

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC

CARRERA DE INGENIERÍA DE LA ENERGÍA



**ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS PARA EL
APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA PRODUCIDA
POR EL FRENADO REGENERATIVO DE LOS TRENES
DE LA LÍNEA 1 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para optar el grado de bachiller de Ingeniería de la Energía

AUTOR

Gianfranco Alfieri Podestá Arana (ORCID: 0000-0003-4651-4034)

ASESOR

Luis Alberto García Palomino

Lima – Perú

2021

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN.....	xii
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	19
1.1. El Metro de Lima y Callao.....	19
1.1.1. La Línea 1	21
1.2. Sistemas de Alimentación	24
1.2.1. Sistema de Tracción	25
1.2.2. Sistema Auxiliar.....	29
1.3. Máquina Motriz.....	29
1.3.1. Motores.....	29
1.3.2. Inversores	33
1.3.3. Etapas de Operación.....	34
1.4. Frenado Regenerativo	35
1.5. Alternativas para el aprovechamiento de la energía de frenado regenerativo	37
1.5.1. Devolución de Energía a la Red.....	38
1.5.2. Almacenamiento de Energía	47
1.6. Comparación de Alternativas	63
1.7. Software de Modelado eTrax de ETAP	64
CAPÍTULO II METODOLOGÍA	66
2.1. Recopilación e Ingreso de Información a eTrax	67
2.1.1. Características Geoespaciales	68

2.1.2. Características del Sistema Eléctrico	70
2.1.3. Características del Material Rodante.....	84
2.1.4. Características Operacionales	92
2.2. Simulación bajo el Escenario Base	94
2.2.1. Validación del Modelo	95
2.2.2. Parámetros Base	96
2.3. Preselección de Alternativas	96
2.4. Simulación con Alternativas Preseleccionadas	98
2.4.1 Subestaciones Reversibles	98
2.4.2 Banco de Baterías	99
2.5. Selección de alternativa óptima mediante Matriz <i>MCA</i>	101
CONCLUSIONES.....	105
AGRADECIMIENTOS.....	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
ANEXOS	120

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Rutas preliminares de las Líneas de la Red Básica del Metro de Lima	20
Tabla 1.2. Clasificación de los tipos de cargas en los sistemas Ferroviarios.	25
Tabla 1.3. Comparación de las tecnologías principales para subestaciones reversibles	47
Tabla 1.4. Comparación de tecnologías comerciales de subestaciones reversibles y su aplicación en los metros.	47
Tabla 1.5. Comparación Técnica y económica de las tecnologías de almacenamiento	55
Tabla 1.6. Aplicaciones de las tecnologías de Sistemas de Almacenamiento en el Tren	58
Tabla 1.7. Resumen de las aplicaciones del Sistema de almacenamiento estacionario Gigacell (Kawasaki)	62
Tabla 2.1. Lista de Estaciones y Ubicaciones respecto al Punto Kilométrico (Pk).....	68
Tabla 2.2. Listado de las SERs con sus respectivos Pks y PIs	71
Tabla 2.3. Configuración de las cargas conectadas a cada SEAT de la Línea 1 en operación nominal	71
Tabla 2.4. Corrientes de Cortocircuito y relación de impedancias para la simulación las Subestaciones de Alimentación.	72
Tabla 2.5. Parámetros de Potencia y RT para las Cabinas	74
Tabla 2.6. Parámetros para considerar para las cargas de los SSAA de las distintas SERs	79
Tabla 2.7. Impedancias utilizadas para el dimensionamiento de los tipos de cables AC empleados	80
Tabla 2.8. Características de Longitud y carga de los coches Alstom Metròpoli S9000	87
Tabla 2.9. Frecuencia de Salida de Trenes desde ambos extremos de ambas vías en Minutos.....	93

Tabla 2.10. Comparación de Alternativas para el aprovechamiento del frenado regenerativo	97
Tabla 2.11. Matriz de Análisis Multicriterio (MCA) para la Selección de las Alternativas	102
Tabla 2.12. Definición de variables y puntajes para Evaluar en la Matriz MCA.....	103
Tabla 2.13. Asignación de los pesos ponderados para criterios de evaluación.	103

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Red Básica del Metro de Lima y Callo	21
Figura 1.2. Mapa de estaciones de la Línea del Metro de Lima y Callao	22
Figura 1.3. Esquema de Alimentación general de los trenes eléctricos	24
Figura 1.4. Sistema de Electrificación por Catenaria	27
Figura 1.5. Esquema general de un puente de rectificación de 24 pulsos con salidas en serie con transformador Dy11d0	28
Figura 1.6. Motor Asíncrono de 4 polos del Tren Alstom modelo Metr�poli S9000 ...	30
Figura 1.7. Cuadro de Accionamiento de los Motores Eléctricos	31
Figura 1.8. Circuito equivalente por fase referido al estator, para un motor de inducción.	31
Figura 1.9. Curva Torque -"Slip" de un Motor de Inducción, mostrando las regiones de Freno, Motor y Generador	32
Figura 1.10. Arreglo de IGBTs en los Inversores de un tren Asíncrono.....	34
Figura 1.11. Curva característica de la velocidad en función del tiempo para trenes eléctricos de corto recorrido con motores trifásicos.....	35
Figura 1.12. Flujograma del aprovechamiento de la energía regenerada en un caso sin tecnologías adicionales.	36
Figura 1.13. Flujo de energía t�pico en sistemas de trenes eléctricos urbanos.....	37
Figura 1.14. Circuito de conexión general del INGEBER	41
Figura 1.15. Configuraciones de Instalación del SITRAS PCI, Siemens.	42
Figura 1.16. Circuito básico del sistema HESOP de Alstom mejorado.	46
Figura 1.17. Componentes de un Sistema de almacenamiento de energía para aplicaciones ferroviarias.	49
Figura 1.18. Circuito principal de un sistema de almacenamiento de energía.	50

Figura 1.19. Partes principales de una Rueda de Inercia de la empresa Calnetix, VYCON Regen.....	54
Figura 1.20. Diagrama de Ragone simplificado para las principales alternativas para el almacenamiento de energía	55
Figura 1.21. Diagrama Ragone con las aplicaciones de los sistemas de Almacenamiento según la tecnología utilizada y la empresa encargada	56
Figura 1.22. Tipos de Sistemas de Almacenamiento de energía.....	56
Figura 1.23. Flujo de Potencia de un tren equipado con Almacenamiento en el tren durante: (a) Frenado; (b) Aceleración.	58
Figura 1.24. Esquemático del funcionamiento del Almacenamiento en las estaciones durante frenado y durante aceleración.....	59
Figura 1.25. Potencia y Capacidad de las aplicaciones presentadas en base al año de instalación.....	63
Figura 1.26. Esquema del Método de cálculo del Software eTrax.....	65
Figura 2.1. Diagrama descriptivo de las Etapas para la Metodología aplicada en el estudio	67
Figura 2.2. Interfaz eTrax Editor con el ingreso del tramo VES-BAY por la vía Par en Dirección “Norte”.....	69
Figura 2.3. Barra de herramientas de la Interfaz Geoespacial de eTrax.....	69
Figura 2.4. Perfil Longitudinal de la Línea 1.	70
Figura 2.5. Ingreso de Variables de los puntos de Alimentación en el software eTrax.	72
Figura 2.6. Ingreso de parámetros eléctricos de los Transformadores de la CAB 01 en el software ETAP	74
Figura 2.7. Ingreso de Variables para los Transformadores de Alta Tensión	75
Figura 2.8. Ingreso de Variables en el software ETAP para los transformadores de rectificación	76
Figura 2.9. Ingreso de parámetros eléctricos del Grupo Rectificador en el Software ETAP	77

Figura 2.10. Curva (V-I) de los Grupos de Rectificación para una Potencia de CC de 115MVA.....	78
Figura 2.11. Ingreso de los parámetros a ingresar de las cargas de las CABs	79
Figura 2.12. Ingreso de variables del Cableado Cu 70 mm ² en Aire entre cabinas CAB01 y CAB02 el Software ETAP.....	81
Figura 2.13. Ingreso de variables del Cableado DC en el Software ETAP.....	82
Figura 2.14. Ingreso de los parámetros de la Catenaria y Riel de Retorno en los segmentos de la Línea 1	84
Figura 2.15. Variación de la flota de coches Alstom Metr�poli S9000 de la Línea 1. .	85
Figura 2.16. Ingreso de las Variables a utilizar en el Software eTrax de ETAP para los coches Ma y Mb	86
Figura 2.17. Curva de limitación de corriente para los trenes Alstom Metr�poli S9000	89
Figura 2.18. Ingreso de curvas de Esfuerzo (kN)-Velocidad (km/h) de los coches Ma y Mb para: (a) Tracción; (b) Frenado en el Software eTrax de ETAP.....	90
Figura 2.19. Ingreso del voltaje máximo aprovechable por el frenado regenerativo en el software ETAP	91
Figura 2.20. Ingreso de parámetros de dimensionamiento, carga y coeficientes de resistencia de los coches tipo R en el software eTrax de ETAP.....	91
Figura 2.21. Ingreso de la configuración T6 de los trenes Alstom Metr�poli S9000 ...	92
Figura 2.22. Ingreso del horario de operación de la carrera 1002 entre las estaciones VES y ATO (Par) dentro del horario Valle.....	93
Figura 2.23. Ingreso de condiciones para escenario Base en el Software eTrax de ETAP	95
Figura 2.24. Ingreso de Restricción de corriente negativa a los grupos de rectificación el software eTrax de ETAP para la simulación de Subestaciones Reversibles.....	99
Figura 2.25. Curvas de Estado de Descarga (SoD%) de la Celda CH-75-6.....	100
Figura 2.26. Ingreso de las características del banco de baterías en el software ETAP. Ejemplo SER PIN.....	101

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Diálogo telefónico con el Superintendente de Mantenimiento de la empresa Concar S.A., Piero Arana, a las 22:34 el lunes 20 de abril del 2020.....	120
Anexo 2. Diagrama Sistema Eléctrico del Metro de Lima - Línea 1 (Anillo Abierto)	122
Anexo 3. Esquema Eléctrico de Potencia Tren Alstom	123
Anexo 4. Marcadores y valores ingresados de los marcadores en la interfaz geoespacial de eTrax según PK.....	124
Anexo 5. Cargas consideradas para las Cabinas de la Línea 1.....	127
Anexo 6. Longitudes para los tipos de cableado según los puntos de conexión.....	128
Anexo 7. Tiempos de recorrido de trenes entre estaciones para la vía Par e Impar.....	129

RESUMEN

Los trenes de la Línea 1 del Metro de Lima y Callao son trenes eléctricos alimentados en Voltaje DC que utilizan el frenado regenerativo para desacelerar, inyectando esta energía eléctrica a la catenaria y que otros trenes la pueda utilizar durante el mismo momento. Sin embargo, se requiere que un tren esté frenando y otro acelerando para que este fenómeno se presente y se aproveche eficazmente, caso contrario, esta energía es desperdiciada siendo disipada en forma de calor sin su posible aprovechamiento. Para aumentar la cantidad de energía reutilizada, en la presente investigación se han descrito las posibles alternativas a implementar como la devolución de energía la red, mediante subestaciones reversibles o sistemas de almacenamiento de energía dentro o fuera del tren, mediante baterías, supercapacitores o ruedas de inercia, con el objetivo de reducir el consumo de la red de alimentación de la Línea 1. Asociaciones como la UIC estiman que el potencial aprovechable de esta energía cinética puede llegar a ser de hasta un 33% mediante la aplicación eficiente de alguna tecnología.

Varias aplicaciones en Europa, Asia y América han demostrado que la instalación de este tipo de tecnologías reduce significativamente la energía consumida de la red, logrando así un ahorro energético y económico que resultan beneficiando positivamente la empresa operaria y al medio ambiente. En la presente tesis se ha recopilado y comparado una serie de aplicaciones de este tipo de tecnologías alrededor del mundo, así como las características técnicas y operacionales relevantes del tren de la Línea 1 con el fin de delimitar y presentar cuál de estas alternativas es la óptima a ser implementada en su infraestructura, para poder así presentarla ante la empresa Operaria y su futura aplicación.

PALABRAS CLAVE:

Línea 1 del Metro de Lima y Callao; Frenado Regenerativo; Subestaciones Reversibles; Sistemas de Almacenamiento de Energía; ETAP

ABSTRACT

The Line 1 of the Lima and Callao Metro Network trains are powered by electric DC voltage and use regenerative braking to decelerate, injecting this electrical energy into the catenary so that other trains can use it at the same time. However, it is required that one train is braking, and another is accelerating for this phenomenon to occur and for this energy be used effectively, otherwise, it is wasted being dissipated in the form of heat without its possible use. To increase this amount of reused energy, the present research has described possible alternatives to implement such as the return of energy to the grid through reversible substations, or energy storage systems inside or outside the train, using batteries, supercapacitors, or wheels of inertia, to reduce the consumption of the Line 1 power network. Associations such as the UIC estimate that the usable potential of this kinetic energy can be up to 33% through the efficient application of some of the technologies described.

Several applications in Europe, Asia and America have shown that the installation of this type of technology significantly reduces the energy consumed by the network, thus achieving energy and economic savings that are positively benefiting the operating company. In this thesis, a series of applications of these types of technologies around the world have been compiled and compared, as well as the relevant technical and operational characteristics of the Line 1 train in order to define and present which of these alternatives is the most optimal for be implemented in its infrastructure, in order to present it to the operation company and its future application.

KEYWORDS:

Line 1 of the Lima and Callao Metro Network; Regenerative brake; Reversible Substations; Energy Storage Systems; ETAP

INTRODUCCIÓN

Para el año 2019, la Línea 1 del Metro de Lima y Callao llegó a consumir un total de 75'244.18 MWh de energía eléctrica, un valor que, gracias al aumento de la cantidad de pasajeros transportados, se elevó en un 57% en comparación con el consumo de 4 años atrás [1], [2]. En términos de máxima demanda, esta cifra representó un 0.28% de la máxima demanda de todo el país para el 2019 [3], por lo que la magnitud de la carga que esta representa para el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) es tal, que se considera al Metro como una carga principal a nivel nacional [4]. Por ello, una disminución porcentual mínima repercutiría en un ahorro energético sustancial que no solo afectaría de manera directa a la empresa operaria del Metro, sino también al país.

La Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC), ha estimado que el ahorro potencial de la energía consumida en trenes suburbanos que utilizan el frenado regenerativo como freno dinámico, es de hasta un 16%, pero también estima que implementando alguna tecnología adicional de almacenamiento o de reutilización de la energía regenerada, este valor puede elevarse hasta un 32% [5]. Este freno regenerativo consiste en la transformación de la energía cinética del tren a energía eléctrica como medida para su desaceleración, en donde los motores se tornan generadores y reinyectan cierta cantidad energía de vuelta al sistema de alimentación. Es en este proceso, dependiendo de la infraestructura y de la operación de los trenes, esta energía se puede reutilizar en otros trenes o cargas, devolverse a la red eléctrica o hasta almacenarse.

Para efectos de la Línea 1 del Metro de Lima, hasta la fecha no se ha logrado cuantificar de manera precisa la energía regenerada, y, por ende, tampoco la energía que actualmente es aprovechada por los trenes ni la que es disipada mediante la parrilla de resistencias de cada tren. Este desconocimiento imposibilita el dimensionamiento y la aplicación de cualquier tipo de tecnología que pueda aprovechar esta energía, en términos de coordinarla, distribuirla o almacenarla. Por consiguiente, esto repercute directamente en los costos operativos de la empresa operaria del Metro, CONCAR S.A., generando una mayor facturación de energía y de potencia eléctrica, siendo esta una parte sustancial dentro de sus gastos operativos [6]. Al no poder aprovechar esa energía de forma

eficiente, se ven afectadas también las subestaciones y las líneas de alimentación del tren, ya que pueden surgir episodios de sub o sobretensión durante la etapa de frenado, afectando así el activo y provocando la falta de operación de los trenes [7].

Es por ello que la presente investigación busca proponer una alternativa óptima a implementar en los trenes de la Línea 1 del Metro de Lima y Callao para el aprovechamiento de la energía producida durante la etapa del frenado regenerativo, tras la ejecución de un modelamiento electrodinámico y un análisis multicriterio para la selección de la mejor alternativa.

Alcance

La presente Tesis abarca el estudio y cuantificación del potencial energético aprovechable producido por el frenado regenerativo en los trenes de la Línea 1 del Metro de Lima y Callao, evaluando, mediante el software de simulación electrodinámica especializado eTrax de ETAP, la implementación de las alternativas más comerciales de solución en base a las características técnicas de la Línea 1 y a las aplicaciones en otros ejemplares similares a lo largo del mundo.

El estudio contempló la simulación de la Línea 1 bajo el escenario base considerado antes del estado de emergencia dado por el virus COVID-19 en el Perú y bajo escenarios en donde se implementan estas tecnologías de manera individual durante una semana de afluencia promedio de pasajeros en la Línea 1 (aproximadamente 3.28 millones de personas por semana) [8]. Para la selección de la alternativa más adecuada se realizó un análisis multicriterio, considerando los pesos ponderados y puntajes de los criterios técnicos y económicos en conjunto con la empresa operaria.

Por último, es importante precisar que el presente trabajo de investigación no incluye un estudio de prefactibilidad, así como tampoco la aplicación de la solución elegida en la Línea 1, más bien este se interpreta como una recomendación hacia la empresa operaria sobre la alternativa óptima a implementar en base a la información técnica y operativa de la Línea 1.

Antecedentes

Si bien el concepto de utilizar la energía cinética para el frenado se remonta desde el siglo XIX, el frenado regenerativo eléctrico, empieza a cobrar importancia en la industria ferroviaria en el año 1886, en donde gracias a la patente de Frank J. Sprague, se implementó por primera vez esta tecnología en el tren eléctrico de “Richmond Union”, en Virginia [9]. Esta tecnología fue evolucionando con el transcurso de los años hasta el punto de que se ha convertido en un estándar para todas las líneas ferroviarias eléctricas y hasta en las locomotoras de combustión (híbridos) [10]. A partir de ello se han tomado diferentes medidas para el aprovechamiento de la energía generada por este frenado, que implican tanto la devolución de esta energía a la línea de alimentación como también almacenarla en medios mecánicos rotatorios, eléctricos rotatorios y electroquímicos.

A nivel global, un gran número de metros y líneas ferroviarias han implementado ciertos tipos de tecnologías, como por ejemplo el metro de Bilbao (España), gracias a la instalación de estaciones de rectificación reversibles de la empresa INGETEAM en el año 2012 presentó ahorros de energía del 13% por encima del ahorro referido al frenado regenerativo como base [11].

A escala de Latinoamérica, para el 2017 en el Metro de Medellín (Colombia), la Universidad Pontificia Bolivariana, en conjunto con la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada, implantaron un banco de condensadores piloto en la estación Niquía con el fin de almacenar esta energía regenerada. Esta aplicación logró resultados de una reducción de en promedio 112 kWh de energía consumida [12], [13].

En el caso del Metro de Lima, la Línea 1 reactivó sus operaciones en el 2011, pero de manera continua y completa desde el año 2014 aunque su planeamiento data desde el año 1986 y la primera puesta en marcha del recorrido en un tramo reducido durante el 1995 [11], [12]. Sin embargo, no fue hasta el 2016 cuando se presentó el proyecto para el aumento de la flota de trenes Alstom Metrópoli Serie 9000, que se realizó una simulación eléctrica preliminar del tren de Lima y Callao. Esta empresa francesa contempló para la simulación varios escenarios bajo ciertas condiciones de carga, configuraciones, y estados operativos de los motores. Este estudio contó con el objetivo de estimar la temperatura máxima alcanzada en los motores y la cantidad de energía regenerada bajo ciertas condiciones de la Línea 1, llegando así a un máximo del 55% con

respecto a la consumida (traccionada). Un hecho para tener en cuenta es que esta simulación resultó en un indicador potencial de la energía regenerada por un único tren de 5 y 6 coches, sin considerar la influencia de toda la flota. El escenario más óptimo estimó un total de 878.9 kWh de energía regenerada de un total traccionada de 1596.4 kWh durante todo el recorrido (ambos sentidos) [16].

Así también, en febrero del 2017, la empresa Siemens, desarrolló una simulación del Sistema eléctrico DC de la Línea 1, con el fin de estimar los parámetros eléctricos para un futuro reforzamiento de la catenaria en cierto tramo. Los resultados de esta simulación se basaban en escenarios en el que se incluía este reforzamiento bajo condiciones de operación normal y bajo condiciones de fallas individuales en todas las subestaciones de rectificación (SER). Gracias a esta simulación la empresa Operaria optó por implementar este reforzamiento a lo largo del tramos entre las Estaciones de pasajeros “Parque Industrial” y “La Cultura” [17].

En comparación con estas dos simulaciones realizadas a la Línea 1, la presente tesis se diferencia principalmente en realizar una simulación bajo condiciones reales, incluyendo todos los trenes operativos y escenarios de operación nominales, adicionando la evaluación y el impacto que podría tener la implementación de alguna tecnología de aprovechamiento de esta energía regenerada en términos de ahorro energético.

Justificación y motivación

La empresa concesionaria de la Línea 1, GyM Ferrovías; y la empresa operaria, CONCAR S.A., junto con las entidades gubernamentales del transporte en el Perú, ATU y OSITRAN, han implementado un programa de operación de los trenes desde el inicio de sus actividades en enero del 2012, el cual es actualizado año a año en función de la demanda y características de la línea [18]. Sin embargo, este programa no destaca en el uso eficiente de la energía utilizada, sino en la rapidez del transporte de pasajeros y la frecuencia del flujo de trenes en cada estación, de 3 minutos por tren en horarios pico y de 6 minutos por tren en horario valle [19].

Si bien esto se pueda considerar como una restricción, es posible rescatar que este transporte urbano eléctrico, cuenta la aplicación del sistema de “frenado regenerativo”,

pero no con alguna tecnología que aproveche eficientemente la energía generada. Este sistema es básicamente intrínseco en todos los metros eléctricos urbanos o suburbanos como en el de Nueva York (MBTA), en Estados Unidos [20] o en el de Nueva Delhi (DRMC), en India [21].

En cuanto al uso de estas alternativas, los metros de Nagoya, Kagoshima y Kobe (Japón), implementaron sistemas de almacenamiento de energía estacionario con Baterías de Li-ion para la regulación de voltaje en la línea de alimentación [22]. Asimismo, para los metros de Manheim (Alemania), Paris (Francia), Zaragoza y Sevilla (España), el uso de supercapacitores y/o baterías instaladas en los mismos trenes, se traducen en ahorros de energía y disminuciones en las potencias pico de hasta en un 60% [7]. Adicionalmente, el “*Climate Techonolgy Centre & Network*” (CTCN) menciona que, para Líneas de cercanías eléctricas, como lo es el Metro en estudio, se puede alcanzar entre un 8 a 17% de reducción de emisiones de CO₂ [21].

En el caso de la Línea 1 para el año 2020, esta energía puede ser aprovechada, siempre y cuando otro tren esté bajo la misma línea de alimentación y se encuentre en proceso de aceleración. De no darse el caso, tiene que ser disipada en forma de calor mediante una parrilla de resistencias ubicada en el tope de cada tren para evitar sobrecargas y sobre voltajes en la línea [7].

Con respecto a la empresa operaria, la necesidad de implementar un sistema de aprovechamiento de esta energía se ha presentado desde que el tren inició sus operaciones. Sin embargo, por falta de presupuesto y desconocimiento de las tecnologías aplicables, no se ha llevado a cabo. Piero Arana, el actual superintendente de mantenimiento de la empresa Concar S.A. expresa que, de implementarse una alternativa adecuada, el ahorro potencial de esta energía disipada puede verse reflejado en un beneficio sustancial para la empresa [23].

