO TROLEBÚS. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 42-53.
- Kamil. (2015). *Computing energy loss for a hysteresis curve*. Obtenido de <http://physics.stackexchange.com/questions/170408/computing-energy-loss-for-a-hysteresis-curve>
- López, A. (2013). Aprovechamiento de la energía procedente del frenado regenerativo en ferrocarriles metropolitanos. *Anales de mecánica y electricidad*, 12-18.
- López, D. (s.f.). Estudio del aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes. *Railway R&D*, 79-85.

- M. Boisvert, D. M. (2013). Comparison of two strategies for optimal regenerative braking, with their sensitivity to variations in mass, slope and road condition. *7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, 626-630.
- Metro. (2016). *Metro de Medellín*. Obtenido de <http://mapa-metro.com/es/Colombia/Medellin/Medellin-Metro-mapa.htm>
- Montesinos Ortuño, J. (2002). *Tecnología de catenaria*. Madrid: RENFE.
- OpenTrack. (2016). *OpenTrack Manual*. Obtenido de http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_e/opentrack_e.html#Data
- Ortega, J. (28 de Junio de 2011). *INGEBER SYSTEM FOR KINETIC ENERGY RECOVERY & METRO BILBAO EXPERIENCE*.
- Perrotta, D., & Ribeiro. (2016). On the potential of regenerative breaking of electric buses as a function of their itinierary.
- Qiu, C. (2016). New evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 389-398.
- Rashid, M. (2010). *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*. Texas: CRC Press.
- Technologies, M. (2014). Obtenido de www.maxwell.com
- Terrer, H. (7 de Octubre de 2013). *Frenado regenerativo: Aprovechamiento de la energía cinética y su aplicación ferroviaria*. Obtenido de <http://hctevi.blogspot.com.co/2013/10/frenado-regenerativo-aprovechamiento-de.html>
- Teymourfar, R. (2012). Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line. *Energy Conversion and Management*, 206-214.
- Tiempo, E. E. (2016). *Ya rueda el tranvía en Medellín*. Obtenido de El Tiempo: <http://www.eltiempo.com/multimedia/especiales/tranvia-en-medellin/16404053/1>

Topalian, D. (2016). *Capacitores y ultracapacitores*. Obtenido de <http://slideplayer.es/slide/1551173/>

Vito Calderaro, V. G. (2015). Optimal Siting and Sizing of Stationary Supercapacitors in a Metro Network using PSO.