Adicionalmente, el proyecto de la Red Básica del Metro de Lima y Callao contempla la implementación de la Línea 2 para el 2024 y su intersección con la Línea 1 en la estación 28 de Julio. Se prevé que la frecuencia de trenes de la Línea 1 deberá sincronizarse con la de la Línea 2 para poder abastecer la demanda de pasajeros en ambas líneas. Esto significará un incremento proporcional en la energía consumida por los trenes y al mismo tiempo un aumento potencial en la energía regenerada [24]. Por este motivo,

es importante conocer cuánta energía podría ser regenerada para su posterior aprovechamiento

Al ser la Línea 1 del Metro de Lima y Callao una carga principal dentro del SEIN, tanto por la magnitud de carga que esta representa (0.28% de la potencia coincidente) [3], y por la importancia que tiene en el del Sistema de Transporte Público de Lima (170 millones de pasajeros para el 2019) [8], esta medida de eficiencia energética contribuye plenamente con los Objetivos presentados en la Política Energética Nacional del Perú 2010-2040, y va de acuerdo con los incisos que se mencionan en la Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía¹.

¹ Ley N° 27345, publicada en el bajo el decreto supremo N° 004-2016-EM

Objetivo general

Analizar las alternativas de aprovechamiento de la energía producida por el frenado regenerativo en la línea 1 del metro de Lima y Callao.

Objetivos específicos

- Recopilar la información técnico-operativa de la Línea 1, que se ajuste y pueda ser ingresada en el software de Simulación eTrax de ETAP.
- Realizar una simulación de la operación dinámico-eléctrica de la Línea 1 para un escenario base, considerando las características técnicas actuales, en conjunto con la postura y disposición de la empresa operaria.
- Comparar y preseleccionar las Alternativas para el aprovechamiento de la energía del frenado regenerativo que han sido aplicadas en otros metros y trenes alrededor del mundo de características similares al metro en Estudio y hacer una preselección de las alternativas más aplicables a las características de la Línea 1.
- Simular y estimar la cantidad de energía y potencia aprovechada por el frenado regenerativo en la Línea 1 del Metro de Lima y Callao y el escenario de su aplicación con las alternativas preseleccionadas.
- Seleccionar la alternativa de mejor aplicabilidad para la Línea 1 dentro de las tecnologías del mercado actual para el aprovechamiento de la energía regenerada, considerando criterios de inversión, performance, tiempo de vida e implementación.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presentará inicialmente una breve reseña de la Línea 1 del Metro de Lima y Callao, la información histórica pertinente y la evolución del material rodante y de la infraestructura hasta el año 2019. Se detallará acerca de los sistemas de tracción de los trenes, así como los componentes principales para el estudio del frenado regenerativo y su potencial en las aplicaciones ferroviarias. Finalmente, se presentarán los principios, antecedentes y comparaciones de las principales tecnologías para el aprovechamiento de la energía producida por el frenado regenerativo, así como una breve explicación del software a utilizar para la estimación del potencial aprovechable en la Línea 1 del Metro de Lima y Callao.

1.1.El Metro de Lima y Callao

La Red Básica del Metro de Lima y Callao es un proyecto que implica la implementación y operación de una red de 6 líneas de transporte masivo terrestre dentro de las ciudades de Lima y Callao. La principal razón para su instalación hacía referencia a las condiciones del sistema de transporte masivo para la década de 1980 y la diferencia que estas mantenían con los intereses sociales y económicos de la población de Lima, Callao y de las zonas aledañas para la época. Esta incongruencia conllevaba principalmente a la pérdida de horas-hombre útiles y a la desintegración de la vida familiar, en la que el grupo de personas de menores ingresos se veían afectados.

Para su ejecución, en 1986 se creó la institución AATE (Autoridad Autónoma del Sistema Especial Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao), destinada al desarrollo de la proyección, planificación, ejecución y administración de la infraestructura del Sistema, perteneciendo al Ministerio de la Presidencia [25]. En este mismo año se empezaron los estudios para la construcción de la Línea 1, cuyas primeras obras concluyeron en 1995, con un tramo de 9.8 kilómetros y 5 estaciones [26]. En el 2010, luego que esta institución se transfiera al Ministerio de Transportes y Comunicaciones definitivamente y ya con el complemento del primer tramo de 12

kilómetros en construcción, se aprobó la “Red Básica del Metro de Lima – Sistema Eléctrico de Transporte Masico de Lima y Callao” con la finalidad de definir la disposición final y las cuencas de intervención de los recorridos de las 5 Líneas contempladas y también para el desarrollo de estudios base y de ingeniería para la localización de estaciones y áreas de reservas para la líneas [27]. La lista de las Rutas preliminares de las Líneas establecidas se puede ver en la **Tabla 1.1**.

Número de Línea	Trazos preliminares
Línea 1	Avenida Separadora Industrial, Avenida Pachacútec, Avenida Tomás Marsano, Avenida Aviación, Avenida Grau, Jirón Locumba, Avenida 9 de octubre, Avenida Próceres de la Independencia, Avenida Fernando Wiesse.
Línea 2	Avenida Guardia Chalaca, Avenida Venezuela, Avenida Arica, Avenida Guzmán Blanco, Avenida 28 de Julio, Avenida Nicolás Ayllón, Avenida Víctor Raúl Haya de la Torre (Carretera Central)
Línea 3	Avenida Alfredo Benavides, Avenida Larco, Avenida Arequipa, Avenida Garcilazo de la Vega, Avenida Tacna, Avenida Pizarro, Avenida Túpac Amaru, Avenida Rosa de América, Avenida Universitaria
Línea 4	Avenida Elmer Faucett, Avenida la Marina, Avenida Sánchez Carrión, Avenida Salaverry, Avenida Canevaro, Avenida José Pardo de Zela, Avenida Canadá, Avenida Circunvalación, Avenida Javier Prado.
Línea 5	Avenida Huaylas, Avenida Paseo de la República, Avenida República de Panamá, Avenida Miguel Grau.

Tabla 1.1. Rutas preliminares de las Líneas de la Red Básica del Metro de Lima
Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: Presidente de la República, “Decreto Supremo N°059-2010-MTC” [27]

Posteriormente, se estableció la inclusión de la Línea 6 a la Red, con el objetivo de permitir la implementación de un sistema de transporte masivo rápido, seguro y eficiente, con la posibilidad de integrarse con los otros medios de transporte. Esta nueva Línea 6, cuenta como trazado preliminar a las Avenidas Túpac Amaru, Los Alisos, Universitaria, Bertolotto, Pérez Aranibar, Angamos y Primavera [28]. El mapa de la red básica de la Red del Metro de Lima y Callao actualizado se muestra en la **Figura 1.1**.



Figura 1.1. Red Básica del Metro de Lima y Callo

Fuente: AATE, “Red Básica del Metro de Lima - Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao” [29]

1.1.1. La Línea 1

La Línea 1 es la única de las 6 líneas presentadas en la Red básica del Metro de Lima y Callao que está concluida y opera en la actualidad. Sin embargo, durante su diseño y construcción se han presentado ciertas problemáticas como la falta de demanda durante la puesta en operación de una sección del primer tramo en el año 1990, lo que sumados al cambio de gobierno y el terrorismo en el país durante ese tiempo, conllevaron a que recién el 25 de julio del 2014 se haya puesto en completa operación, habiéndose empezado su diseño en 1986 [14] [15].

La línea se ha dividido en dos tramos: el primero abarca 22 kilómetros cruzando por 16 estaciones de pasajeros desde la estación Villa el Salvador hasta la estación Miguel Grau; mientras que el segundo, abarca una longitud de 12.4 kilómetros con 10 estaciones de pasajeros desde la estación Miguel Grau hasta la estación Bayóvar, de esta manera se consolidan los 34.4 kilómetros de la Línea presentados en la Figura 1.2 [30]. Su recorrido cuenta con 6 estaciones a nivel de superficie en la zona Sur y las demás 26 estaciones del Centro, Este y Noreste de la ciudad a través de un viaducto elevado.



Figura 1.2. Mapa de estaciones de la Línea del Metro de Lima y Callao
Fuente: Miquique, “Mapa de Estaciones de la Línea 1” [31]

En la actualidad, la Línea 1 es operada por la Sociedad Concesionaria GyM Ferrovías S.A., conformada por las empresas Graña y Montero S.A.A. y la empresa argentina Ferrovías Participaciones S.A., que, a partir de la firma del contrato el 11 de abril del 2011, inició su concesión con una vigencia de contrato de 30 años. La inversión comprometida referencial en este acuerdo se estableció en un monto de 202.55 millones de dólares americanos (incluido IGV), bajo un Precio por Kilómetro Garantizado (PKT) de S/. 73.97 y de S/. 71.97, para el primer y segundo tramo de la línea respectivamente y por un Precio por Kilómetro de Tren Adicional (PKTA) de S/. 27.97. Luego de 4 adendas presentadas entre el 2012 y el 2016, el monto de inversión acumulada para el 2018 se elevó hasta los 582.18 millones de dólares americanos considerando el propósito primordial de incrementar la flota de 21 a 44 trenes con 6 vagones cada uno y poder suplir la demanda de 124.14 millones de pasajeros durante el año 2018 y la de 170.33 millones de pasajeros para el 2019 [8] [32].

A manera de detalles de operación, la frecuencia con la que los trenes circulan a través de la ruta es establecida por la empresa operaria y supervisada por el Ministerio de

Transportes y Comunicaciones (MTC) a través de la ATU (Autoridad de Transporte Única), antes llamada AATE, la cual es medida en minutos de espera por tren en cada estación. Estos valores se han establecido para horarios en hora pico y en hora valle, siendo de 3 minutos por tren y 6 minutos por tren, respectivamente. Con este aumento de flota y la configuración de la frecuencia de trenes, se ha cumplido el objetivo de completar el recorrido desde la estación Villa El Salvador hasta Bayóvar en 54 minutos aproximadamente [26] [33].

- **Material Rodante**

El material rodante hace referencia al conjunto de trenes y de vagones con el que la empresa operaria cuenta para cumplir con la labor de transportar los pasajeros. En el caso de la Línea 1, la flota de trenes con las que ha contado desde el inicio de sus operaciones ha ido incrementando y variando en base a los tramos operativos y a la demanda a transportar.

En el año 1994, arribaron al Perú los primeros 5 trenes Ansaldo Breda, los cuales fueron utilizados en la vía inaugurada parcial del primer tramo un año después. Luego del periodo de paralización del proyecto y ya con el primer tramo de la Línea 1 construido, en el 2012 se hace la adquisición de 19 trenes Alstom, que en conjunto con los Ansaldo Breda formaban una flota de 24 trenes con 5 coches cada uno, operativos solo para el primer tramo a partir del 5 de abril del 2012 [26].

Ya en el 2018, con la línea inaugurada en su totalidad desde el 2014, se incrementó la flota con la adición de 20 trenes Alstom conformados por 5 y 4 coches acoplados, bajo el motivo de la creciente demanda de pasajeros durante esos años, aproximadamente de un 15.5% con respecto al año anterior [32]. Últimamente, ya para el mes de setiembre del 2019, se implementaron 39 vagones adicionales, logrando un acumulado total de 39 trenes Alstom modelo Metrópolis serie 9000 y 5 trenes Ansaldo Breda con 6 vagones cada uno [26].

1.2.Sistemas de Alimentación

El Sistema de Alimentación hace referencia al grupo de elementos y procesos que se utilizan para suministrar la energía a todas las cargas que cuenta la infraestructura eléctrica del tren, como se aprecia en la siguiente figura.

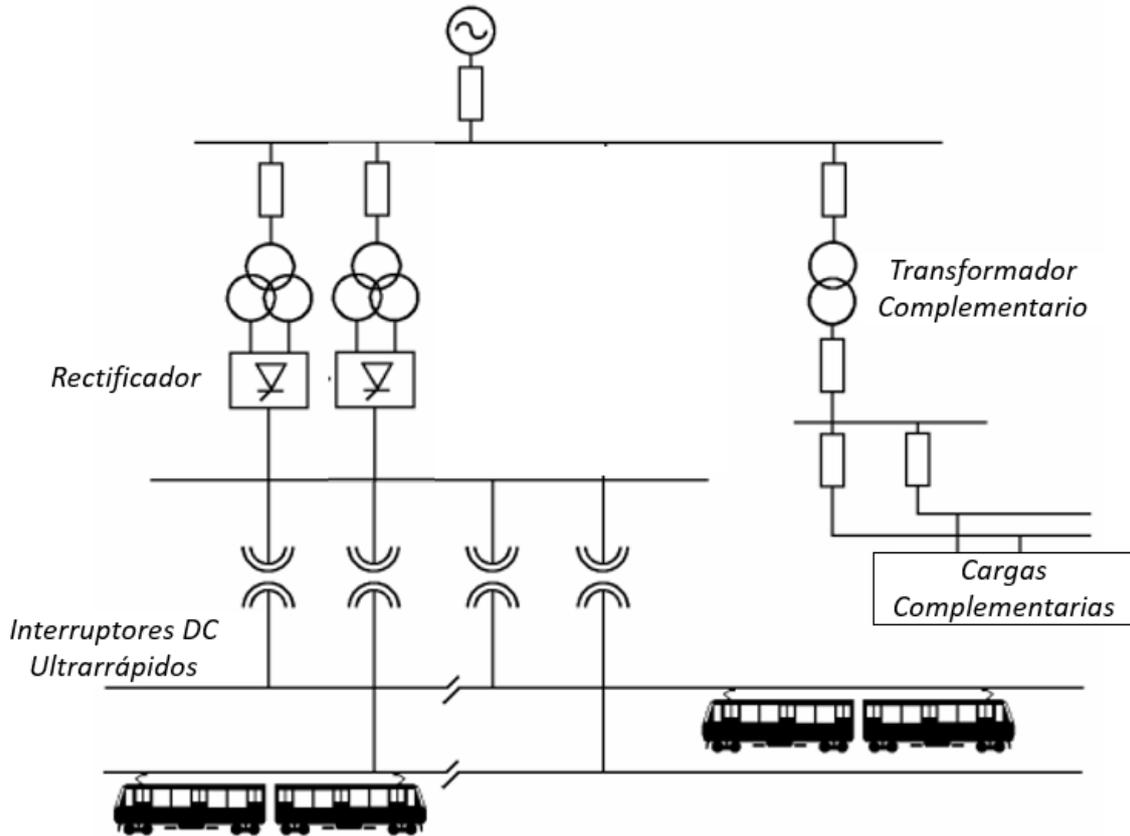


Figura 1.3. Esquema de Alimentación general de los trenes eléctricos

Fuente: L. Liudvinavičius y L. P. Lingaitis, “Electrodynamic braking in high - speed rail transport” [34]

Todo el Sistema de Alimentación comprende desde el punto de suministro de energía hasta los puntos de consumo o cargas eléctricas tanto para la tracción de los mismos trenes como para las cargas auxiliares o complementarias. El flujo de energía en un sistema de Alimentación en los trenes normalmente empieza desde la compra de energía en Alta Tensión en 2 o más puntos, hasta su consumo en redes Media o Baja Tensión, tanto para sistemas en Corriente Continua (CC) o en Corriente Alterna (CA). En la Figura 1.3, se puede identificar el punto de alimentación en AC trifásico, los respectivos transformadores de tensión tanto para el sistema de tracción como para el sistema auxiliar o suplementario, los grupos de rectificación, los interruptores ultra rápidos y la línea de alimentación con los trenes eléctricos.

La clasificación de todos los tipos de cargas o puntos de consumo de energía comúnmente en todos los metros se subdivide bajo la manera presentada en la **Tabla 1.2**, en donde también se indica cómo se han agrupado para fines del estudio, centrándose únicamente en las cargas de consumo energético eléctrico.

Clasificación según UIC	Clasificación para fines de la presente Investigación
Cargas para el Movimiento de los Trenes (Tracción de Trenes y los equipos que intervienen)	Sistemas de Alimentación de Tracción
Cargas Auxiliares en los trenes (Ventiladores, compresores, iluminación, etc.)	Sistemas de Alimentación Auxiliar
Cargas Auxiliares en los sistemas de la Infraestructura, “Ferroviarias” (cargas de la vía como señalización, protección, comunicación, control, etc.)	
Cargas en las Estaciones, talleres y otros usos, “No Ferroviarias” (iluminación, acondicionamiento de oficinas, maquinaria en talleres, etc.)	

Tabla 1.2. Clasificación de los tipos de cargas en los sistemas Ferroviarios.

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: UIC, “Technologies and potential developments for energy efficiency and CO2 reductions in Rail Systems” [35]

1.2.1. Sistema de Tracción

El Sistema de Alimentación de Tracción (SAT) engloba las cargas principales y críticas de la demanda de energía principal en la infraestructura de Red: Los trenes y a su vez, todo el conjunto de equipos necesarios para su funcionamiento.

Bajo las Normativas IEC 60580:2014 e IEEE 519:2014, los tipos de Alimentación de Tracción se pueden categorizar en dos tipos de suministro corriente continua (CC) y corriente Alterna (CA). Para el primer caso, los estándares de Voltajes de la línea son de 600VDC, 750VDC, 1200VDC, 1500VDC y 3000VDC, mientras que para el segundo son de 15 kVAC (16 2/3 Hz y 16.7 Hz), 25 kVAC (50 Hz) y 25 kVAC (60 Hz) [36], [37]. Sin embargo, hay otros trenes que no necesariamente se rigen bajo estos voltajes estándares, como el de Sistema de Hong Kong Tramways, con un voltaje de 550 VDC; o como el Montblanc Trainwat en Francia con 11 kVAC, con una frecuencia de 50 Hz [36].

Dentro de la lista de 226 sistemas de metros eléctricos que existen en el mundo, la gran mayoría que son considerados como urbanos y suburbanos cuentan con el sistema

de alimentación en 1500 VDC, mientras los sistemas no suburbanos sino interprovinciales o de mayor kilometraje entre sus estaciones, cuentan con sistemas de alimentación en AC, en su mayoría de 25 kVAC en 50 o 60 Hz, dependiendo de la frecuencia de la red de la ciudad [38], [39].

Punto de Contacto

Los tipos de configuraciones del punto o conductor de alimentación hacia los trenes con alimentación en VDC se pueden agrupar de dos maneras según su posición con respecto al tren:

- Conexión con Tercer Riel

Este tipo de conexión suministra electricidad a los trenes mediante un tercer carril que recorre paralelamente por un lado o entre los rieles del tren a lo largo de todo su recorrido, cumpliendo la función de polo positivo. El tipo de contacto entre el tren y el tercer carril, normalmente a base de acero, cuenta con ciertas variaciones que según las características de la línea y del ambiente, como por ejemplo si es que nevara o se presenten caídas de hojas sobre el riel, afectan el porcentaje del contacto entre el tren y el tercer carril, por lo que una configuración distinta es empleada.

- Conexión con Catenaria

La Catenaria o en inglés “*Overhead Catenary System*” (OCS) es una forma de electrificación que se posiciona por encima del tren y que se compone principalmente del cable de alimentación y el conjunto de estructuras a lo largo de la línea que la mantienen por sobre el tren. Se pueden clasificar en las de tipo rígidas, las cuales son barras fijas a las estructuras y cuentan con mayor espesor para soportar corrientes mayores; y las de tipo colgantes, en las que se mantiene bajo cierta tensión al hilo conductor para asegurar el contacto constante entre el pantógrafo del tren y el hilo. Para ambos casos el polo positivo son las barras o el cable conductor por encima del tramo del tren y el polo negativo es el punto de contacto entre las ruedas del tren con los rieles [40]. Este tipo de alimentación es la que la red de la Línea 1 del Metro de Lima y Callao tiene en todo su recorrido. En la **Figura 1.4** se ilustra este tipo de conexión.

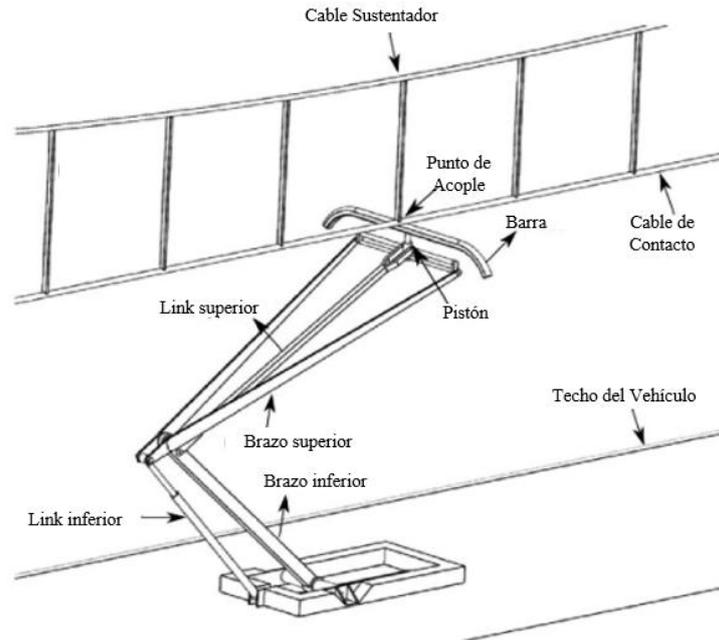


Figura 1.4. Sistema de Electrificación por Catenaria

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: C. M. Pappalardo, M. D. Patel, B. Tinsley, y A. A. Shabana, "Contact Force Control in Multibody Pantograph / Catenary Systems Page Proof Instructions and Queries" [41]

Subestaciones de Rectificación (SERs)

Para el caso de las líneas de alimentación de tracción en VDC, el suministro de alimentación desde la Red externa es usualmente en VAC, por lo que requiere de Sistemas o grupos de Rectificación para su transformación, siendo estos, las bases de la electrónica de potencia y el principal componente de la red de tracción. Las subestaciones de Rectificación (SER) normalmente se instalan con transformadores de potencia de tres devanados con la función disminuir la tensión a la de trabajo para luego rectificar la onda sinusoidal a una directa.

La configuración más común de estos transformadores es la de Dy11d0, en donde en el devanado primario de Alto voltaje está en configuración Delta, mientras que uno de los devanados secundarios está en Estrella y el otro en Delta con el motivo de desfasar las 6 salidas del transformador secundario con ángulos de 30° entre cada fase [42].

Luego de la transformación de voltaje en dos devanados trifásicos, estos pasan por un arreglo de diodos, que en su conjunto forman los puentes de rectificación de 6, 12 o hasta 24 pulsos (2 arreglos de 12 pulsos, en serie o en paralelo), modificando le tensión y corriente de salida y transformándolas en ondas parcialmente positivas [26] [35].

Finalmente, en la salida de estos puentes de rectificación se instalan una serie de filtros en base a cargas LC (Inductivas y Capacitivas) para la filtración y linealización de la onda en continua. En el caso de la Línea 1, el arreglo de los 24 pulsos se determina mediante el desfase de un ángulo de $+7.5^\circ$ en un grupo de 12 pulsos y de -7.5° en el otro grupo, manteniendo el desfase entre cada fase de cada grupo de 30° . Por otro lado, si los grupos rectificadores se conectan en paralelo, se logra una rectificación de 24 pulsos con un ángulo de desfasaje de 15° entre cada fase de alimentación [45].

En el proceso de Rectificación se generan distorsiones en la onda de suministro, al utilizar solo la parte positiva de la onda, por lo que se incrementa la distorsión de las ondas de voltaje y corriente por los armónicos generados. Para el caso de rectificación de 6 pulsos, la corriente de alimentación presenta grandes distorsiones en las armónicas del 5to y 7mo orden, que en la sumatoria total, generan un Factor de Distorsión en la corriente (THD) entre 35% y 100%. Para el caso de rectificación de 12 pulsos, el orden de los armónicos que se ven más distorsionados son las del 11vo y 13vo orden, generando un THD total de corriente entre 10 y 20% [43]. Finalmente, para el caso de rectificación de 24 pulsos (2 grupos de rectificación de 12 pulsos en serie), el orden de las armónicas más afectadas son la del 23avo y 25to orden, con un THD de corriente global de aproximadamente 1.15% [44].

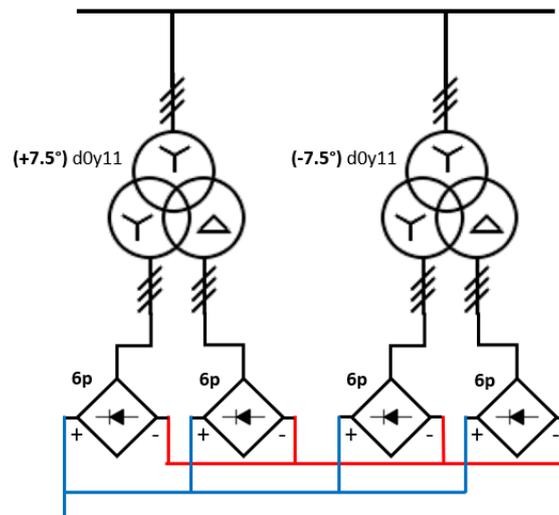


Figura 1.5. Esquema general de un puente de rectificación de 24 pulsos con salidas en serie con transformador Dy11d0
Fuente: Elaboración Propia.

1.2.2. Sistema Auxiliar

El Sistema de Alimentación Auxiliar comprende las cargas secundarias con las que la Infraestructura de la línea ferroviaria cuenta dentro de su suministro, así como las cargas que alimentan el sistema de Control y de operación de los mecanismos de protección en la Red. Este apartado engloba también todas las cargas que no están consideradas en el sistema de tracción como lo son los servicios de Estaciones y Talleres, Ascensores, escaleras mecánicas, bombas de agua alumbrado, tomacorrientes en 380/220VAC, o algunos equipos de control de protecciones y de control en 110VDC o 24VDC [46].

1.3.Máquina Motriz

La máquina motriz hace referencia al conjunto de equipos dentro de la infraestructura del tren que consumen energía eléctrica y forman parte de su transformación en energía mecánica. Específicamente en los trenes eléctricos, la máquina motriz engloba no solo los motores de tracción, sino también todo el conjunto de componentes previos instalados para la adecuación y mayor eficiencia del consumo de energía eléctrica por parte de los motores.

1.3.1. Motores

Las variedades de motores eléctricos utilizados en la industria ferroviaria se reducen a tres tipos: Motores DC, motores AC síncronos y asíncronos. Con respecto a los del primer tipo, estos han sido utilizados por años gracias a que cuentan con fácil control sobre el amplio rango de velocidades que pueden operar, por lo que son usualmente de menores dimensiones. Sin embargo, al contar con escobillas para poder brindarle el alto torque requerido por los trenes, el rendimiento y la frecuencia de mantenimiento incrementa sus costos con respecto a los motores AC.

Con respecto a las otras dos opciones, los motores AC trifásicos síncronos y asíncronos, cuentan con las ventajas de ser más robustos en su construcción, ser más eficientes dentro de sus parámetros nominales de operación, requerir de menor frecuencia

de mantenimiento y contar con menores costos, pero, por el lado de sus desventajas, estos se limitan a contar con menor torque inicial que los motores DC y a tener que sacrificar la eficiencia del motor por optar por un mayor rango de velocidad [47].

Para efectos de su aplicación en trenes o metros urbanos, los motores asíncronos, o también llamados Motores de Inducción, cuentan con menor peso que un motor síncrono, disminuyendo en casi aún 50% con respecto a un motor síncrono de la misma potencia. Además, los motores de inducción, cuentan con mayor eficiencia y rango de torque, así como también son de fácil construcción y requieren de menor mantenimiento [48]. Los trenes de la Línea 1 del Metro de Lima y Callao cuentan con el tipo de motor presentado en la **Figura 1.6**.



Figura 1.6. Motor Asíncrono de 4 polos del Tren Alstom modelo Metrópolis S9000
Fuente: Alstom, “Metro de Lima Línea 1 Metrópolis - Manual Descriptivo de Componentes” [49]

En la **Figura 1.7** se pueden identificar los 4 estados de accionamiento de un motor de inducción, en donde en el primer cuadrante, el motor cumple su función principal, consumiendo energía y generando un torque en la misma dirección que el sentido del movimiento del vehículo. Sin embargo, en el segundo cuadrante, durante el proceso de desaceleración o frenado, la inercia con la que el vehículo en movimiento cuenta, genera un torque inverso sobre el motor, ocasionando un flujo de corriente opuesto y consigo la inyección de energía eléctrica al sistema.

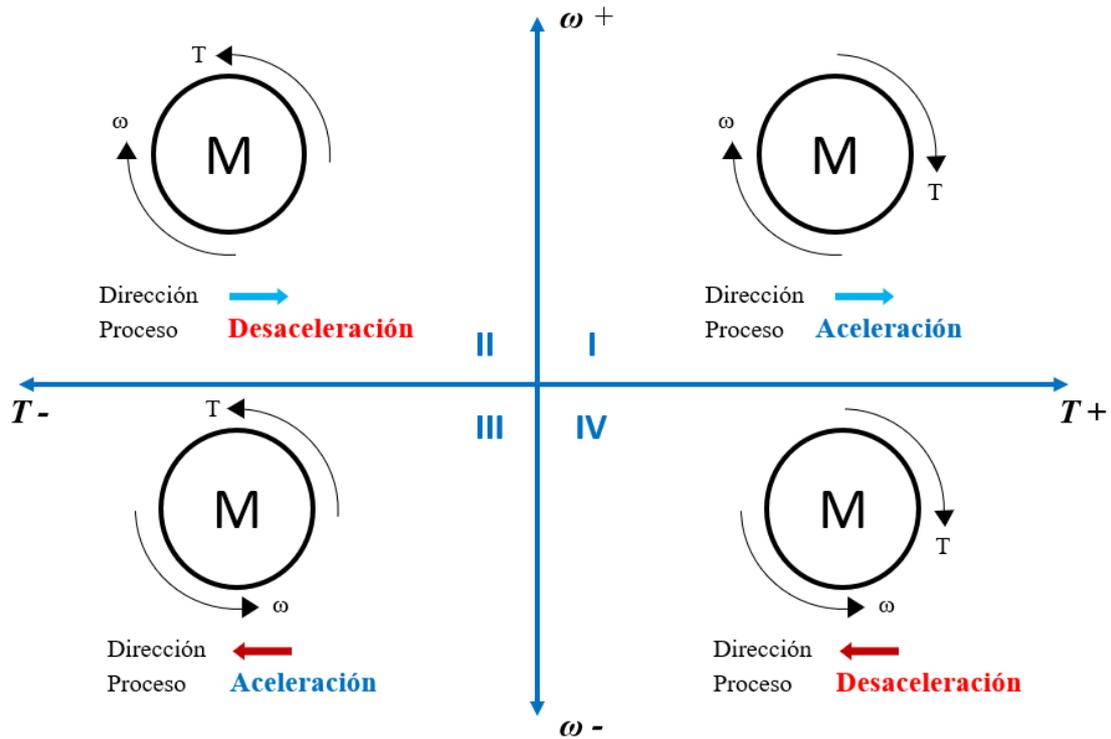


Figura 1.7. Cuadro de Accionamiento de los Motores Eléctricos

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: M. Sarrazin, S. Gillijns, J. Anthonis, K. Janssens, y H. Van Der Auwerker, “NVH analysis of a 3 phase 12 / 8 SR motor drive for HEV applications” [50]

Se puede modelar un motor de inducción bajo sus parámetros eléctricos, mediante el circuito equivalente visto desde el estator en la **Figura 1.8**, considerando también los parámetros de magnetización y de pérdidas del hierro del estator. Este esquema fue utilizado para el dimensionamiento del frenado regenerativo en el Metro de Santiago, Chile en [51].

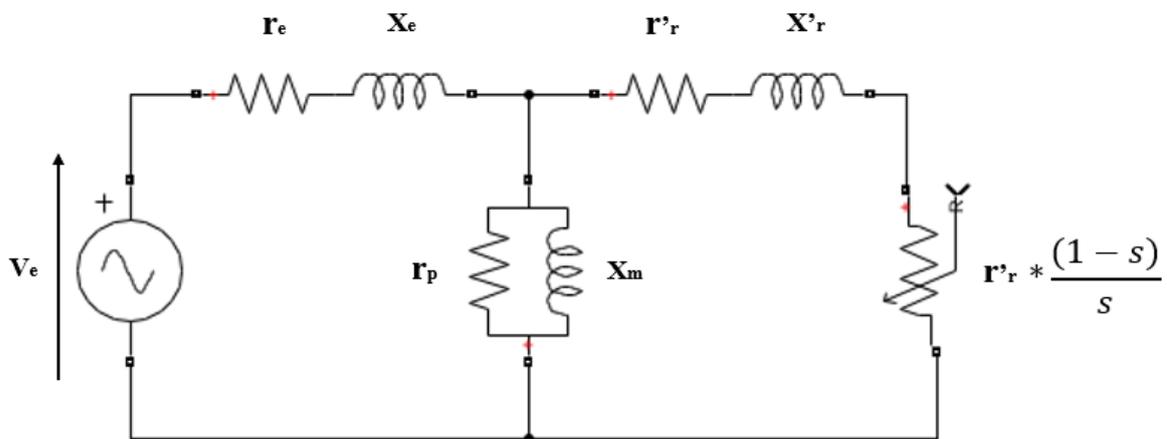


Figura 1.8. Circuito equivalente por fase referido al estator, para un motor de inducción.

Fuente: G. A. Soubllette Castro, “Sistemas de recuperación de energía para la Línea 1 del Metro de Santiago” [51]

En donde:

r_e	Resistencia del bobinado del estator (Ω)	r_p	Resistencia de pérdidas del hierro (Ω)
X_e	Reactancia del bobinado del estator (Ω)	X_m	Reactancia de magnetización (Ω)
r'_r	Resistencia del bobinado del rotor (referida al estator) (Ω)	V_e	Voltaje de Alimentación (V)
X'_r	Reactancia del bobinado del rotor (referida al estator) (Ω)	s	“slip” (deslizamiento)

Para cual el “slip”, se define como:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

Donde, ω_s es la velocidad de sincronismo del motor (rad/s) y ω_r es la velocidad angular del rotor (rad/s). A su vez, el cálculo del Torque (T) en base a estos parámetros se puede reducir a la siguiente expresión:

$$T = \frac{3 \cdot r'_r}{s \cdot \omega_s} \cdot \frac{V_e^2}{\left(r_e + \frac{r'_r}{s}\right)^2 + (X_e + X'_r)^2}$$

En donde, al variar la frecuencia de sincronismo, modulada por el controlador del motor y manteniendo los parámetros resistivos del motor fijos, se puede presentar la siguiente curva del torque con respecto al “slip” en la **Figura 1.9**.

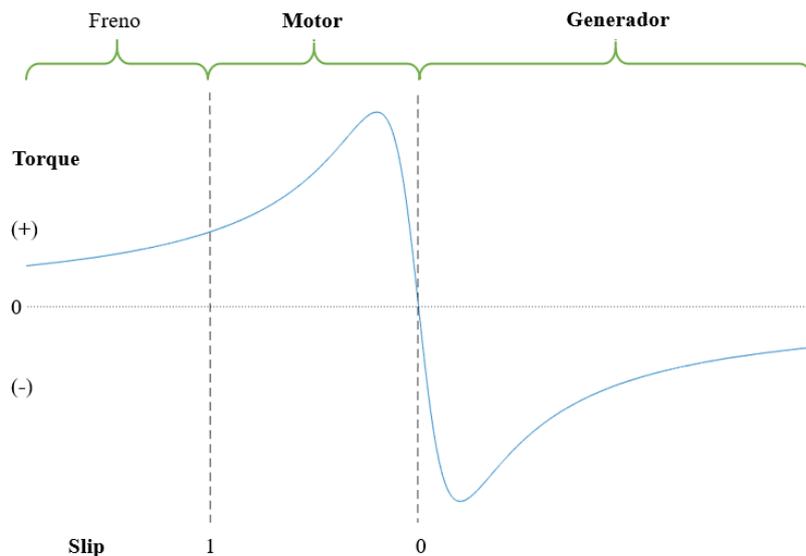


Figura 1.9. Curva Torque -"Slip" de un Motor de Inducción, mostrando las regiones de Freno, Motor y Generador

Fuente: Elaboración Propia.

1.3.2. Inversores

Para el caso de las líneas de alimentación en corriente continua en las que se utilizan trenes con motores AC asíncronos como la de la Línea 1, es necesaria la aplicación de la Electrónica de Potencia para su funcionamiento. El uso de Inversores bajo los tipos de Variadores de Voltaje/Corriente con Frecuencia Variables, (VVVF o VCVF) por sus siglas en inglés, ha permitido no solo obtener control sobre el Motor, sino también la posibilidad de asegurar el flujo de energía inverso que sucede durante el frenado de los motores, posibilitando así el uso del frenado dinámico [52]. Estos inversores, se componen en principio a configuraciones de Tiristores, GTOs (*Gate Turn Off*) o IGBTs (*Insultated Gate Bipolar Transistors*), que al ser controlados por Módulos de control por pulsos, PWM (*Pulse Width Modulation*), logran invertir y regular la tensión continua de alimentación por la catenaria y transformarla en una onda pseudo sinusoidal ajustada para los requerimientos del Motor AC síncrono [22].

Para aplicaciones ferroviarias en los inversores, el uso de los IGBTs por sobre los demás tipos de semiconductores, se distinguen por poder operar a mayores frecuencias de interrupción y poder ser implementados en inversores multinivel en altos niveles de voltaje. Estos tipos de inversores son mejores que los inversores resonantes (los cuales utilizan la resonancia de inductores y capacitores para establecer los pulsos de operación de los semiconductores), ya que no impactan en el funcionamiento de otros equipos del tren o externos al tren al no emitir ondas resonantes mientras circulan a través de la línea [52]. Para la aplicación del frenado regenerativo, se cuenta con un sistema de rectificación implementado por 2 o más IGBTs, vistos en la **Figura 1.10**, los cuales cumplen la función inversa y transforman la onda sinusoidal del motor a una onda únicamente positiva.

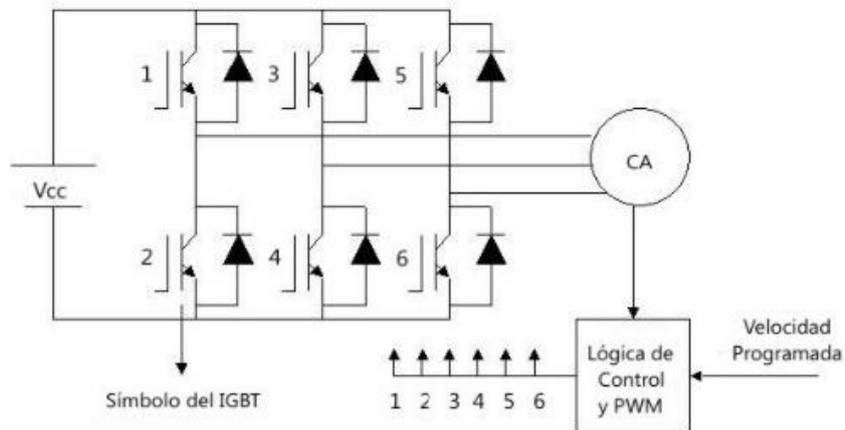


Figura 1.10. Arreglo de IGBTs en los Inversores de un tren Asíncrono
Fuente: P. A. Hernández Peñaloza, “Conversión de Trenes del STC MP-68R93 a Sistema de Tracción-Frenado VVVF” [53]

Para efectos de la Línea 1, los trenes de la marca Alstom, utilizan los equipos denominados Cofre de Ondulación (OCC), los cuales en un primer punto miden y acondicionan la energía suministrada por la catenaria y luego, en el proceso de inversión, utilizan 6 IGBTs, 3 pares en paralelo, como se muestra en la **Figura 1.10**, para cumplir con el propósito de rectificar la onda y alimentar a los 10 motores de tracción distribuidos en los 6 vagones [54].

1.3.3. Etapas de Operación

Durante la circulación del tren sobre la vía desde una estación hacia la siguiente, es común poder diferenciar 4 intervalos de tiempo característicos de los trenes eléctricos urbanos: Aceleración, Crucero, “Coasting” y Frenado [7] [55]. En la **Figura 1.11** se puede identificar de mejor manera estos 4 intervalos.

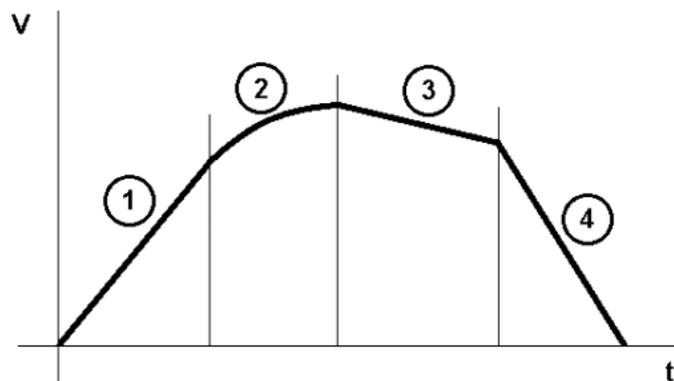


Figura 1.11. Curva característica de la velocidad en función del tiempo para trenes eléctricos de corto recorrido con motores trifásicos.

Fuente: C. Duca, “Trazado de las curvas de marcha de trenes” [56]

1° Aceleración: Durante esta etapa, el tren consume energía a través de la catenaria y acelera desde el estado de reposo, manteniendo una aceleración constante e implementando un control de torque sobre los motores [56].

2° Crucero: Posteriormente, ya con el tren en camino, este pasa por una etapa de crucero, etapa donde se distingue por mantener una potencia de consumo constante, y donde alcanza la velocidad máxima de su recorrido [56].

3° “Coasting”: Luego, el tren empieza por una primera etapa de desaceleración, en donde se desconectan los motores de tracción y el tren avanza por la velocidad e inercia con la que cuenta, por lo que también a este proceso se le conoce como “Deriva” [56].

4° Frenado: Finalmente, ya con la siguiente estación próxima, el tren eléctrico implementa sus dos principales accionamientos de frenado paulatinamente. Como primer paso se utiliza el freno dinámico, en donde se reconectan los motores y se utilizan como generadores, con el propósito de utilizar la energía cinética del tren transformándola en energía eléctrica. Una vez alcanzada una velocidad mínima para el frenado dinámico, se incurre al frenado neumático como último proceso de operación, hasta lograr su estacionamiento en la plataforma de abordaje de la siguiente estación [56], [57].

1.4.Frenado Regenerativo

El frenado dinámico es un fenómeno intrínseco de los motores eléctricos presente tanto en los de corriente continua como en los de corriente alterna. Como se logra ver en

la **Figura 1.9** para los motores de inducción, cuando la velocidad del rotor es mayor a la velocidad de sincronismo del motor (“slip” negativo), este se encuentra bajo las condiciones de operación en el segundo cuadrante y se torna en generador. Es en esta etapa, en donde el frenado regenerativo puede ocurrir durante el intervalo del frenado dinámico, generando la posibilidad de aprovechar cierta cantidad de la energía producida, de hasta un 40% de la energía utilizada para la tracción [58], dirigiéndola hacia otras cargas auxiliares del mismo tren, hacia el sistema de tracción de otros trenes, o simplemente disipándola en parrillas de resistencias (freno reostático) [34].

En la **Figura 1.12**, se puede ver de manera ilustrativa el flujo de esta energía regenerada. Un factor a tener en cuenta cuando sucede este proceso de frenado regenerativo es que el voltaje de la línea incrementa sustancialmente, por lo que la norma IEC 60850, establece que este aumento de voltaje no debe superar el 20% del valor nominal, utilizando así el método de freno reostático como última opción [36].

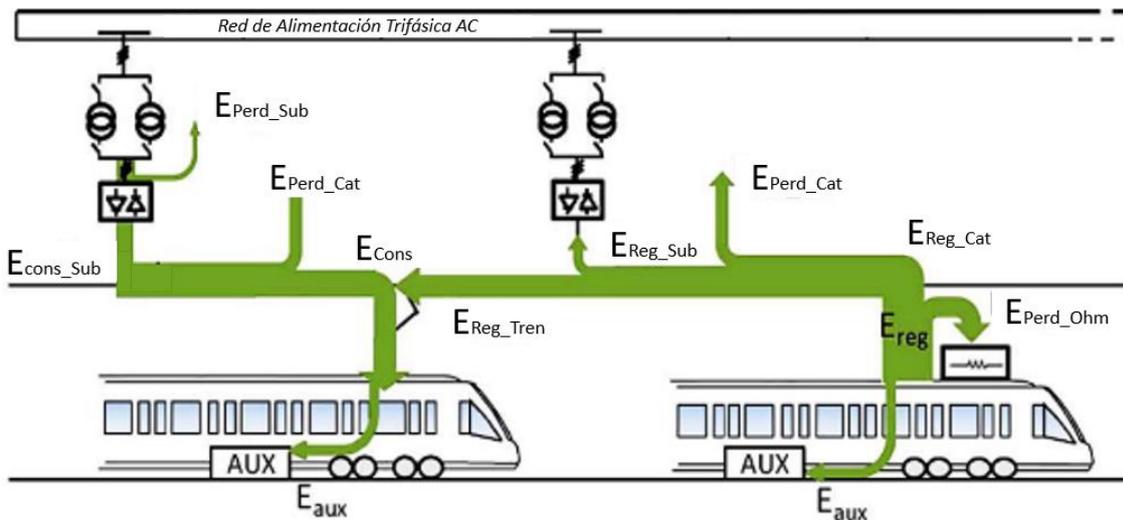


Figura 1.12. Flujograma del aprovechamiento de la energía regenerada en un caso sin tecnologías adicionales.

Fuente: S. S. Fazel, Saman Firouzian y B. K. Shandiz, “Energy-Efficient Emplacement of Reversible DC Traction Power Substations in Urban Rail Transport through Regenerative Energy Recovery” [59]

Este valor puede ser comparado con los valores presentados en la **Figura 1.13**, en donde se estima que para un sistema de trenes urbanos típicos se puede llegar a reutilizar hasta un 33% de la energía neta de tracción [59]. Además, la UIC estimó que el potencia máximo alcanzable por los trenes utilizando únicamente el Frenado Regenerativo es de aproximadamente el 16%; sin embargo, mediante el uso de alguna tecnología adicional incrementa este valor hasta en un 32% [5].

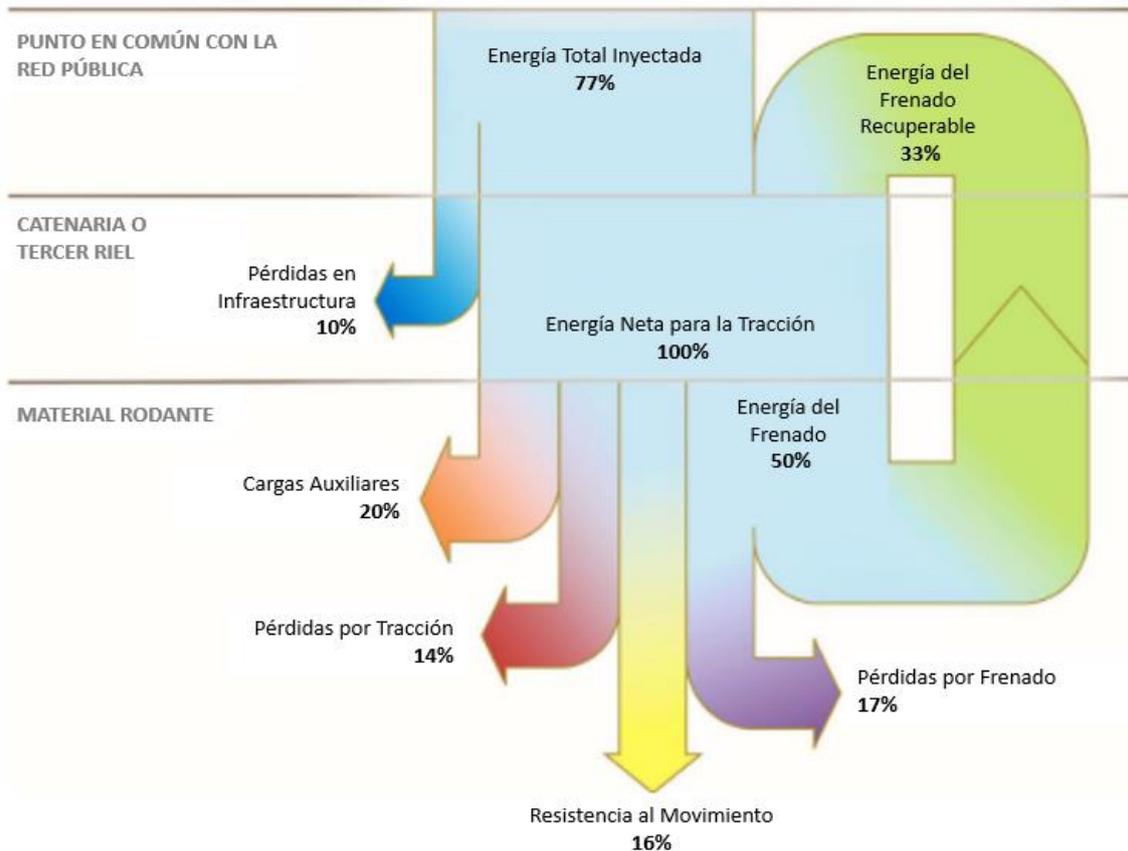


Figura 1.13. Flujo de energía típico en sistemas de trenes eléctricos urbanos

Fuente: S. S. Fazel, Saman Firouzian y B. K. Shandiz, “Energy-Efficient Emplacement of Reversible DC Traction Power Substations in Urban Rail Transport through Regenerative Energy Recovery” [59]

1.5. Alternativas para el aprovechamiento de la energía de frenado regenerativo

En la presente sección se explican las alternativas para el aprovechamiento de energía del frenado regenerativo más utilizadas y comunes en base a sus aplicaciones dentro de las líneas de metros urbanos similares a la Línea 1 del Metro de Lima y Callao.

Entre las alternativas se tienen las soluciones en base a la devolución de energía a la red o también llamadas subestaciones reversibles y el almacenamiento de energía tanto en los coches del tren como en las mismas estaciones. En el reporte de la UIC, en el cual se describe la tecnología actual y se implementa una vista al futuro en base al desarrollo y potencial para la eficiencia energética en los sistemas ferroviarios, se destacan las alternativas mencionadas y otras que no serán contempladas en esta revisión, ya que implican soluciones en otros aspectos de las ferrovías no relacionadas a su implementación en el sistema de tracción [35]. Esta selección de alternativas se basa en las 3 propuestas más comunes identificadas en la bibliografía.

1.5.1. Devolución de Energía a la Red

La propuesta de la devolución de la energía regenerada a la red se basa en la implementación de subestaciones reversibles, también llamadas subestaciones bidireccionales o subestaciones inversas. Esta tecnología trata básicamente de reutilizar la energía aprovechable por el frenado regenerativo de los trenes, llevándola hacia los sistemas de alimentación de corriente alterna de la misma red, o también hacia la Red externa o Grid, siempre y cuando se cuente la regulación correspondiente y se mantenga la capacidad de poder devolver esta energía a través de la subestación de alimentación.

Para esto, al transformar la onda continua a la onda alterna, el proceso de inversión tiene que limitarse mediante la cantidad de la inyección de armónicas a la red y el nivel de distorsión que pueden generar [60]. Las funciones principales de este tipo de tecnología bajo todas sus topologías se pueden resumir en las siguientes [61]:

- Brindar prioridad a la reutilización de la energía en la tracción de otro tren
- Disminuir la cantidad de armónicos insertados a la red
- Estabilizar el voltaje de red durante el frenado regenerativo, manteniéndolo siempre en el nominal.
- Establecer un posible flujo bidireccional entre la red de AC y DC

Los métodos de funcionamiento de las subestaciones reversibles se pueden subdividir en dos tipos de configuraciones: Por un lado, los Convertidores DC/AC, los cuales requieren de equipos adicionales para su funcionamiento en conjunto con la infraestructura de rectificación por diodos, y, por otro lado, los sistemas RTCR (*Reversible Thyristor Controlled Rectifier*), los cuales pueden reemplazar por completo los grupos de rectificación actuales por un mayor costo de inversión.

Convertidores DC/AC

En el caso de los convertidores DC/AC, se pueden subdividir en dos tipos de tecnologías similares, que pueden ser instaladas junto con la tecnología de rectificación ya instalada en las subestaciones. A continuación, se detallan estas tecnologías.

- **TCI (Thyristor line Commutated Inverter)**

Este sistema cumple la función inversa en un TCR (*Thyristor Controlled Rectifier*), ya que es conectado en Antiparalelo con los grupos de rectificación y con la distinción en que el pulso de activación de los Tiristores es activado por la misma onda sinusoidal de la Red. Esta tecnología requiere de la instalación adicional de autotransformadores para incrementar el voltaje en un 10% a 15% y también de reactores DC con el fin de eliminar las corrientes circulantes entre los diodos rectificadores y mejorar el factor de potencia. La empresa alemana Siemens en sus inicios contaba con un equipo denominado Sitras-TCI, que implementó en varias líneas de Europa como en el de Oslo y el de Singapur en 750 VDC y como en el “*Bayern Zugspitzbahn Bergbahn Railway*” en Alemania en 1500 VDC [62].

Los beneficios que presenta esta propuesta es que la potencia con la que se debe dimensionar este equipo es aproximadamente del 50% con respecto al grupo de rectificación, disminuyendo su costo de inversión [7]. Sin embargo, el uso de Tiristores no permite el control del factor de potencia en la salida, se pueden generar corrientes recirculantes y consumen mayor energía para su actuación, por lo que su línea ha sido discontinuada y reemplazada por el Sitras-PCI basada en IGBTs.

- **Tiristores Controlados por PWM (Pulse Width Modulation)**

Otro método muy similar al presentado anteriormente es el Inversor con Tiristores controlados por un generador de pulsos PWM. En este caso, el control es más exacto y preciso, lo que logra la ventaja de poder brindar un factor para el control de potencia; sin embargo, tiene como desventaja la pérdida de energía por la interrupción controlada de los tiristores, así como la ocupación de mayor cantidad área requerida en comparación con un sistema TCI [61].

Para este caso, así como el anterior, se requiere también de un incremento de voltaje para poder igualar a la tensión de alimentación trifásica y así poder conectarse a la red; sin embargo, este aumento de tensión se realiza previamente al proceso de Inversión DC/AC. Para ello, se utiliza un convertidor DC/DC “*Chopper*”, con el fin

incrementar el voltaje de salida previo a su Inversión y también un conjunto de contactores e interruptores que controlan y activan este sistema, seguidos por un inductor acoplado en serie, que actúan como filtros y prevén el ingreso de corrientes de fuga generadas por la frecuencia de intercambio de los diodos [63]. La principal desventaja de la utilización de PWM sobre tiristores de inversión junto con los componentes acoplados, es la gran cantidad de pérdidas que se generan en comparación a un TCI, siendo aproximadamente 6 veces mayores [64].

- **IGBTs Controlados por PWM**

Gracias a la aparición y uso de IGBTs en el uso de la Electrónica de Potencia, para contemplar un mejor uso de los PWM como controladores y llegar a obtener una mejor aplicación de este tipo de tecnologías, se han presentado varias propuestas mediante la implementación de IGBTs como principal componente de Inversión. Este tipo de tecnologías representa la mayor cantidad de aplicaciones en trenes en los que bajo el esquema inicial de la infraestructura eléctrica, no contemplaban un sistema de Inversión en la Subestación.

Un ejemplo de la tecnología existente de esta configuración de sistemas es el INGEBER de la empresa Ingeteam Traction Company, implementada en la estación Abando del tren de la ciudad de Bilbao, España; la cual, mediante un proyecto piloto en el 2009, logró conseguir un ahorro anual de \$120,000. Esta solución consistió en un Chopper en serie con un PWM inversor con IGBTs, en paralelo con el grupo de rectificación, utilizando filtros Inductivos en ambos lados de sus conexiones (catenaria y transformador) [65]. Este equipo, monitorea la red en todo momento y cuando es necesaria la conversión de la energía a la red AC, entrega corriente de alta calidad regulando la cantidad de armónicos que inyecta, incluso durante picos de consumo [11]. Esta solución también ha sido implementada mediante 3 Módulos en el Metro de Barcelona, España (1500 VDC) y 3 Módulos en el de Bielefeld, Alemania (750 VDC) La **Figura 1.14** demuestra el sistema eléctrico de INGEBER y sus componentes.

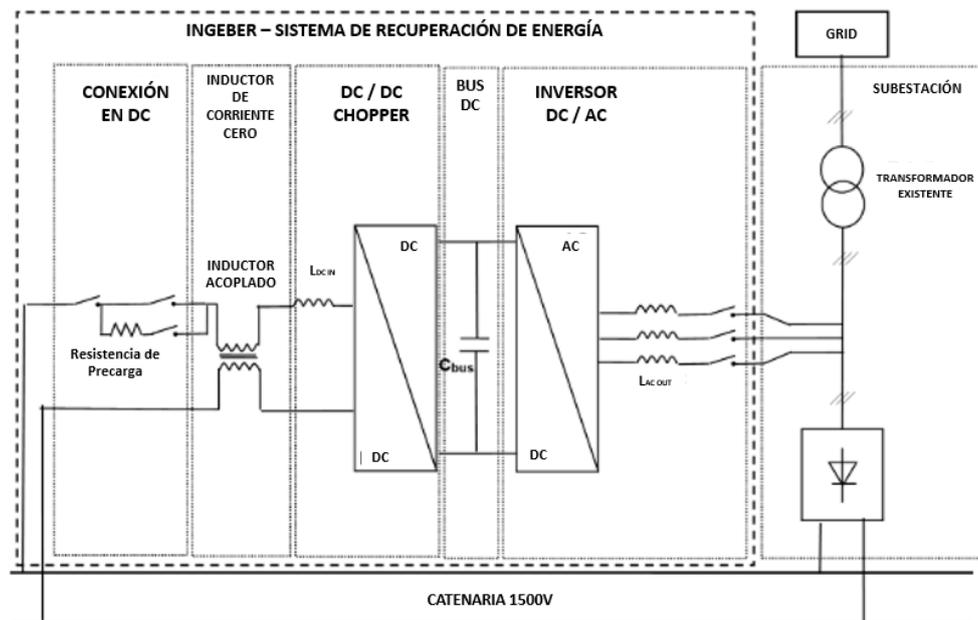


Figura 1.14. Circuito de conexión general del INGEBER

Fuente: M. Popescu and A. Bitoleanu, "A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems" [61]

Otro ejemplo de este tipo de tecnología es la de la empresa ABB, bajo el nombre del equipo "Enviline ERS (*Energy Recovery System*)" implementada en el tren de la ciudad de Lodz en Polonia desde el 2013. En este ejemplo se utiliza un inversor compuesto por IGBTs conectados en antiparalelo que, dependiendo de la operación de la línea, cuenta con la posibilidad de reducir en un 30% el consumo de la subestación de tracción sin superar la inyección de armónicas a la red con un THD no mayor al 5% del voltaje [66].

La empresa Alemana Siemens, también cuenta con este tipo de tecnología, Sitras PCI, la cual puede ser implementada bajo tres configuraciones: Inversor Autónomo, Inversor Adicional o Convertidor Reversible, muy de acuerdo con las características de la Línea y sobre todo de la capacidad de la estación de rectificación. Esta tecnología utiliza un puente IGBTs como convertidor, asegurando una eficiencia mayor al 96% en todas sus presentaciones, así como bobinas de obstrucción en DC y en AC y también un filtro de armónicos para el lado AC. Esta aplicación ha sido implementada en el metro de Stuttgart (Alemania) en 1 y en Riyadh (Arabia Saudí) en 16 estaciones de rectificación [67]. Los arreglos de este módulo se pueden ver en la **Figura 1.15**.

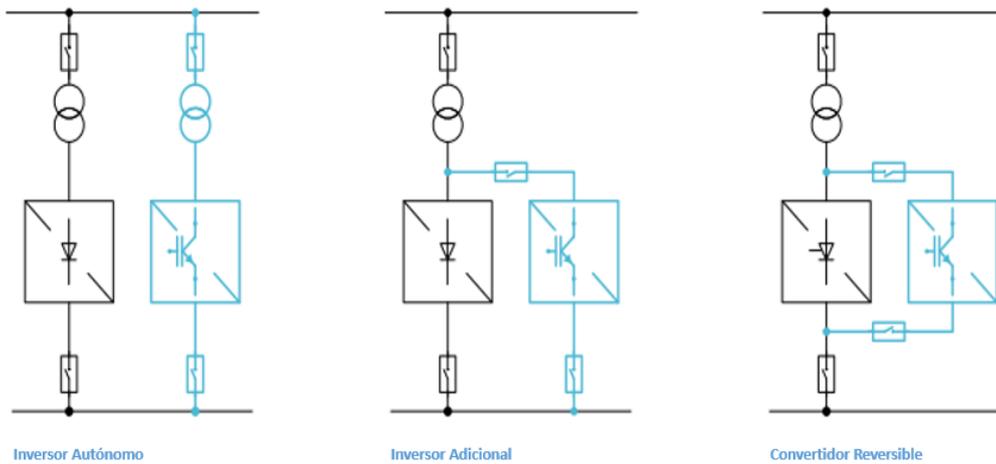


Figura 1.15. Configuraciones de Instalación del SITRAS PCI, Siemens.
Fuente: Siemens, “Sitras PCI” [67]

En Corea se propuso un prototipo de inversión de energía mediante IGBTs para conexiones en antiparalelo con rectificadoras de 12 pulsos, mediante un filtro LCL. Este modelo de 3.7 kW, puede actuar de dos maneras para sistemas reales de aproximadamente 100 kW. La primera operación es la de regeneración como inversor utilizando un convertidor DC/AC regulado por PWM, la segunda implementa un filtro de potencia activa en estado estacionario mediante un algoritmo basado en la teoría de Potencia Activa y Reactiva (p-q) para su operación [68]. Este modelo solo se ha desarrollado como prototipo, pero no brinda información sobre su implementación en el país.

La empresa IMTECH, ahora conocida como Dynniq, ha desarrollado una tecnología llamada “*Buddy*”, la cual implementa los IGBTs en un arreglo de 6 pulsos para la inversión de la onda en DC con cambios mínimos en la subestación de rectificación de 12 pulsos. Este sistema también funciona como rectificador al contar con IGBTs y se le conoce como “*Active Front End*”, al cual se le añade un transformador simple en paralelo al ya instalado. En su aplicación sobre las líneas en 750 VDC del Metro de Rotterdam, Holanda (Erasmus Line y Benelux Line), se implementaron dos ARUs de 1MW (*Active Regeneration Units*), como se le nombró en su momento, junto con filtros LC para contribuir con la función de estabilizar la línea en DC durante un proceso de carga dinámica [69]. A partir de su aplicación, el Metro ha logrado disminuir un aproximado de 600 MWh al año con un total de ahorro de 54,780 Euros por año [70].

Por otro lado, un estudio presentado en [71] se presenta como modelo de control para una de Subestación, mediante el sistema SISFREG, convierte las subestaciones de tracción de 6 o de 12 pulsos en una “Subestación Activa”. La estructura de esta propuesta se basa en un filtro activo basado en IGBTs conectado con un circuito separador hacia el bobinado primario del transformador de tracción con el fin de compensar los armónicos y la potencia reactiva hasta cuando no se esté utilizando el frenado regenerativo.

El principio de esta propuesta evalúa la intervención de un bloque de control encargado de monitorear los parámetros de voltaje y corriente en los 4 puntos de referencia. Este modelo ha sido utilizado tomando como base a las características de una subestación de tracción en sistema subterráneo del metro de Bucarest como propuesta mediante el software Matlab Simulink [71]. Dentro del análisis se obtuvo el resultado en las reducciones de THD de 24.19% a 8.61% en la red AC, como búsqueda de regulación de voltaje; sin embargo, en el estudio no se logró estimar la energía regenerada [71]. Esta misma tecnología ha sido estudiada a detalle en [72], en donde se detalla que el SISFREG, requiere de un bloque de control (CB), registrando en todo momento el voltaje y corriente de ambos lados del proceso de rectificación y de inversión, para poder activar o desactivar el sistema de Filtro Activo e Inversor cuando se requiera.

Este circuito debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Activar el Filtro Activo con la Línea DC cuando se presenten picos de corrientes, actuando como Amortiguador [72].
- Asegurar el flujo de energía regenerada entre los motores de tracción como primera instancia mediante el bloqueo del sistema de inversión, cuando el voltaje no exceda el 5% del nominal. Si es que excede, activar el sistema de inversión con el fin de regenerar esta energía devolviéndola a la Red AC, evitando sobrecargas de voltaje en la Línea DC [72].
- Asegurar la desconexión entre la Línea DC y el Filtro Activo, con el fin de conectar este último únicamente con la Red en AC y actuar como filtro de armónicos y compensador de potencia reactiva [72].

Rectificación e Inversión

- RTCR (Reversible Thyristor Controlled Rectifier)

La tecnología RTCR difiere de la presentada anteriormente, ya que implementa el uso de Tiristores para el sistema de rectificación (de AC a DC) y no utiliza diodos. Bajo esta premisa en [73], durante los inicios de esta tecnología demostró que se pueden reducir entre un 15% a 25% la cantidad de subestaciones de rectificación requeridas y entre un 10% y 15% la cantidad de equipos de infraestructura.

La tecnología RTCR, consta de dos grupos de TCRs (*Thyristor Controlled Rectifier*) conectados en antiparalelo, cumpliendo la misma función de rectificación o inversión dependiendo de la dirección flujo de energía. La gran diferencia es que esta tecnología sustituye a los transformadores de rectificación de la(s) subestación(es) ya implementadas en el metro, con grupos de rectificación base de Tiristores, por lo que es mayormente aplicable para trenes que se encuentran en su etapa de proyecto y no como propuesta para implementar en trenes ya operativos. El principal beneficio de esta tecnología es que regula en todo momento el voltaje de la línea y reduce bidireccionalmente los flujo de corrientes picos [7].

El funcionamiento de este tipo de tecnología es muy similar al de los TCIs, con la diferencia que se puede establecer un mismo flujo bidireccional únicamente mediante TCRs desde un solo módulo. Así, se tiene como beneficio el no contar con corrientes circulantes, ya que solo se puede activar el modo de inversor o el modo rectificador, pero no en simultáneo. Una desventaja con respecto a los TCIs es que el transformador deberá ser dimensionado entre un 20% a 30% más de Potencia, mientras que se puede regenerar hasta un 30% de la energía de frenado [61]. Esta propuesta también propone la posibilidad de eliminar en su totalidad los interruptores ultrarrápidos, ocupando en su totalidad hasta un 50% menos de área de utilización con respecto a los TCIs [73]. Su primera aplicación se remonta a 1996 en el tren de Dallas y Phoenix (EEUU), en donde para el primero, se redujeron el número de subestaciones de 14 a 18 mediante su implementación [60].

La empresa ABB ha desarrollado un módulo nombrado como “*Enviline Traction Controller Rectifier (TCR) System*” bajo las condiciones de esta tecnología, el cual puede operar tanto para líneas de 600 VDC, 700 VDC, 1.5 kVDC y hasta 3.0 kVDC, desde potencias de 0.5 MW hasta 8 MW [74]. Como beneficios, este módulo permite una

eficiencia superior al 99.5% y el flujo bidireccional de la energía activa y reactiva (4 cuadrantes). La empresa no muestra referencias de su aplicación.

- IGBTs con PWM

Esta aplicación mezcla tanto el proceso de rectificación en base a un puente de Tiristores en conexión en paralelo a un arreglo de IGBTs controlados por un PWM como parte del proceso de Inversión, manteniendo un único transformador. Por un lado, durante la tracción, el rectificador por tiristores actúa en comportamiento nominal y el inversor de IGBTs actúa como un filtro activo de potencia. Por otro lado, durante la regeneración, el rectificador queda sin utilización mientras que el arreglo de IGBTs retorna la energía DC a la Red AC [66].

El principal ejemplo de este tipo de tecnología ya ha sido comercialmente utilizado por la marca Alstom, bajo el nombre HESOP (*Harmonic and Energy Saving Optimizer*), el cual permite redireccionar eficientemente hasta en un 99% la energía útil generada por el frenado regenerativo, controlar el voltaje de la línea DC, limitar los armónicos bajo un THD < 5% y compensar el factor de potencia [75][76].

Esta tecnología fue probada en el 2009 con una potencia de 300 kW en 700 VDC en la Planta La Rochelle en Francia con resultados satisfactorios, contribuyendo con un 18% de ahorro de energía en base a estas pruebas iniciales [76]. Luego de su reconocida aplicación como inversor en la Línea Victoria del metro de Londres a partir de marzo del 2015, este modelo fue mejorado con el objetivo de obtener un mínimo de recuperación del 15%, en donde se reemplazó el uso de Tiristores de rectificación por IGBTs tanto para la rectificación e inversión, bajo el proyecto “*Life RE-USE*”. A partir del 2017, ya con la versión mejorada ilustrada en la **Figura 1.16**, su implementación ha resultado en 128 módulos vendidos [75], en donde se rescatan su aplicación en los siguientes Metros:

- Milán, ATM (*Azienda Transporti Milanesi*): Se instaló como medida de prototipo en la estación Rogoredo desde octubre del hasta Julio del 2018 en la Línea M3 del Metro (1500 VDC). Desde el 2017 se obtuvo un promedio anual de energía recuperada del 22.15%, con un total de 479 MWh ahorradas y una reducción de 171 toneladas de CO₂ equivalentes durante el periodo [77].

- Australia, Sidney Light Rail: En donde se han instalado 13 Módulos (9 de 1.2 MW y 4 de 2 MW) en el “Sidney Light Rail”. Esta aplicación fue inaugurada a mediados de julio del 2017 junto con todo el sistema nuevo, pero a diferencia del Metro de Lima y Callao, este metro utiliza un sistema de Alimentación en las subestaciones sin Catenaria (*Catenary Free*) [78].
- Panamá, la Línea 2 (1500 VDC) instalada e inaugurada en el 2019, cuenta con 8 módulos HESOP de 4 MW, en donde gracias a su aplicación se espera un retorno de inversión de todo el proyecto en tan solo 4 años [79].

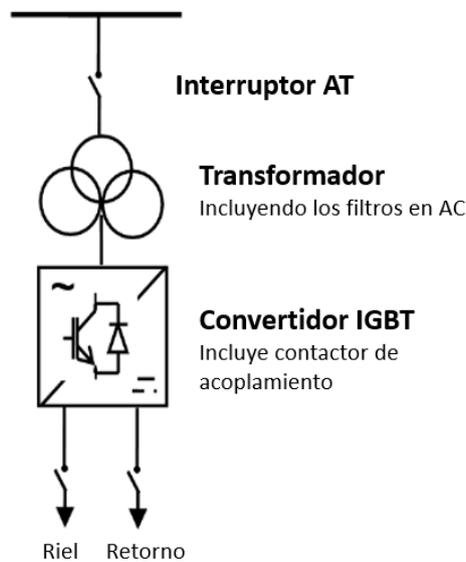


Figura 1.16. Circuito básico del sistema HESOP de Alstom mejorado.

Fuente: M. Popescu and A. Bitoleanu, “A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems” [61]

A manera de comparativa, en [7] y en [60] se muestra una comparación entre estas tecnologías en base a sus principales datos técnicos. La **Tabla 1.3** muestra esta comparación de las tres alternativas mencionadas previamente, en donde se destaca a la tecnología RTCR como la implementación más adecuada para nuevas instalaciones y la PWM para las ya existentes.

Característica	Rectificación		Rect. / Inv. por IGBTs
	TCI	PWM	
Potencia de Reg. (MW)	3.0	1.5	3.0
Potencia de Rect. (MW)	0	0	12
Eficiencia %	96	92-94	97
Área (m ²)	2.40	7.50	5.25
Costo aproximado (MMUS\$)	0.22	0.32	0.60

Tabla 1.3. Comparación de las tecnologías principales para subestaciones reversibles
Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: V. Gelman, “Energy Storage That May Be Too Good to Be True” [60]

Así también, se puede identificar un resumen de las aplicaciones de los tipos de tecnologías comerciales ya implementadas en los metros similares al Metro de Lima y Callao (1500 VDC). A finales del 2019, se tenían las aplicaciones listadas en la **Tabla 1.4.**

Tecnología	Fabricante	Metro	Características
HESOP	Alstom	Panamá	8 módulos- Primera Implementación
HESOP	Alstom	Milán M3	2 módulos – 22.15% de reducción en energía entre octubre 2017 y julio 2018.
Sitras-TCI	Siemens	Bayerische Zugspitzbahn Bergbahn	2.2 MW – 1 Módulo
Sitras-PCI	Siemens	Riyadh	2.5 MW – 16 Módulos – Primera Implementación
Ingeteam Traction	INGEBER	Metro Bilbao	1.5 MW – 1 Módulo, desde el 2009. 120,000 euros ahorrados anuales

Tabla 1.4. Comparación de tecnologías comerciales de subestaciones reversibles y su aplicación en los metros.

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: M. Popescu and A. Bitoleanu, “A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems” y F. Meishner y D. S. Uwe, “Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids” [61], [80]

1.5.2. Almacenamiento de Energía

Esta propuesta se basa en la conservación mediante el almacenamiento de la energía del frenado regenerativo dentro en fuentes de energía, para poder liberarla y usarla cuando se necesite, reduciendo la energía consumida de la red externa [81]. Este

almacenamiento ha sido catalogado como una solución viable para implementarse en sistemas ferroviarios, ya que en la actualidad los precios de su fabricación y el incremento de su capacidad, eficiencia y tiempo de vida han evolucionado de tal manera que varios proyectos piloto y concretos se han llevado a cabo. Los motivos por los que se utilizan este tipo de alternativas son comunes y se basan en las necesidades y características técnicas y de operación de cada Línea o Metro, siendo las siguientes las más comunes y generales [80]:

- **Eficiencia energética:** La reducción de energía consumida y de emisiones de CO₂ dependen de una buena selección de la tecnología, dimensionamiento y ubicación de localización [82].
- **Regulación de Voltaje:** Estas instalaciones logran asegurar y fortalecer la estabilidad del voltaje de línea, considerando el aumento de la frecuencia y la mejora los de trenes en operación a través de esta [82].
- **Reducción de Potencia Pico:** La implementación de ciertas tecnologías logran suplir la demanda durante las horas pico, evitando las sobrecargas de las estaciones y al mismo tiempo reduciendo los costos por potencias pico facturados [82].
- **Energía de Emergencia:** La implementación de sistemas de almacenamiento como fuente de energía para los trenes en caso de emergencias, son alternativas utilizadas en situaciones de fallas eléctricos, apagones o desabastecimientos [82].
- **Calidad de Energía:** Reducción de armónicos inyectados en la red externa e interna de corriente alterna, actuando como filtros activos y compensadores de potencia [82].

Según [66], los sistemas de almacenamiento, independientemente de donde sean instalados o de qué tipo de tecnología utilicen, constan de tres principales componentes: La fuente de almacenamiento en sí, el convertidor de potencia y el controlador de carga y descarga. En la **Figura 1.17** se puede ilustrar estos tres principales componentes y las interacciones entre ellos. En esta figura también se recalca que mediante el almacenamiento solo es necesario un sistema de conversión DC/DC y no uno de Inversión

DC/AC, evitando la inyección de armónicos a la red AC, a diferencia de los sistemas de devolución de energía.

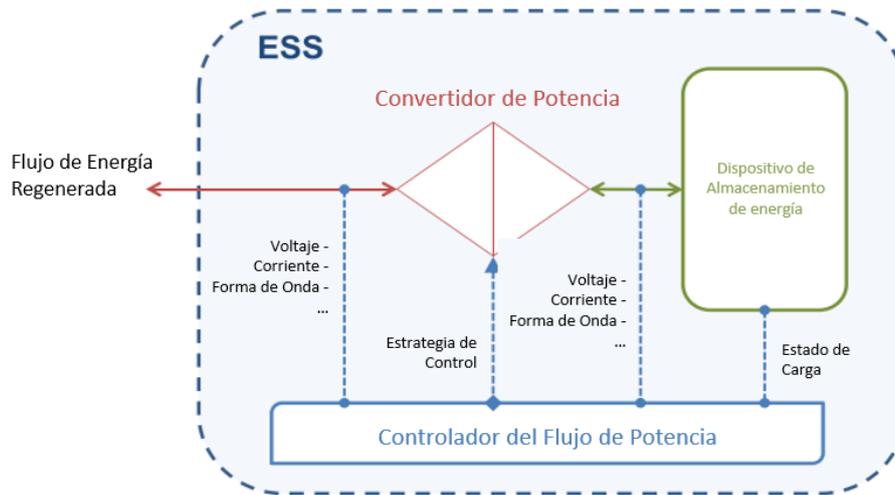


Figura 1.17. Componentes de un Sistema de almacenamiento de energía para aplicaciones ferroviarias.
Fuente: A. González-gil, R. Palacin, and P. Batty, “Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy” [66]

Como circuito esquemático eléctrico, los sistemas de almacenamiento cuentan con un puente de IGBTs a manera de Chopper como componente principal, permitiendo el flujo de energía bidireccional. Además, cuentan con un filtro capacitivo y reactivo, un par de seccionadores y un Interruptor Ultrarrápido como mecanismo de actuación HSCB (*High Speed Current Breaker*). Todos estos elementos son ilustrados en la **Figura 1.18**.

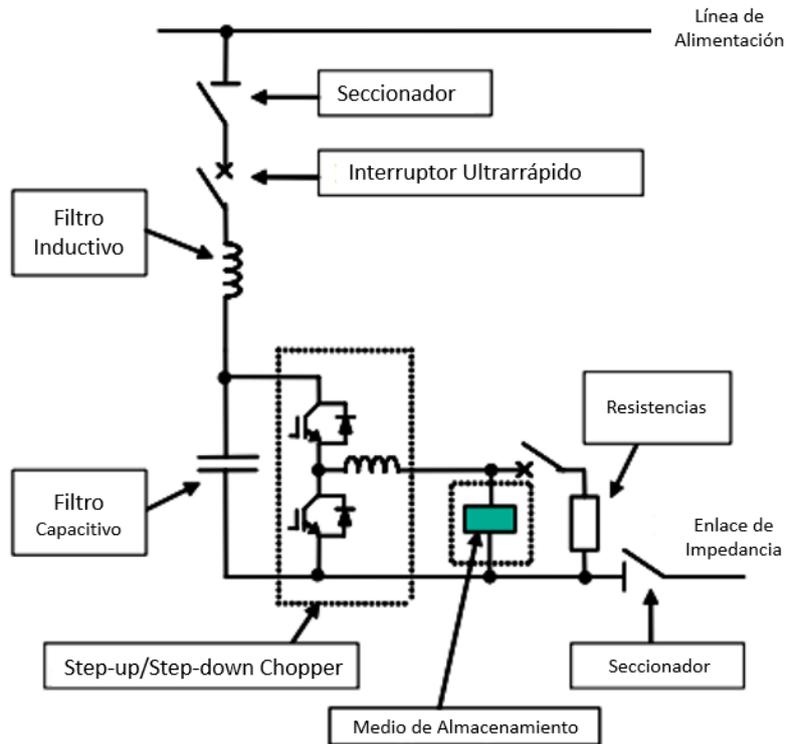


Figura 1.18. Circuito principal de un sistema de almacenamiento de energía.

Fuente: T. Konishi, "Fixed Energy Storage Technology Applied for DC Electrified Railway" [83]

Las tecnologías más utilizadas como métodos de almacenamiento energético se distinguen por ser de almacenamiento eléctrico (Capacitores), almacenamiento químico (Baterías) y de almacenamiento mecánico (Ruedas de Inercia) [60], [61], [84]. También se menciona el uso de almacenamiento en Superconductores Magnéticos (*SMES*), la cual consta del flujo de corriente a través de un superconductor, manteniéndolo bajo temperaturas de estado supercríticas (criogénicas) y de esta forma, conservando el campo magnético de modo persistente a manera de almacenamiento de energía. Esta tecnología no ha sido aplicada aún debido su alto costo de inversión y mantenimiento; sin embargo, ofrece características técnicas de almacenamiento aplicables para sistemas de cargas variables como los metros eléctricos [85].

En su mayoría, los principales aspectos técnicos para la comparación son la Capacidad de energía almacenada (kWh), la Potencia (kW), la Eficiencia de la Conversión de energía (%), la Máxima Corriente de carga y descarga (Amps), el voltaje de control (V_c) y el voltaje de carga y descarga (V_{ch} y V_{dch}) [86]. A continuación, se describirán cada una de las alternativas mencionadas anteriormente.

1.5.2.1. Según el Tipo de Tecnología

- **Supercapacitores, Ultracapacitores o EDLC (*Electromechanical Double Layer Capacitors*)**

Los Supercapacitores, Ultracapacitores o EDLCs, se basan en el mismo concepto para la retención de energía que los capacitores normales: El campo eléctrico, con la diferencia que el valor de la capacitancia es mucho más elevado.

Los Supercapacitores, también conocidos como Supercondensadores, realizan el almacenamiento directamente en el campo eléctrico mediante el almacenamiento de cargas en el electrodo positivo y a diferencia de los capacitores estáticos o electrolíticos, estos son utilizados para el almacenamiento de energía en grandes cantidades, pero con menor cantidad de ciclos de carga y descarga, puesto que almacena mayor potencia [87].

Una de las características por las que más destaca el uso de supercapacitores es que cuentan con muy bajos tiempos de carga y de descarga, variables entre una decena de segundo hasta poco menos que un minuto, que permiten la posibilidad de contar con altas potencias, entre 500 y 10,000 (W/kg). Sin embargo, sus principales deficiencias se presentan en la cantidad de energía que pueden almacenar (Wh/kg) y la baja densidad específica de energía con la que cuenta [87].

Dentro de los fabricantes comerciales de este tipo de alternativas se encuentra Maxwell Tecnologías, con los ultracapacitores de 3V con capacitancias de hasta 3400 Faradios y con una energía específica de 4.25 Wh / kg. Esta tecnología la utilizan varias empresas que implementan ultracapacitores como Siemens, Hitachi, etc. [88]. Otros fabricantes como ApowerCap y Nesscap cuentan con los ultracapacitores de 2.7 V, pero con capacitancias de 590 F y 1800, respectivamente [87].

- **Baterías**

Las baterías son las más antiguas para estas aplicaciones y constan de una serie de celdas de almacenamiento de energía química, conectadas en serie o en paralelo, que funcionan mediante la interacción y flujo de electrones desde el ánodo hacia el cátodo por medio de una solución electrolítica (separadora).

Dentro de las opciones de baterías utilizadas en la actualidad por los sistemas eléctricos, se distinguen dos: Las de Litio – Ion (Li-Ion) y Níquel Metal Híbrido (Ni-Mh). Sin embargo, en este grupo también se destacan las baterías de Ácido de Plomo (*Lead-Acid*), de Sulfuro de Sodio (Na-S), pero no son las más utilizadas [89].

- **Litio – Ion**

Las Baterías de Litio-Ion constituyen uno de los tipos de baterías más populares, no solo en aplicaciones ferroviarias sino también en todo el grupo de sistemas de almacenamiento portable en gran y en baja escala. Los beneficios de esta tecnología son su alta capacidad de almacenamiento, alta densidad de potencia y también que no sufren de efecto memoria [66]. Sin embargo, al ser muy susceptibles a los cambios de voltaje, requieren de un BMS (Battery Management System) para controlarlo, así como también son susceptibles a los cambios de altas temperaturas por sobre su nominal. [90]

Como se explicó anteriormente, las baterías de Litio-Ion cuentan con dos polos (+ y -) en donde los iones del Lito (Li^+) circulan entre los electrodos, comúnmente óxidos de metal como cátodo y grafito como ánodo. En el proceso de carga, los electrones fluyen desde el lado positivo hacia el negativo a través de la fuente, mientras que los iones de Litio internamente a través del electrolito, del cátodo al ánodo. Durante la descarga, el flujo es inversor, por lo que los iones de Litio regresan al cátodo y por ende los electrones también, pero a través del conductor [91].

La principal desventaja de estos equipos de almacenamiento es que requieren de sistemas de protección especializados, por lo que las baterías de Li-Poly surgieron. Estas baterías tienen menor cantidad riesgos ante inflamación y cuentan con mayor facilidad en su control; sin embargo, tienen menor capacidad de almacenamiento y tiempo de vida [66].

- **Níquel – Metal Hidruro**

Si bien la tecnología de las baterías de Níquel-Cadmio (Ni-Cd) son una tecnología relativamente madura en las aplicaciones de sistemas ferroviarios, estas han sido reemplazadas por las baterías de Níquel - Metal Hidruro (Ni-HM). Debido a que al contar

con Hidrógeno en vez de Cadmio como electrodo negativo, los peligros ambientales son menores, se aumenta la densidad de potencia y sobre todo sufren en menor intensidad el fenómeno de efecto memoria [89].

Las características principales de esta manera de almacenamiento se basan en el mismo concepto que las de litio con la diferencia que se utiliza Óxido de Níquel como ánodo e Hidrógeno como cátodo. Como principal beneficio de esta tecnología, se tiene que esta cuenta con una alta densidad de potencia, comparándola con las de Litio y no cuenta con materiales dañinos; además, su tiempo de vida es mucho mayor bajo el número de ciclos [66].

- **Ruedas de Inercia**

Las Ruedas de Inercia o también llamadas “*Flywheels*” son mecanismos de almacenamiento de energía mecánica, que constan principalmente de un rotor girando a altas Revoluciones por Minuto (RPMs) y de muy alta inercia orientados vertical u horizontalmente dentro de un cilindro o una cámara que actúa como estator. Este rotor está sujeto al eje mediante rodajes de muy baja fricción o magnéticos que, al estar conectados a una máquina eléctrica, actúan como motor y generador en los momentos de carga y descarga [89].

El principio de almacenamiento de energía se basa en conservar la inercia rotatoria del rotor actuando en los cuadrantes I y II, en procesos de carga y descarga, de tal manera que para conservar y maximizar esta energía, la cámara está en vacío mediante una bomba de vacío y el rotor debe ser de acero o de materiales compuestos con Carbono para soportar altos niveles de estrés térmico por esfuerzos giratorios [92]. En la **Figura 1.19**, se puede ver la configuración Interna común de una Rueda de Inercia.



Figura 1.19. Partes principales de una Rueda de Inercia de la empresa Calnetix, VYCON Regen
Fuente: Calnetix Technologies, “Vycon® regen® The Proven Flywheel Energy Storage System for Rail Innovation.” [93]

Para aplicaciones ferroviarias, el uso de Ruedas de Giro se cataloga como una fuente de alimentación al igual que las baterías, supercapacitores, etc. Este tipo de almacenamiento ha sido utilizado desde los años 1970 y no solo se utiliza en trenes sino también en muchas aplicaciones vehiculares. Los principales parámetros en lo que se basa este son las velocidades de giro y la potencia con la que se puede cargar y descargar, teniendo en cuenta este último beneficio como el más atractivo para su utilización en sistemas de regeneración de energía de altas potencias. Si bien algunas propuestas han modificado los materiales por otros menos destructivos en caso de accidentes, estos pueden seguir siendo catastróficos. Además, estos equipos tienen que contar con un mantenimiento continuo, ya que aumentos en la inclinación o fricción reducen sus capacidades significativamente [66].

A manera de comparativa entre estas cuatro alternativas, el diagrama Ragone es habitual para la discriminación de los tipos de almacenamiento energético, resumiendo en el eje horizontal la densidad de energía y en el eje vertical la densidad de Potencia.

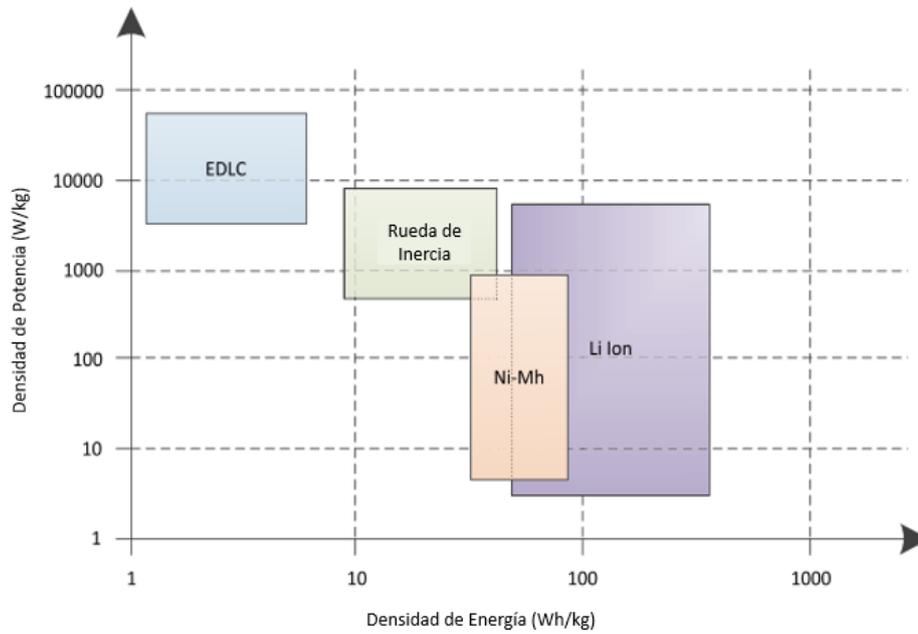


Figura 1.20. Diagrama de Ragone simplificado para las principales alternativas para el almacenamiento de energía

Fuente: F. Meishner y D. S. Uwe, “Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids” [80]

En el diagrama presentado en la **Figura 1.20** se puede distinguir que el uso de baterías cuenta con mayor cantidad de almacenamiento por unidad de masa, pero no cuenta con densidades de potencia tan elevadas como los EDLCs, acotando que ambos ejes están en escala logarítmica. Los parámetros técnicos relevantes, mencionados anteriormente se pueden ver reflejados en [80] y en la **Tabla 1.5**, en donde realiza una comparación técnica económica de las tecnologías de almacenamiento aplicables para sistemas ferroviarios.

Tecnología	Densidad de Energía	Densidad de Potencia	Eficiencia	Tiempo de Descarga	Tiempo de Vida	Inversión
	Wh / kg	W / kg	%	-	Ciclos	\$/ kWh
EDLC	1 - 5	500 - 10,000	90 - 100	ms - min	< 1,000,000	10,000
FW	5 - 100	1000 - 5000	90 - 95	ms - min	200,000	3000 - 6000
Li-Ion	100 - 300	125 - 5000	> 95	s - h	1000 - 15,000	100 - 2500
Ni-Mh	60 - 80	200 - 250	65 - 70	s - h	1500 - 3000	400 - 2400

Tabla 1.5. Comparación Técnica y económica de las tecnologías de almacenamiento

Fuente: F. Meishner y D. S. Uwe, “Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids” [80]

Así mismo, en base a sus aplicaciones de almacenamiento en sistemas ferroviarios eléctricos, en la **Figura 1.21** se puede verificar los ejemplos de estos tres tipos de tecnologías aplicadas en los reconocidos metros.

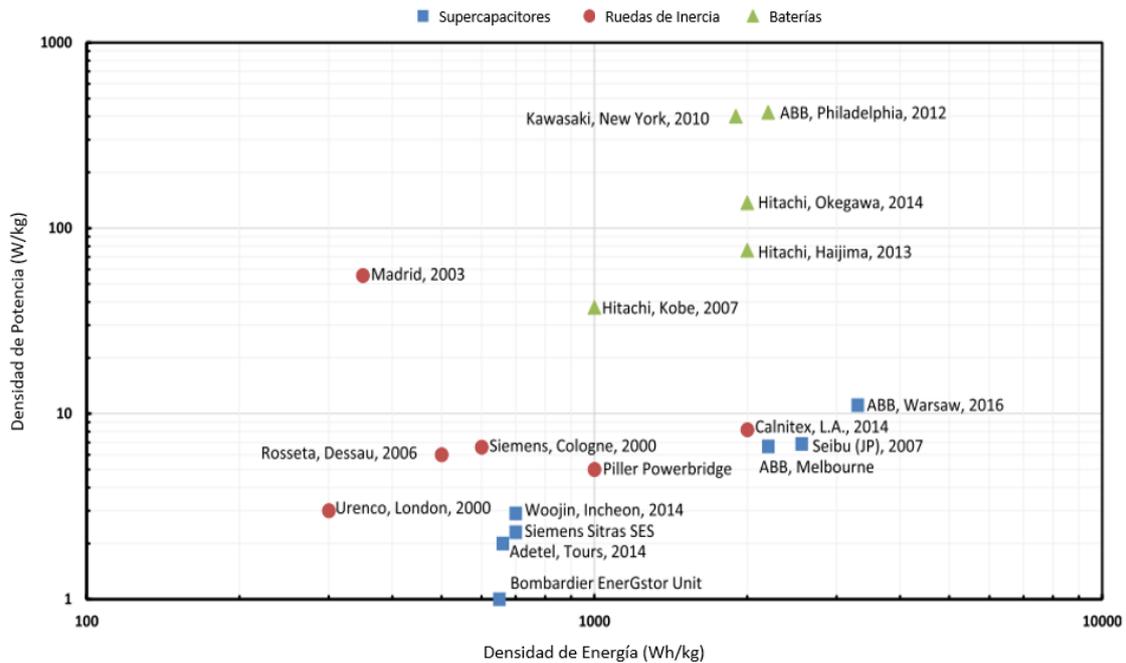


Figura 1.21. Diagrama Ragone con las aplicaciones de los sistemas de Almacenamiento según la tecnología utilizada y la empresa encargada
Fuente: F. Meishner y D. S. Uwe, “Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids” [80]

Dentro de varias aplicaciones, estos tipos de almacenamiento de energía o Energy Storage System (EES) pueden ser instalados en los mismos trenes (*On-Board ESS*), así como de manera estacionaria (*Wayside EES*). La **Figura 1.22** muestra la diferencia entre estos dos tipos de instalaciones en donde el esquemático de la izquierda hace referencia a su instalación estacionaria y el de la derecha hace referencia a su instalación en los mismos trenes.

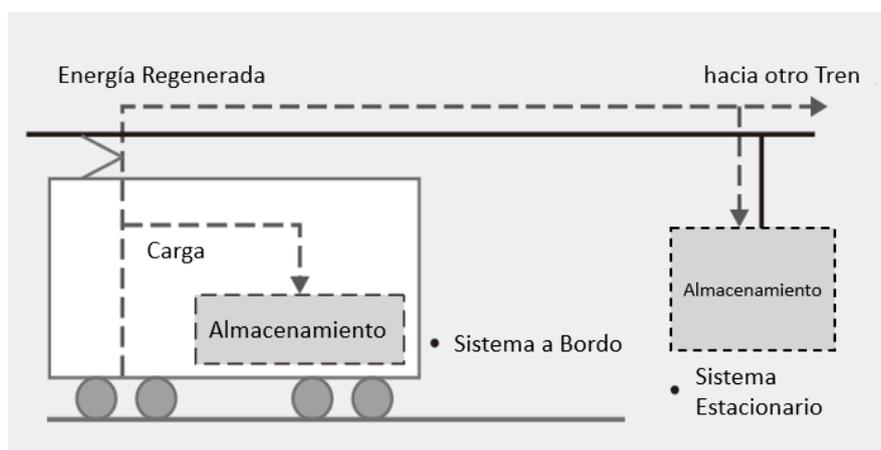


Figura 1.22. Tipos de Sistemas de Almacenamiento de energía.
Fuente: M. Shimada, Y. Miyaji, T. Kaneko, and K. Suzuki, “Energy-saving Technology for Railway Traction Systems Using Onboard Storage Batteries” [94]

Ambas alternativas utilizan los sistemas de almacenamiento presentados anteriormente y hasta implementan soluciones híbridas con dos o más tecnologías, como baterías, para cubrir cargas base y supercapacitores para cubrir cargas pico, bajo una misma propuesta [84].

A manera de antecedentes para estas tecnologías, tanto en sistemas dentro como fuera del tren, se ha optado por describir las aplicaciones ya existentes en los metros similares en Voltaje a la de la Línea 1 del metro de Lima y Callao (1500 VDC).

1.5.2.2. Según la Ubicación

- Dentro de los trenes

Al almacenamiento de energía bajo la modalidad de almacenamiento en los mismos trenes, comúnmente se utiliza para ser consumida por el mismo tren durante el siguiente proceso de tracción o aceleración. El hecho de que las fuentes estén instaladas en los mismos trenes, reduce las pérdidas de energía por resistencia en el circuito de alimentación, aumentando la eficiencia del sistema con respecto a las demás [61] [95], tal cual como se muestra en la **Figura 1.23**. Si bien esta tecnología tiene mayor impacto en los trenes sin punto de alimentación continuo, sin catenaria, sin tercer riel, o también llamado “*Catenary Free Railways*”, también se utiliza para aplicaciones de trenes con la posibilidad de conectarse a la línea de alimentación en todo momento.

Como desventajas del uso de esta tecnología, se encuentra el espacio y peso disponibles dentro de los trenes, afectando directamente la capacidad de potencia y cantidad de energía a las que se limitan [89]. Si bien muchas alternativas mencionan que este almacenamiento reduce la cantidad de elementos resistivos para el frenado reostático, la inclusión del consumo energético debido al aumento de peso se incrementa en un 12% aproximadamente [96]. Las aplicaciones de esta tecnología sobre trenes ya diseñados y en utilización no son recomendadas, ya que alteran la capacidad de carga del tren y se requiere un rediseño total del mismo para su instalación.

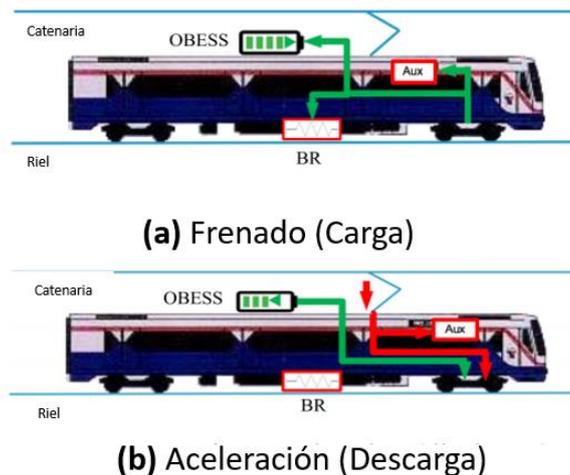


Figura 1.23. Flujo de Potencia de un tren equipado con Almacenamiento en el tren durante: (a) Frenado; (b) Aceleración.

Fuente: C. Sumpavakup, T. Ratniyomchai, y T. Kulworawanichpong, “Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy” [95]

Las aplicaciones para este tipo de tecnología son muy variadas y hasta se pueden presentar soluciones híbridas. Además, los mismos proveedores de los metros ya incluyen estos equipos instalados en sus propios vehículos, ya que se consideran desde el diseño de este. En la **Tabla 1.6.** se resumen los proveedores según el tipo de tecnología y su aplicación en metros.

Tecnología	Proveedor Comercializador	Aplicación
EDLCs	Bombardier, MITRAC Energy Saver	Tren Ligero, Manheim, Alemania (750 VDC), 2003
EDLCs	Siemens Sitras MES	Tramo en Innsbruck, Austria
EDLCs	CAF, ACR System	Tramo en Sevilla, Zaragoza y Granada (España)
EDLCs	Alstom Steem	Tramo en París, Francia 2009
Li-Ion	Kinki, Shayro, LFX-300, streetcar	Charlotte, Carolina del Norte
Ni-MH	Alstom - Saft	Tramo en Niza, Francia, 2007
Rueda de Inercia	Alstom y CCM, Citadis	Tramo en Rotterdam, Holanda, 2004
Híbrido (EDLCs + Ni-MH)	Siemens, Sitras HES	Tren Ligero, Lisboa, Portugal, (750 VDC), 2008

Tabla 1.6. Aplicaciones de las tecnologías de Sistemas de Almacenamiento en el Tren
Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: M. Khodaparastan, A. A. Mohamed, and W. Brandauer, “Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems” [7]

- **Dentro de las Estaciones**

Esta manera de almacenamiento cuenta con un mayor campo de aplicación en comparación con la anterior, debido a que no está restringido por el espacio ni el peso máximo determinado por los mismos trenes. Esta alternativa resulta ser más aplicable para metros que ya están operativos y que no contaban con este almacenamiento desde su diseño inicial o también para los metros que no cuentan con limitaciones estrictas de espacio. Este tipo de almacenamiento es utilizado principalmente para aplicaciones de reducción de energía consumida y reducción de potencia en las horas pico [7],[66][80]. Un esquemático de este sistema se presenta en la **Figura 1.24**.

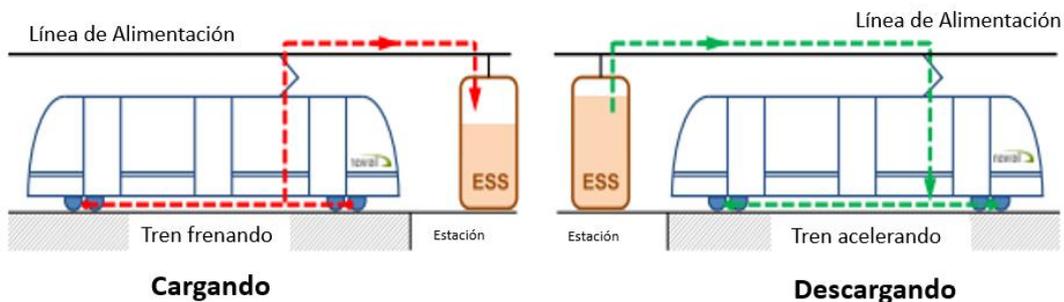


Figura 1.24. Esquemático del funcionamiento del Almacenamiento en las estaciones durante frenado y durante aceleración.

Fuente: A. González-gil, R. Palacin, and P. Batty, “Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy” [66]

En Melbourne, para el 2015 la empresa ABB bajo el Modelo Enville ESS ha instalado en total una potencia de 2.2 MW con un total de almacenamiento de 24 MJ con EDLCs. Este sistema se instaló con el objetivo de reducir el consumo energético y al mismo tiempo atacar el problema de tracción, entre las estaciones Newport y Loverton [97]. Asimismo, la misma empresa instaló 7 módulos, con un total 3.3MW de potencia y de 40 MJ en almacenamiento de energía mediante EDLCs en la Línea 2 de del Metro de Varsovia, Polonia. Si bien este metro es de 750 VDC, se considera como el sistema de almacenamiento más grande instalado hasta la actualidad, con un aproximado de 3 MWh ahorrados por día [98].

Por otro lado, el 28 de diciembre del 2016 en Hong Kong la empresa Meidensha Corp. instaló el denominado módulo de Almacenamiento de energía mediante módulos EDLCs “Capapost”. Este fue instalado en la extensión de la nueva línea del MTR (Mass Transit Railway), bajo las estaciones Ocean Park, Wong Chuk Hang, LeiTung y South Horizons. Este equipo consta de 8 módulos capacitivos de 4.7 Faradios cada uno, con una

potencia total de 3 MW y una capacidad de almacenamiento de 20 MJ. Al ser una aplicación en una ampliación nueva del metro, no se cuenta con la información de ahorro energético, pero se detalla que los principales objetivos son el de reducción de potencias pico y emisiones de gases CO₂ [99]. En el metro de Seibu, Tokyo, también se ha implementado desde el 2007 un total de tres módulos de “Capapost” (2.56 kW), donde se evita la cancelación del frenado regenerativo mediante el frenado reostático. La instalación de estos sistemas en las estaciones de Agono y Shumaru ha logrado llegar a recuperar hasta en un 77% la energía regenerada devuelta al tren [22] [83].

Por su parte, la empresa Woojin Industrial Systems Co. Ltd., ha instalado desde el 2011 hasta el 2014 el modelo de ESS para aplicaciones ferroviarias en las Líneas 7 (Sub. Sangdong), 2 (Sub. Seocho), 1 (Sub. Techno Park), 4 (Sub. Ssangmun) y 9 (Sub. Bongeunsa), capacidades de 37.39 MJ, 46.73 MJ, 46.73 MJ, 46.73 MJ y 37.39 MJ, respectivamente. Solo para la Línea 7 se obtuvo una reducción en los costos de operación del 28% [90] [100]. Adicionalmente, en el 2013 la misma empresa instaló en la subestación Gapcheon de la Línea 1 de la ciudad de Dajaeon, Korea, una potencia nominal de 1400 kW y un total de almacenamiento 28.04 MJ en base a EDLCs de la marca Maxwell. Desde su instalación, este proyecto reporta ahorros del 20% en el consumo de energía de la red externa [101].

Un ejemplo cercano al del Metro de Lima es el del Metro de Medellín en Colombia, en donde gracias a estudios hechos en [102], se llegó a conclusión de que se puede obtener entre un 25% y 19% de la energía consumida y utilizarse como energía reutilizable. Esta investigación dio paso a una implementación real para el dimensionamiento de un prototipo de banco de condensadores en el Metro. En este módulo se implementaron 8 Ultracapacitores Maxwell con una capacitancia total de 7.87 Faradios bajo un voltaje de 1000 VDC a manera de Piloto, que luego fueron duplicados [103]. Los resultados de esta propuesta instalada en estación Niquía, obtuvieron una disminución de en promedio 300 kWh diarios [12][13].

La empresa Alemana Siemens, bajo el modelo Sitras SES, también cuenta con aplicaciones de EDLCs, pero para sistemas en 750 VDC y en 600 VDC. Este modelo consta de 1152 EDLCs empaquetados en 125 módulos, en su totalidad un equipo SES cuenta con 700 kW de potencia y una capacidad de 2.3 kWh. Los metros de Colonia,

Madrid, Portland, Dresden, Bochum, Fuerth, Rotterdam, Toronto, Beijing y Nuremberg han contado con esta aplicación desde el año 2001 hasta la actualidad [80].

Por parte de los sistemas que utilizan ruedas de inercia, la gran mayoría de aplicaciones instaladas hasta el 2019 han sido para tensiones de Línea de 600 VDC o 750 VDC, añadiendo las de 3000 VDC en el Metro de Madrid, sin evidencia que haberse utilizado en 1500 VDC [80].

Con respecto al uso de baterías, dentro de las aplicaciones comerciales se encuentran como principales empresas a: ABB en cooperación con Saft America y Viridity Energy, Hitachi y Kawasaki. De estas, las aplicaciones para Líneas en 1500 VDC solo cuenta la empresa Hitachi, por lo que se hará hincapié en sus aplicaciones.

Por su parte, ABB junto Saft, desarrollaron e implementaron un sistema de almacenamiento estacionario en base a baterías de Litio (Li-Ion) 20P para el SEPTA (*Southeastern Pennsylvania Transportation Authority*), USA, en donde para el 2012, se instalaron 2.2 MW en baterías con una Capacidad de 420 kWh para la línea de 660 VDC. Los objetivos que se plantearon en su momento fueron los de reducir la energía consumida de la red (1,057 - 2,115 MWh por año) y poder contar con energía de emergencia en caso de cortes de suministro. Gracias a este primer piloto, se lograron resultados de hasta \$190,000 al año ahorrados (10%) en costos de energía suministrada y una reducción de más de 1000 toneladas de CO₂ al año [104]. Gracias a este aprovechamiento, la empresa Constellation junto con SEPTA, propusieron luego la instalación de 8.75 MW de almacenamiento por baterías cumpliendo los mismos objetivos mencionados [105].

Con respecto a las aplicaciones en 1500 VDC, la empresa Hitachi ha logrado instalar su modelo B-Chopp con baterías de Li-Ion en los metros de Kobe, Hajima, Okegawa y Horinouchi.

- En Kobe, Japón, se instaló en el 2005 una potencia de 1 MW con una capacidad de energía de 37.4 kWh en la estación Myodani de la línea Seishin-Yamate. Al ser una sección de la línea con pendiente negativa (2.9%) por casi 4 km, también se instaló un sistema de inversión de retorno a la red en AC, pero según los estudios se confirmó que no se presentaron interferencias negativas funcionando en paralelo. A partir de esto, también se instaló el doble de capacidad en la

subestación Itayado en el 2007, logrando así un aproximado de 310 MWh al año ahorrados en toda la Línea [83].

- En las estaciones de Hajima y Okegawa, como parte de la Red Este del “*Japan Railway Company*”, se instalaron módulos de 2 MW con capacidades de 76.12 kWh y 137.02 kWh en el 2013 y en el 2014, respectivamente. Los resultados de esta instalación contribuyen con la reducción del consumo de energía no solo en las mismas estaciones sino también en las cercanas, contribuyendo con un total de energía ahorrada de 400 MWh/año para Hajima y de 600 MWh a 700 MWh al año.

Otra empresa reconocida en el mercado es la marca Kawasaki, mediante la implementación de sus módulos *Battery Power System (BPS)* de 1.9 MW, la cual utiliza baterías Gigacell de 36 V, para sistemas de alimentación en 750 VDC como en 600 VDC. Además, cuenta con una aplicación en 1500 V para la Línea Den-en-toshi (Tokyu), en donde a partir del 2011, se instalaron 2 bancos de 39 módulos Gygacell (Ni-MH) con una capacidad energética de 450 kWh, recuperando un aproximado de 1600 MWh y una reducción total de 669 ton de CO_{2eq} emitidas al año [106].

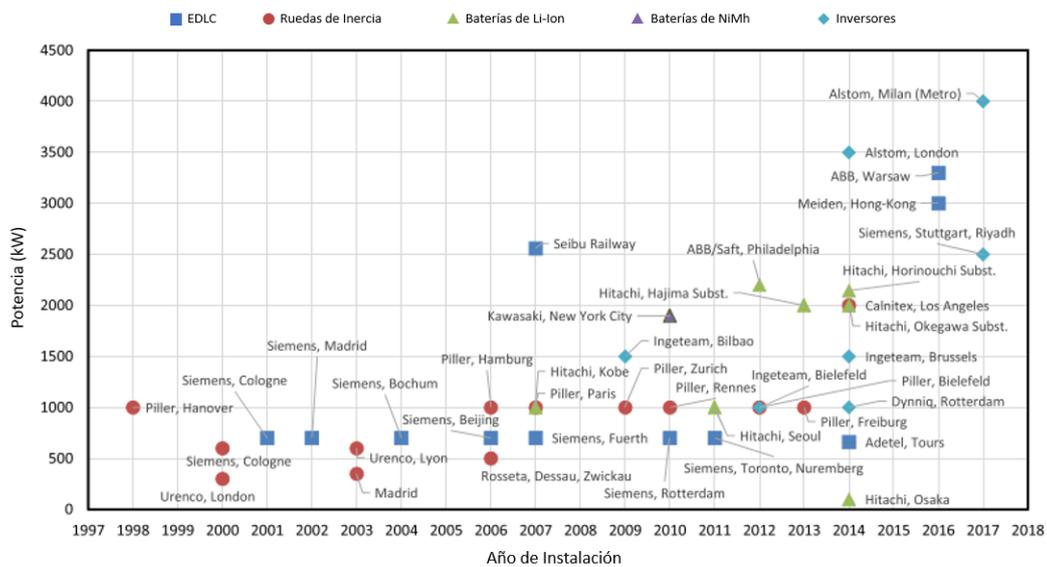
Este sistema ha sido reconocido también por contar con proyectos en los metros como el de Nueva York (600 VDC) y Washington (750 VDC) en USA. Sus aplicaciones se presentan en la **Tabla 1.7**.

Ubicación	Batería	Año	Capacidad (kWh)	Beneficios
Osaka	Ni-MH	2011 / 2013	205 / 204	Ahorro de energía y reducción de picos de voltaje de 939 V a 854 V [107].
Sapporo	Ni-MH	2013	204	Ahorro de energía y Potencia [107]
Washington D.C.	Ni-MH	2012	378	Ahorro de energía entre el 7.2% y 15.4%. Reducción de Potencia entre 121 y 436 kW. [108]
New York	Ni-MH	2010	367	71. 4% de almacenamiento de energía regenerada y Voltaje de la Red (antes 118V; con BPS 63V). [109]

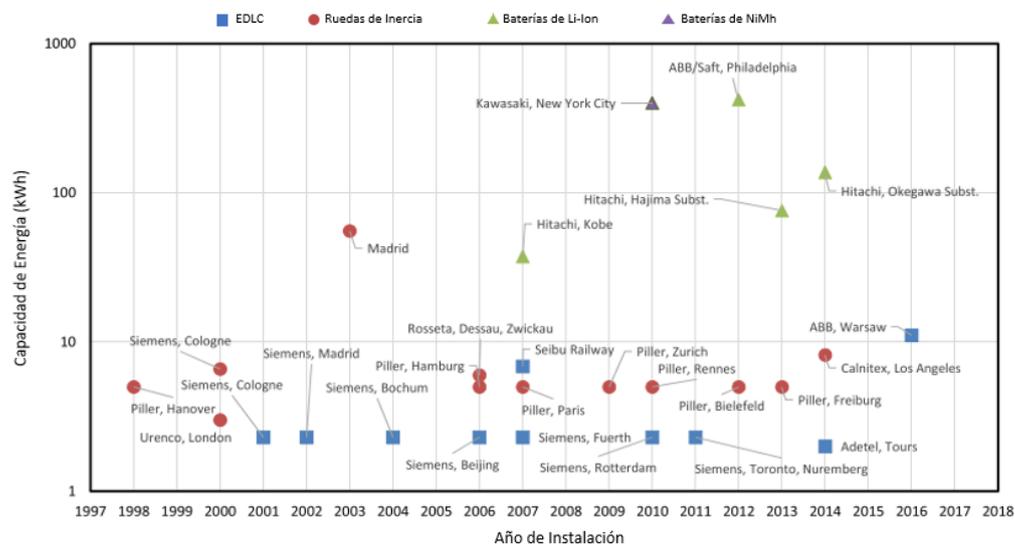
Tabla 1.7. Resumen de las aplicaciones del Sistema de almacenamiento estacionario Gigacell (Kawasaki)
Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: Kawasaki, “Battery Power System (BPS) for Railways”

1.6. Comparación de Alternativas

A manera de resumen, en cuanto a las aplicaciones de las alternativas presentadas anteriormente, la **Figura 1.25** consta de dos gráficas de dispersión, que ordena cronológicamente las aplicaciones en función a su Potencia (kW) y a la capacidad de energía instalada para ciertos casos.



(a)



(b)

Figura 1.25. Potencia y Capacidad de las aplicaciones presentadas en base al año de instalación.
Fuente: F. Meishner y D. S. Uwe, “Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids”

En la gráfica (a) de la **Figura 1.25** se puede identificar que la aplicación y el aumento de la potencia instalada de los equipos para el aprovechamiento de esta energía ha ido aumentando a lo largo de los años, siendo la alternativa de devolución de energía a la red la más utilizada en los últimos años en conjunto con los bancos de Supercapacitores. Así también, de la gráfica (b) se puede notar que el uso de Ruedas de Inercia y Supercapacitores se ven limitados hasta el rango de los 10 kWh de almacenamiento, mientras que las baterías de Litio o Níquel cuentan con mucha más capacidad. Ambas gráficas pueden ser utilizadas como primer indicador para la selección de la opción más viable a implementar en la Línea 1 según las similitudes de potencia de consumo, número de estaciones, entre otras variables, que tengan con el Metro en estudio.

1.7. Software de Modelado eTrax de ETAP

El software eTrax se utilizará como herramienta para el proceso de Simulación y estimación del frenado regenerativo en la Línea 1, así como también para el cálculo del comportamiento de la instalación de las alternativas preseleccionadas. Este software utiliza cálculos de sistemas de Potencia ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) implementando flujo de potencias instantáneos. Es utilizado por diseñadores, planificadores y operadores de las líneas de metros tanto en las redes de Alta y Baja tensión en Voltaje AC y DC [110]. Dentro de las características principales de este Software, a continuación, se listan las que resaltan para la aplicación de la Investigación:

- Diseño y estudio del comportamiento del sistema
- Determinación del consumo de energía de las estaciones de servicio
- Visualización Espacial de la Línea y el movimiento en tiempo real de los trenes.
- del Almacenamiento de Energía y Frenado Regenerativo

El esquema de procesamiento del Módulo eTrax de ETAP se ilustra en la **Figura 1.26**, incluyendo el uso de las variables del tren, la frecuencia de operación y las dimensiones físicas de la vía para el cálculo del esfuerzo requerido y consigo la potencia eléctrica consumida en el dominio del tiempo. Cabe añadir a este esquema que para el método de cálculo se utiliza también el análisis electro-transiente que el software ETAP utiliza.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

La presente investigación propone el uso de una metodología trabajada en conjunto con la empresa operaria Concar, la cual está dividida en 5 etapas. La primera etapa consta de la recopilación e ingreso de información pertinente de la Línea 1 bajo el objetivo de utilizarla como datos de entrada para las simulaciones a realizar. La segunda etapa en la simulación electrodinámica utilizando el Software eTrax de ETAP especializado en Sistemas ferroviarios con el fin de representar el flujo operacional y energético de los trenes de Línea 1 y contrastar esta simulación con la información real mediante un proceso de validación. La tercera etapa engloba un proceso de preselección de alternativas, en donde se consideraron los criterios de viabilidad según las decisiones que la empresa requería, en base a las posibilidades que cada alternativa presenta. La cuarta etapa consistió en la utilización de la herramienta de simulación bajo las mismas condiciones que en la etapa dos, pero añadiendo las alternativas preseleccionadas con la finalidad de dimensionar su impacto en el aprovechamiento del frenado regenerativo. Como quinta etapa, se realizó una comparación mediante una matriz multicriterio con la finalidad de evaluar y presentar la mejor alternativa aplicable en la Línea 1 del Metro de Lima y Callao. La recopilación de estos pasos junto con sus objetivos se presenta en la **Figura 2.1**.

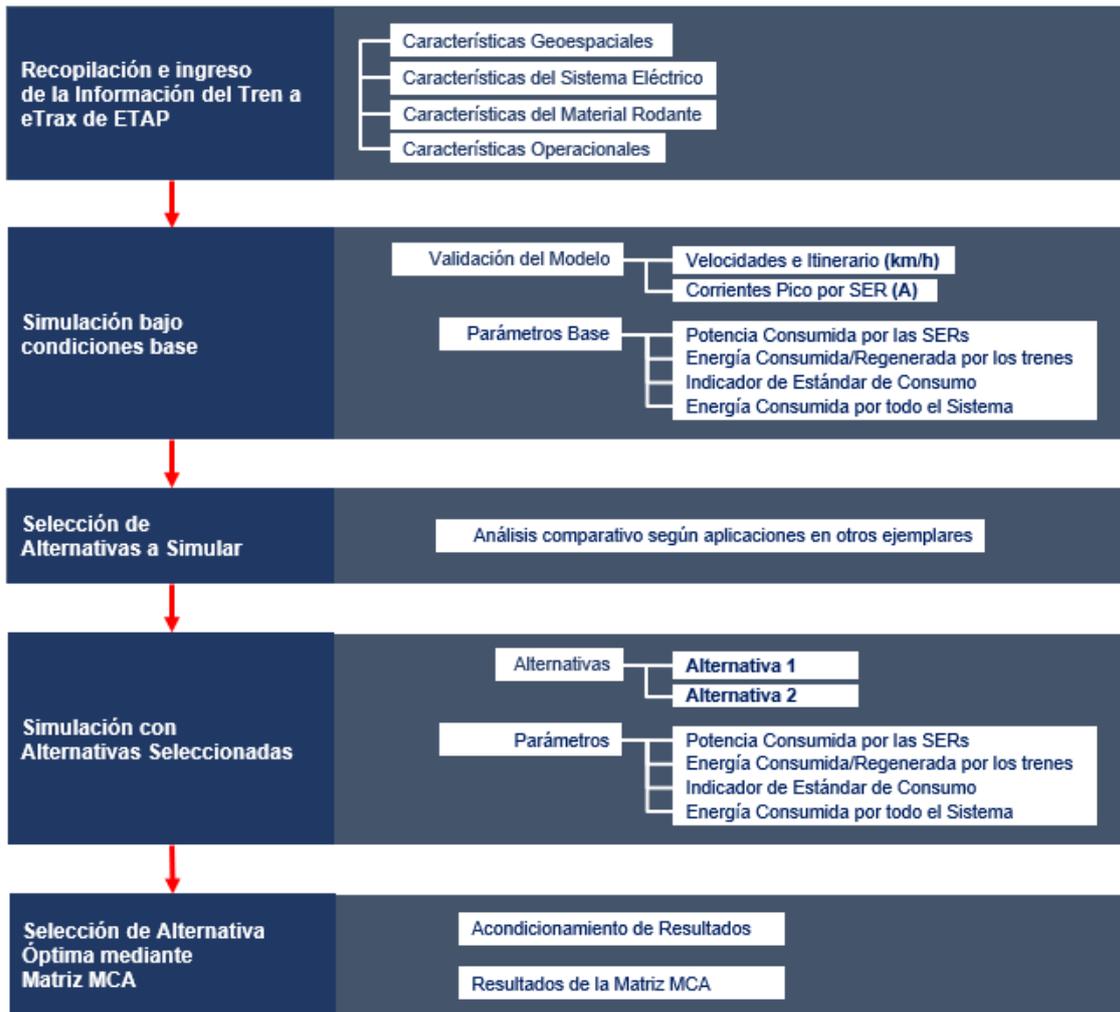


Figura 2.1. Diagrama descriptivo de las Etapas para la Metodología aplicada en el estudio
Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se describen cada una de las etapas que conforman la metodología de la presente investigación a detalle.

2.1. Recopilación e Ingreso de Información a eTrax

Para evaluar la viabilidad de las alternativas en el caso de estudio de la Línea 1 del Metro de Lima y Callo, a continuación, se describen las Características Técnicas y Operacionales de los Equipos con los que la infraestructura del Metro cuenta, así como la metodología del ingreso de Variables en el Software eTrax.

2.1.1. Características Geoespaciales

Como primer paso, se utilizó la interfaz geoespacial del software eTrax para la Línea 1 de la página de información libre y disponible *Open Steet Map*, descompuesto en tres archivos OSM. Para las rutas Par e Impar de la Línea, se corroboró la ubicación de las líneas de trazo, tanto de la catenaria como la vía del Tren y de las ubicaciones de las Estaciones y puntos de parada del Tren. Esta ruta cuenta con un recorrido total de 34 kilómetros desde la Estación Villa el Salvador, por el extremo sur hasta la Estación Bayóvar en el extremo Norte. La lista de las estaciones, abreviaturas (abr.) y ubicaciones de las estaciones con respecto al punto de referencia kilométrico (Pk) se presenta en la siguiente **Tabla 2.1**.

Estación	abr.	Pk	Estación	Abr.	Pk
Villa El Salvador	VES	371	Nicolás Arriola	NAR	18 892
Parque Industrial	PIN	1 784	Mercado Mayorista	GAM	19 852
Pumacahua	PUM	3 612	Miguel Grau	MIG	21 158
Villa María	VMA	5 074	El Ángel	ELA	22 268
María Auxiliadora	MAU	6 171	Presbítero Maestro	PRE	22 825
San Juan	SJU	7 339	Caja De Agua	CAA	24 436
Atocongo	ATO	8 984	Pirámide Del Sol	PIR	25 845
Jorge Chávez	JCH	10 551	Los Jardines	JAR	27 210
Ayacucho	AYA	11 691	Los Postes	POS	28 508
Los Cabitos	CAB	12 587	San Carlos	SCA	29 940
Angamos	ANG	14 597	San Martín	SMA	31 331
San Borja	SBS	15 602	Santa Rosa	SRO	32 374
La Cultura	CUL	17 222	Bayóvar	BAY	33 481

Tabla 2.1. Lista de Estaciones y Ubicaciones respecto al Punto Kilométrico (Pk)

Fuente: Elaboración propia. Adaptado de: SIEMENS y FERROVÍAS GyM, “Mejoras infraestructura L1 Metro Lima 01 - ‘Simulación del Sistema Eléctrico,’[17]

Ya con los trazos en la plataforma geoespacial, se procedió a agrupar los trazos y los puntos de ubicación de las estaciones con el fin de contar con la ruta tanto de la vía par e impar de la Línea 1 y las estaciones entre cada una de ellas. Este proceso se realizó mediante la selección de todos los elementos entre las ubicaciones de los marcadores o nodos de las Plataformas para cada estación. La **Figura 2.2** muestra un ejemplo realizado para la configuración de la Ruta desde la Estación VES hasta BAY por la vía Par (de Sur a Norte).

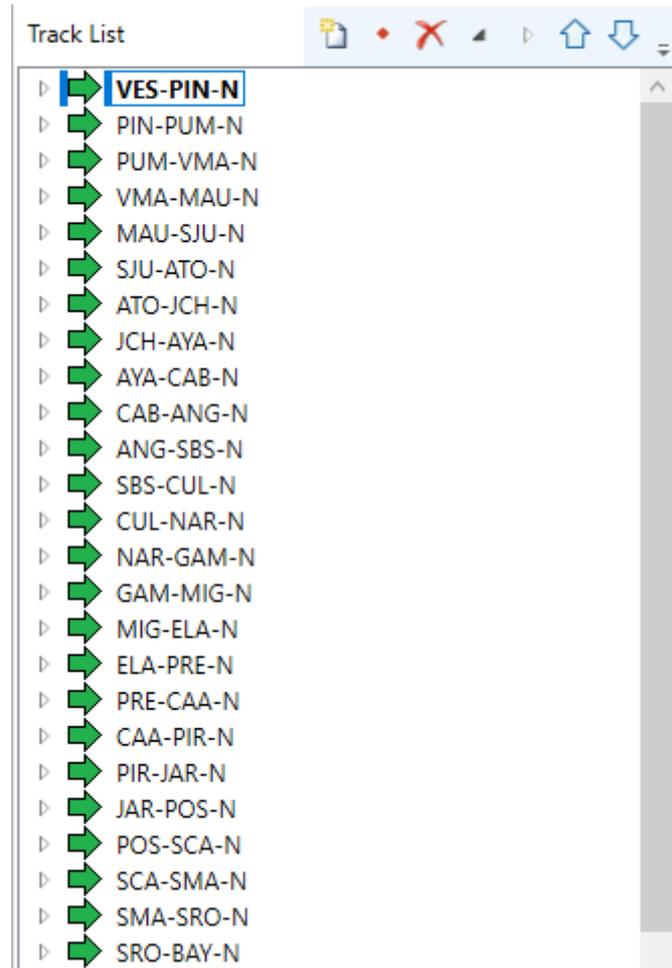


Figura 2.2. Interfaz eTrax Editor con el ingreso del tramo VES-BAY por la vía Par en Dirección “Norte”
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

Posteriormente se realizó el ingreso de las variables geospaciales que se requieren en el software, utilizando los componentes de barra de herramientas “*Traction Edit*” para el posicionamiento de los marcadores en la ubicación correcta mostrados en la **Figura 2.3.**

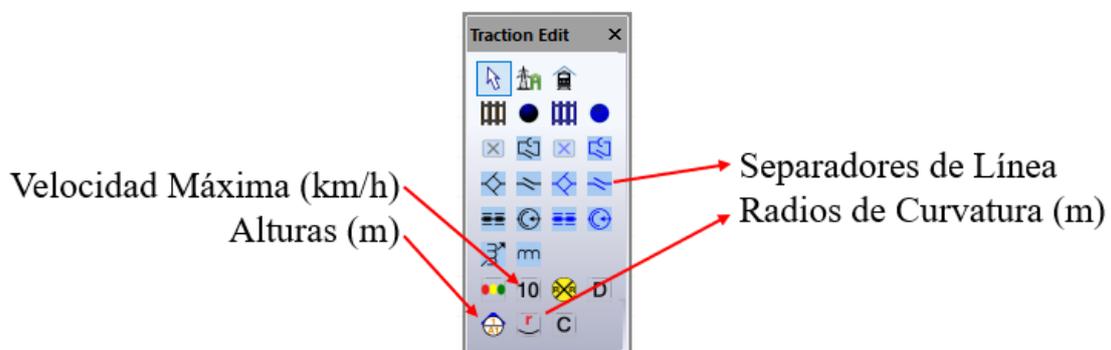


Figura 2.3. Barra de herramientas de la Interfaz Geoespacial de eTrax.
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

Como variable geoespacial principal, se realizó el ingreso del perfil longitudinal de la Línea tomando como referencia el nivel del mar y empezando desde la izquierda como el extremo sur, este perfil se presenta en la **Figura 2.4**.

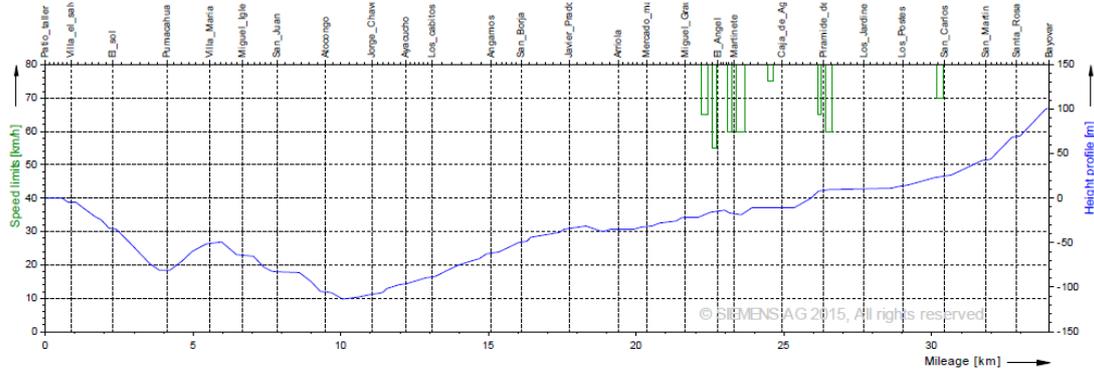


Figura 2.4. Perfil Longitudinal de la Línea 1.

Fuente: SIEMENS y FERROVIAS GyM, “Mejoras infraestructura L1 Metro Lima 01 - ‘Simulación del Sistema Eléctrico,’[17].

Los marcadores de Altura [112], velocidades máximas, radios de curvatura [113] y ubicación de los separadores de Línea [114] fueron parametrizados en función de la posición y se pueden encontrar en orden incremental del PK en el **Anexo 4**.

2.1.2. Características del Sistema Eléctrico

La alimentación de todo el sistema eléctrico de la Línea 1 se realiza mediante tres subestaciones de Alta Tensión (SEATs) las cuales reducen el voltaje de 60kV a 21.6kV para poder así alimentar el anillo de distribución en Media Tensión. Las cargas que están conectadas a este anillo son principalmente las Cabinas (CAB) y Subestaciones de Rectificación (SERs) y los Sistemas Auxiliares (SSAA) dentro de las SERs. En las cabinas se presentan todas las cargas de equipamiento de control y protección del sistema de alimentación de los trenes, mientras que los sistemas Auxiliares se conectan las cargas propias de habilitación urbana como las luminarias, interruptores, escaleras eléctricas, entre otras.

Sin embargo, las cargas principales se presentan en las SERs, ya que mediante estas se realiza el suministro de energía a la Catenaria en DC para la tracción y alimentación de los trenes. En el sistema eléctrico, se presentan 11 SERs distribuidas a lo

largo de todo el recorrido de la Línea, ubicadas en los Puntos Kilométricos (Pk) en la **Tabla 2.2**. Las cargas de los SSAA están ubicadas de igual manera que las SERs.

SER	Pk	SER	Pk
SER 01: PAT	-500	SER 16: MIG	19 872
SER 03: PIN	1 784	SER 20: CAA	24 436
SER 05: VMA	5 074	SER 22: JAR	27 210
SER 08: ATO	8 984	SER 25: SMA	31 331
SER:11: CAB	12 597	SER 27: PMA	33 481
SER 13: CUL	17 239		

Tabla 2.2. Listado de las SERs con sus respectivos Pks y Pis

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: SIEMENS y FERROVIAS GyM, “Mejoras infraestructura L1 Metro Lima 01 - ‘Simulación del Sistema Eléctrico,’

Por el lado de las Cabinas (CABs), se cuenta con dos en los extremos Sur y Norte, CAB 01 y CAB 28, que abastecen las cargas de control del Patio Taller (PAT) y del Patio de Maniobras (PMA) respectivamente y entre ellos, una cabina para cada estación numeradas desde la CAB 02 en la estación VES, hasta la CAB 27 en la estación Bayóvar. En el **Anexo 2**, se ilustra el diagrama de alimentación total con estos cuatro componentes: SEATs, SERs (junto con los SSAA) y las CABs, el cual se muestra también a manera de resumen en la Tabla 2.3 a continuación.

Subestación de Alta Tensión (Punto de Alimentación)	Subestación de Rectificación	Cabinas	Otros
SEAT PAT (Sur)	SER 01 – SER 08 (4 SERs)	CAB 01 – CAB 08 (8 CABs)	Taller de Mantenimiento
SEAT GRAU (Centro)	SER 11 – SER 16 (3 SERs)	CAB 11 – CAB 17 (7 CABs)	-
SEAT PMA (Norte)	SER 20 – SER 27 (4 SERs)	CAB 18 – CAB 28 (11 CABs)	Patio de Maniobras

Tabla 2.3. Configuración de las cargas conectadas a cada SEAT de la Línea 1 en operación nominal

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: **Anexo 2**

Para el análisis y simulación del sistema eléctrico de la Línea 1, se contempla todos los elementos conectados a la Red bajo los tres puntos de alimentación, hasta el consumo en Corriente continua por los mismos trenes. En este modelo del sistema eléctrico se consideraron los puntos de alimentación, transformadores, catenaria, riel de retorno, cableados y cargas auxiliares como de cabinas. Para este modelo se han utilizado como referencia los Diagramas Unifilares presentados en [115] para el sistema en AC y en [17] para el sistema en DC.

2.1.2.1.Puntos de Alimentación

Los puntos de Alimentación componen la Red de Alta Tensión y son alimentados por las empresas distribuidoras, Luz del Sur (SEAT PAT) y Edelnor (SEAT GRAU y SEAT PMA). La alimentación se da en 60 kVAC y se transforma mediante dos Transformadores en paralelo a una tensión de 21.6 kVAC formando así la Red y el Anillo en Media Tensión. Para la Alimentación de toda la Red en los tres puntos mencionados, las corrientes de cortocircuito trifásicas ($I_{cc\ 3f}$) y la relación de impedancias para cada SEAT consideradas son las siguientes:

SEAT	SE (SEIN)	$I_{cc\ 3f}$ (kA)	X/R
PAT	SE Mirador (<i>Ex Jicamarca</i>)	50.0 [116]	10[115]
GRAU	SE Santa Rosa	21.1 [117]	10[115]
PMA	SE San Juan	20.9 [117]	10[115]

Tabla 2.4. Corrientes de Cortocircuito y relación de impedancias para la simulación las Subestaciones de Alimentación.

Fuente: Elaboración Propia.

Esta información se ingresó en la plataforma (*One Line Diagram*), siendo calculada el resto de las variables automáticamente por el Software, como se muestra en la **Figura 2.5** para el caso de la SE Mirador.

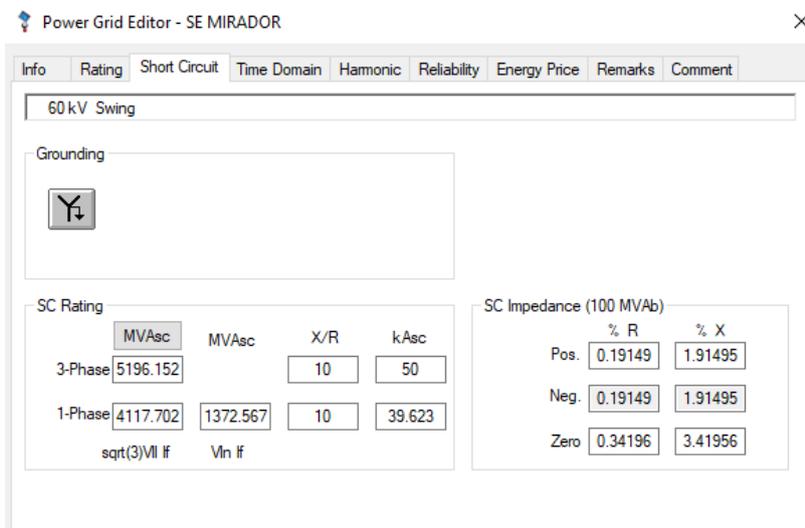


Figura 2.5. Ingreso de Variables de los puntos de Alimentación en el software eTrax.

Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

2.1.2.2. Transformadores

En el sistema eléctrico se presentan 4 tipos de transformadores, de los cuales 3 son de dos devanados para la red de alta tensión, para las CABs y los SSAAs; y 1 transformador es de tres devanados para el sistema de rectificación. A continuación, se describen las características y parámetros considerados a ingresar en el software eTrax de estos componentes.

2.1.2.2.1. Transformadores de Cabinas

Los transformadores de las 28 Cabinas de la Línea 1, se ingresaron bajo el elemento de Transformador de dos devanados. En cada Cabina, se configuró un solo transformador ya que, si bien se cuentan con dos transformadores conectados en paralelo, sólo uno está en operación permanente. Se utilizó un valor de impedancia por unidad (%Z) del 6%, bajo un arreglo Dyn11 según [115] y una relación X/R utilizando los valores típicos de un transformador de tales potencias según la Librería de ETAP. Los valores de este tipo de transformadores se ingresaron como se muestra en la **Figura 2.6** para el caso de la CAB 01 con una Potencia de 1000 kVA con una Relación de Transformación (RT) de 21.0 a 0.4 kV.

The screenshot displays the configuration window for a transformer in the eTrax software. The window has several tabs: Info, Rating, Impedance, Tap, Grounding, Sizing, Protection, and Harmonic. The 'Rating' tab is active. The main configuration area is divided into several sections:

- General Info:** 100 kVA, IEC, Liquid-Fill, Other 65 C, 21 0.4 kV.
- Voltage Rating:** Primary (Prim.) is 21 kV, Secondary (Sec.) is 0.4 kV. FLA (Full Load Amps) is 2.749 for the primary and 144.3 for the secondary. Nominal Bus kV is 21.6 for the primary and 0.4 for the secondary. Other 65 is also indicated.
- Power Rating:** Rated power is 100 kVA. Derated power is 62.83 kVA. % Derating is 37.2.
- Z Base:** kVA is 100.
- Alert - Max:** kVA is 62.83. The 'Derated KVA' radio button is selected.
- Installation:** Altitude is 3300 m. Ambient Temp. is 30 °C.
- MFR:** Manufacturer field is empty.

The screenshot shows the 'Impedance' and 'Z Base' input fields in the ETAP software. The 'Impedance' section has two rows: 'Positive' and 'Zero'. Each row has five input fields for the following parameters: %Z, X/R, R/X, %X, and %R. The values entered are: Positive (%Z: 6, X/R: 3.5, R/X: 0.286, %X: 5.769, %R: 1.648) and Zero (%Z: 6, X/R: 3.5, R/X: 0.286, %X: 5.769, %R: 1.648). Below these are two buttons: 'Typical Z & X/R' and 'Typical X/R'. The 'Z Base' section has a 'kVA' input field with the value '1000' and a radio button labeled 'Other 65'.

Figura 2.6. Ingreso de parámetros eléctricos de los Transformadores de la CAB 01 en el software ETAP
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

Para las demás Cabinas, los valores de Potencia y RT para la simulación fueron los que se presentan en la **Tabla 2.5**.

Cabinas	Potencia (kVA)	RT
CAB PAT / VES	3 x 1000	21 / 0.40 kV
CAB PIN a CAB ATO	160	21 / 0.40 kV
CAB JCH a CAB SBS y CAB NAR	160	21 / 0.38 kV
CAB CUL y CAB GAM a CAB SRO	250	21 / 0.38 kV
CAB BAY	315	21 / 0.38 kV
CAB PMA	2 x 500	21 / 0.38 kV

Tabla 2.5. Parámetros de Potencia y RT para las Cabinas

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: Siemens 2017, “Mejoras Infraestructura L1- Metro Lima AC”[115]

2.1.2.2.2. Transformadores de Sistemas Auxiliares

Para el caso de los Transformadores de los SSAAs, la metodología de ingreso de las variables fue la misma que la presentada para las Cabinas. En este caso, la potencia nominal de todos los transformadores fue de 100 kVA con una impedancia por unidad del 6% y una relación X/R de 1.5 según los valores típicos de la librería ETAP. Las RTs consideradas variaron dependiendo de la SER: Para las SER ubicadas entre PMA VES hasta ATO, la RT fue de 21.0 a 0.4kV, mientras que para las SER ubicadas entre CAB y BAY, la RT varió de 21.06 a 0.38 kV [115].

2.1.2.2.3. Transformadores de Alta Tensión

Los parámetros de los transformadores de Alta Tensión ubicados en las tres SEATs fueron obtenidos de las Pruebas FAT realizadas en [118] para los Transformadores ubicados en la SEAT PAT. En este informe, se destaca que la Potencia nominal del Transformador es de 20 MVA con una RT de 60.0 a 21.6 kV, una impedancia de cortocircuito del 10.031% a 28.5°C y un valor de 20 para la relación X/R según la

librería de ETAP. La configuración del Transformador es bajo el arreglo Yd11 y está diseñado como un transformador húmedo de aceite tipo ONAN 65°. Estos parámetros han sido ingresados en el software ETAP de la forma como se muestra en la **Figura 2.7**.

The figure displays two screenshots of the ETAP software interface for configuring a transformer. The top screenshot shows the 'Rating' tab, and the bottom screenshot shows the 'Impedance' tab.

Rating Tab Parameters:

- Transformer: 20 MVA IEC Liquid-Fill ONAN 65 C
- Primary Voltage: 60 kV
- Secondary Voltage: 21.6 kV
- FLA: 192.5
- Nominal Bus kV: 60
- ONAN 65
- Rated Power: 20 MVA
- Derated Power: 12.82 MVA
- % Derating: 35.9
- Alert - Max: 12.82 MVA
- Installation: 3300 m Altitude, 28 °C Ambient Temp.
- Type / Class: Liquid-Fill, Other, ONAN, 65 Temp. Rise

Impedance Tab Parameters:

	%Z	X/R	R/X	%X	%R
Positive	10.031	20	0.05	10.018	0.501
Zero	10.031	20	0.05	10.018	0.501

Z Base: 20 MVA, ONAN 65

Figura 2.7. Ingreso de Variables para los Transformadores de Alta Tensión
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

Para efectos de la simulación eléctrica estos valores fueron considerados similares para el caso de los transformadores en la SEAT GRAU y en la SEAT BAY, considerando la aplicación de dos transformadores conectados permanentemente en paralelo.

2.1.2.2.4. Transformadores de Rectificación

Para el ingreso de las variables de los transformadores de Rectificación, se utilizó como referencia los Diagramas Unifilares de las Subestaciones de Rectificadoras presentes en [45] y la Simulación del sistema eléctrico en DC presente en [17]. Los Transformadores de tres devanados se ubican en las SERs con arreglos de (+7.5) d0y11 y de (-7.5) d0y11, con el objetivo de lograr un desfase de 15° entre las ondas inyectadas a los rectificadores. Estos transformadores cuentan con una potencia nominal de 3800 kVA, una RT de 21.6 a 1.18 kV y una impedancia de cortocircuito (%Z) de 8% para el bobinado primario y de 12.8% para los secundarios, considerando como el factor de impedancias X/R igual a 10. En cuanto a su fabricación, los transformadores de rectificación son de tipo bobina fundida (*cast coil*) y son de tipo OA/FA según [119].

Para el ingreso de estas variables al Software ETAP, se utilizó el módulo de transformadores de tres devanados y se incluyeron los valores presentados de manera similar para todos los Transformadores de Rectificación de la Línea 1, como se muestra en la **Figura 2.8**.

Info	Rating	Impedance	Tap	Grounding	Protection	Hamonic
3800	3800	3800 kVA OA/FA				21.6 1.18 1.18 kV

Rating				Connected Bus	
	kV	kVA	Max kVA	FLA	Nom. kV
Prim.	21.6	3800	3800	101.6	21.6
Sec.	1.18	3800	3800	1859	1.18
Ter.	1.18	3800	3800	1859	1.18

Type / Class			
Type	Class	BIL	Temp.
Cast-Coil	OA/FA	0	65

Info	Rating	Impedance	Tap	Grounding	Protection	Hamonic
3800	3800	3800 kVA OA/FA				21.6 1.18 1.18 kV

	Positive		Zero		kVA Base
	% Z	X/R	% Z	X/R	
PS	8	10	8	10	3800
PT	12.8	10	12.8	10	3800
ST	12.8	10	12.8	10	3800

Z Variation	
@ - 5 % Tap	0 %
@ + 5 % Tap	0 %

Figura 2.8. Ingreso de Variables en el software ETAP para los transformadores de rectificación
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

2.1.2.3.Rectificadores

Los rectificadores utilizados para la simulación fueron ingresados al software como bloques de Rectificación Incontrolado, ya que se basan en una rectificación por diodos con un número de 6 pulsos. Para el ingreso al software de este componente, como primer paso se utilizó la librería o “Warehouse” de ETAP, en donde como valores principales se añadió la curva de regulación y los parámetros de Potencia (4575.2 kVA), Voltaje (1500V) y Eficiencia (99%), restringiendo sus características a un voltaje de operación en DC máximo de +10% y -10% con respecto al nominal (1500V). El ingreso de estas variables se muestra en la **Figura 2.9** [17].

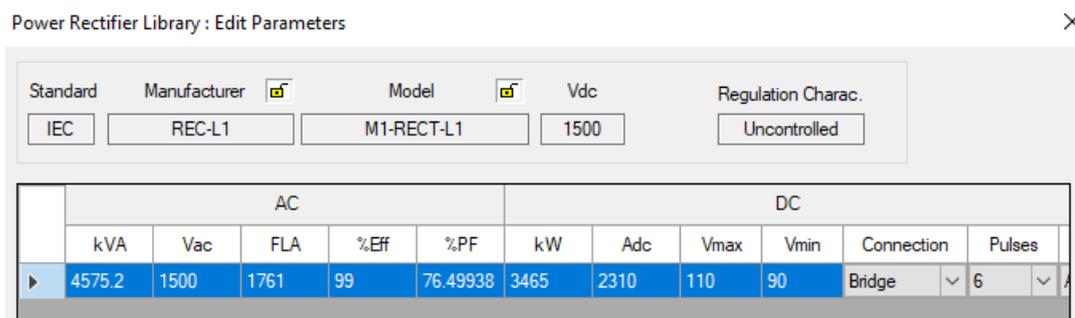


Figura 2.9. Ingreso de parámetros eléctricos del Grupo Rectificador en el Software ETAP
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

Para el ingreso de la curva de regulación del Rectificador (V-I), se parametrizaron los valores de corriente y voltaje que se presentan en [17] bajo una potencia de cortocircuito de 115 MVA y estos se ingresaron punto por punto de manera individual, logrando la curva presentada en la **Figura 2.10**. En el diagrama unifilar se ingresó el componente como Rectificador y se utilizó como referencia el modelo creado de la Librería. Este mismo modelo, se utilizó para ingresar los grupos de rectificación a lo largo de toda la Línea (2 por cada SER).

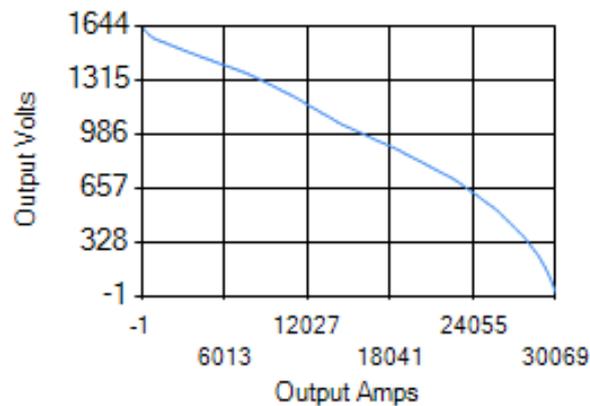


Figura 2.10. Curva (V-I) de los Grupos de Rectificación para una Potencia de CC de 115MVA
Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de SIEMENS y FERROVÍAS GyM, “Mejoras infraestructura L1 Metro Lima 01 - ‘Simulación del Sistema Eléctrico,’[17]. Software ETAP 20.0.4

2.1.2.4.Cargas

Las cargas, tanto de las Cabinas como de los servicios auxiliares, se consideraron como cargas estáticas, distribuidas en cada punto de carga según el tipo. Para ambos tipos de cargas se utilizaron como base las potencias y factores de potencia utilizados en [115].

2.1.2.4.1. Cabinas (CAB)

Se consideraron las 28 Cabinas presentes a lo largo de Línea, siendo las de los extremos (CAB 01 y CAB 28), las correspondientes al Patio Taller y al Patio de Maniobras respectivamente, mientras que las cabinas CAB 02 hasta la CAB 27, son las referidas a las estaciones de pasajeros desde VES hasta BAY. Por ejemplo, para el caso de la CAB 02 con una carga “C1 VES”, la potencia ingresada en el software fue de 1x186 kVA, con un factor de potencia (fdp) de 0.9 a una tensión de 0.4 kV como se muestra en la **Figura 2.11**. De esta misma manera, se ingresaron las cargas vinculadas para todas las Cabinas del Sistema Eléctrico con las variables presentadas en el **Anexo 5**, siendo el fdp el mismo para todos los casos con un valor de 0.9.

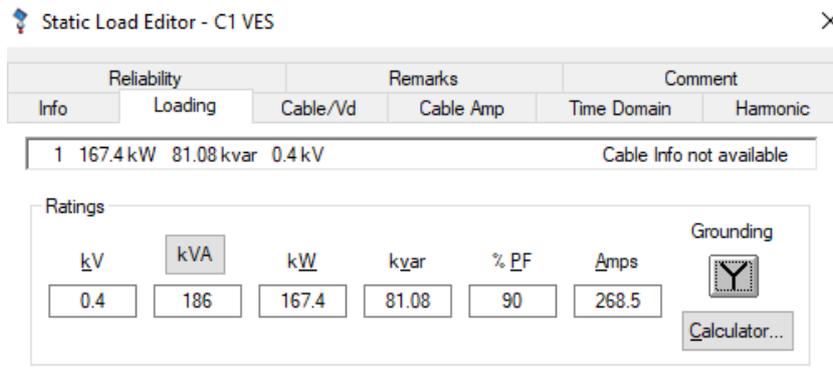


Figura 2.11. Ingreso de los parámetros a ingresar de las cargas de las CABs
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

2.1.2.7.1. Servicios Auxiliares (SSAA)

Para el caso de los Servicios Auxiliares, estos se presentan para cada SER de la Línea 1, desde la SER 01 hasta la SER 11. El ingreso de este tipo de cargas se realizó bajo la misma nomenclatura que las Cargas para las cabinas, pero con diferentes potencias, factores de potencias y voltajes. Los valores considerados para cada carga de SSAA se muestran en la **Tabla 2.6** y fueron ingresados en el Software de manera similar a como se muestra en la **Figura 2.6** para Cabinas.

Carga de SSAA	Potencia (kVA)	Factor de Potencia (fdp)	Voltaje (kV)
De SER 01 a SER 08	100	0.9	0.40
De SER 11 a SER 27	100	0.9	0.38

Tabla 2.6. Parámetros para considerar para las cargas de los SSAA de las distintas SERs
Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: Siemens 2017, “Mejoras Infraestructura L1- Metro Lima AC”[115].

2.1.2.5. Cableado

Para la simulación se consideraron 5 tipos de cables de cobre (Cu) sin considerar la Catenaria ni el Riel de Retorno. Estos 5 son de distintos calibres y longitudes que varían según la ubicación en la Red. Para su ingreso al software de simulación, se optó por utilizar cableado con aislamiento XLPE según la metodología empleada en [115], así como los voltajes de operación de 23kV y valores de impedancias a una temperatura base de 50°C a una frecuencia de 60Hz, presentados en la **Tabla 2.7**.

Tipo de Cable	# / Cable	R (Ohm/km)	X (Ohm/km)	R₀ (Ohm/km)	X₀ (Ohm/km)
Cu 70 mm ² en Aire	1 x 3/C	0.271	0.138	1.299	0.553
Cu 240 mm ² en Aire	1 x 3/C	0.081	0.113	0.765	0.291
Cu 240 mm ² en Tierra	2 x 3/C	0.081	0.113	0.765	0.291
Cu 300 mm ² en Aire	1 x 3/C	0.066	0.110	0.738	0.289

Tabla 2.7. Impedancias utilizadas para el dimensionamiento de los tipos de cables AC empleados
Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: Siemens 2017, “Mejoras Infraestructura L1- Metro Lima AC”[115]

El ingreso de las variables al software eTrax para cada tipo de cable fue como se muestra en la **Figura 2.12**, en donde se utilizó como ejemplo el cableado entre la SER 01 y la CAB01. Se realizó el mismo procedimiento para los 4 tipos de cables de Corriente alterna diferenciando los valores de impedancias por unidad de kilómetro ya mencionadas. En el

Anexo 6 se presentan los tipos de cables que se encuentran activos en la Red de la Línea 1 con su respectiva longitud y puntos de conexión.

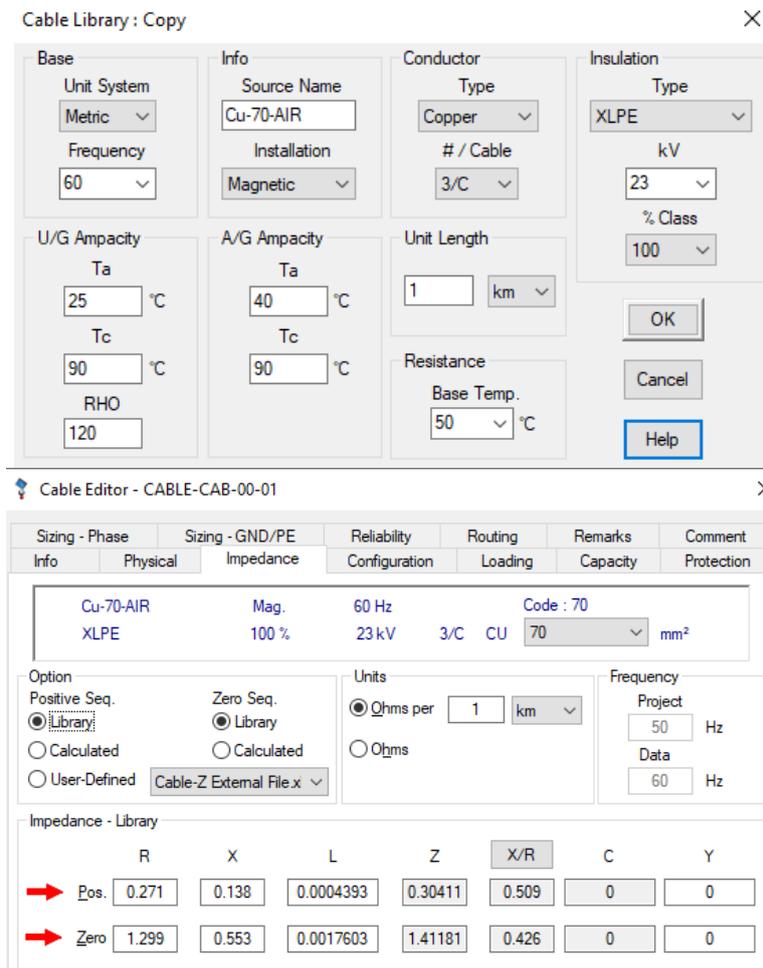


Figura 2.12. Ingreso de variables del Cableado Cu 70 mm² en Aire entre cabinas CAB01 y CAB02 el Software ETAP.

Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

Para el caso del 5to cableado denominado “Cableado DC”, se utilizaron las variables para su dimensionamiento según lo indicado en [17], en donde cumplen la función de alimentar la catenaria:

- Tipo 500 mm² Cu
- Resistencia DC (a 20°C) 36 mΩ / km
- Aislamiento XLPE
- Número y longitud de Cable 6 x 150 metros

Estos valores fueron ingresados en la plataforma de ETAP mediante el bloque de Cable DC utilizando el modelo de cableado BS5467 de la librería de ETAP. La única

configuración adicional fue la corrección del valor de la resistencia en DC a $36 \text{ m}\Omega / \text{km}$, según lo indicado anteriormente. El ingreso de estas variables al software se puede verificar en la **Figura 2.13**, en donde se detalla que se utilizó la misma configuración para todos los puntos de alimentación de la Línea 1.

Sizing - Phase	Sizing - GND/PE	Routing	Remarks	Comment		
Info	Physical	Impedance	Configuration	Loading	Capacity	Protection
BS5467	Non-Mag.	50 Hz	Code : 500			
XLPE	100 %	3.3 kV	1/C CU	500	mm ²	
Order of Layers: Conductor, Insulation, Shield/Screen, Sheath, Amor, and Jacket						
Dimensions						
Conductor Construction	ConRnd	Diameter	2.523	cm		
Insulation	XLPE	Thickness	2.2	mm		
		Max Stress		V/mm		
Shield/Screen	Not Shielded					
Amor	Aluminum Amor	Diameter	2	mm		
Sheath	None					
Amor / Sheath Grounding	Open	Max Induced		V/m		
Jacket	PVC	Thickness	2.1	mm		
Cable	BS5467	Diameter	4.11	cm		
DC Resistance						
Rdc	36	micro Ohms per meter				
Cable Pulling						
Weight	5625	kg/km	Max.Tension	7.2	kg/mm2	Max.Sidewall
						670
						kg/m

Figura 2.13. Ingreso de variables del Cableado DC en el Software ETAP.
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

2.1.2.6.Catenaria

La Catenaria o el hilo de Alimentación de los trenes, está alimentada y seccionada en los intervalos entre cada SER. Esta catenaria está formada por dos hilos, el sustentador y el de contacto mismo, los cuales cuentan con las siguientes características según [17]:

- Hilo de Contacto 2 x Ri 100 mm² Cu
- Cable Sustentador 2 x 120 mm² Cu
- Resistencia Eléctrica a 60°C 52 mΩ / km

Para el ingreso de estas variables, en el software solo se consideró la resistencia eléctrica equivalente presentada, debido a que no se requerían mayor detalle para su simulación.

2.1.2.7.Riel de Retorno

El riel de retorno forma parte del polo negativo de los Trenes circulando en la vía, por lo que a través de este circula la corriente de tracción luego de alimentar cada Tren y poder ser retornada al punto negativo del cable DC de vuelta al grupo rectificador. Este elemento cuenta con una Resistencia Eléctrica de 17.5 mΩ / km a una temperatura de 60°C [17].

Para el ingreso de estos valores al Software eTrax, se seleccionaron los tramos de la catenaria en la vista de Unifilar y se completaron los valores como se muestra en la **Figura 2.14**, en donde la lista del lado izquierdo representa la Catenaria (“Line Z”) y la del lado derecho la del Riel de Retorno (“Track”). Estos valores fueron considerados a lo largo de todo el tramo de la Línea 1 ya que son valores dados en por unidad de kilómetro.

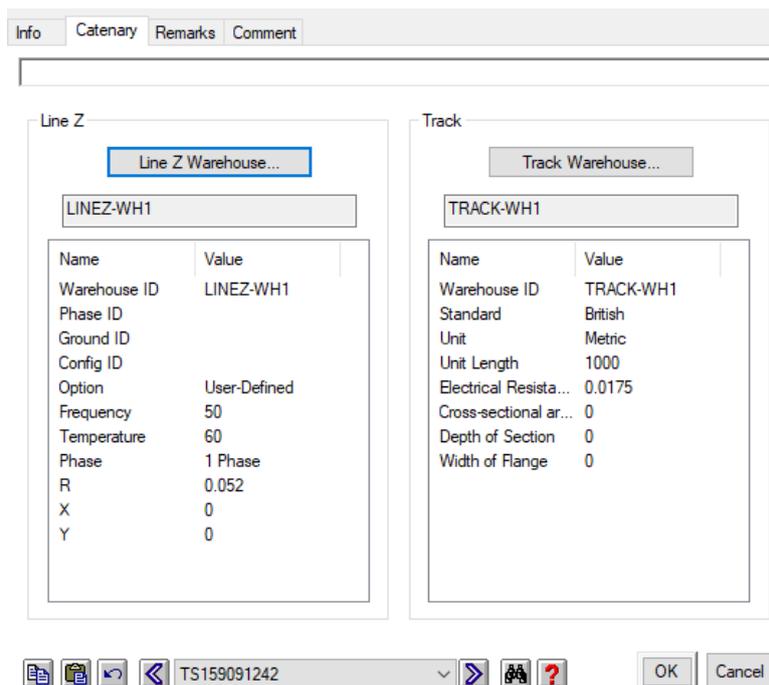


Figura 2.14. Ingreso de los parámetros de la Catenaria y Riel de Retorno en los segmentos de la Línea 1
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0

2.1.3. Características del Material Rodante

Si bien en la flota actual de la Línea 1 se utilizan los trenes y vagones de la marca Ansaldo Breda, los Trenes Alstom Metr poli Serie 9000 son los más utilizados al ser más modernos y contar con 39 ejemplares en operación, por lo que cuentan con prioridad durante su operación. Para efectos del estudio, solo se utilizará el modelo de trenes Alstom Metr poli Serie 9000 descritos en los siguientes párrafos [54], [120].

Los trenes Alstom son conformados por 5 tipos de coches, Ma1, Ma2, R, Mb1 y Mb2 que, desde el punto de vista eléctrico, para traccionar y regenerar cuentan con equipos y funciones distintas. El diagrama unifilar del sistema eléctrico del Tren en composición de los coches mencionados se encuentra en el **Anexo 3**.

- **Ma1 y Ma2:** Son los coches ubicados en los extremos, los cuales poseen 4 motores en los 4 ejes que cuentan.
- **Mb1 y Mb2:** Son los coches intermedios, cuentan con 4 motores y con 2 pantógrafos para la alimentación en contacto con la catenaria.
- **R:** Coche central que cumple la función de remolque en donde se presentan las baterías para los servicios auxiliares de cada tren.

Como se muestra en la **Figura 2.15**, anteriormente el tren presentado en la parte superior con 5 vagones fue modificado añadiéndole un vagón del modelo Mb1 en el medio, operando ahora con 6 vagones y cubriendo toda la plataforma de embarque en las estaciones.

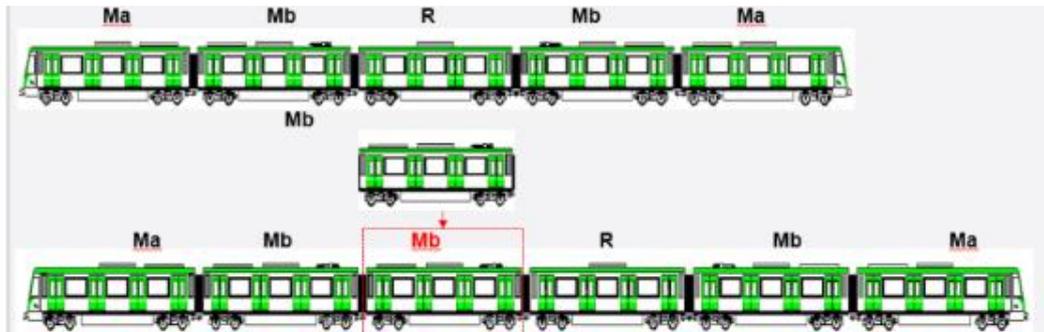


Figura 2.15. Variación de la flota de coches Alstom Metròpoli S9000 de la Línea 1.
Fuente: AATE, “Descripción histórica del proyecto ‘Línea 1 del Metro de Lima’”

Bajo una configuración de 6 vagones (T6), las características de estos trenes se presentan en la siguiente lista [17]:

- Tensión (Mínima / Nominal / Máxima) 1000 / 1500 / 1900 VDC
- Peso sin pasajeros (Tara) 189.275 ton (6 vagones)
- Porción rotatoria de en (Tara) 15.2 %
- Velocidad máxima 80 km/h
- Aceleración Máxima 1.1 m/s²
- Desaceleración Máxima 1.2 m/s²
- Anchura 2.719 m
- Altura 3.859 m
- Coeficiente A 0.0027 kN/ton
- Coeficiente B 0.000147 kN/ton*(hr/km)
- Coeficiente C 7.69E-05 kN/ton*(hr/km)²
- Área Transversal 10.16 m²
- Radio de rueda nueva 0.840 m
- Radio de rueda a medio desgaste 0.805 m
- Radio de rueda desgastada 0.770 m

Al ser estas características generales tanto de los coches Ma, Mb y R, se ingresaron en el software de eTrax según como se indica en las Gráficas (a), (c) y (d) de la **Figura 2.16**.

▼ Auxiliary	
Make	
Type	
Phase	
Voltage	440
Power	100
▼ Bogie	
Drive Arrangement	
Design	
Number of Axles	2
▼ Brakes	
Loco	
Train	
Regenerative	Yes
▼ General	
Line Voltage	1.5
Weight	45.08
Adhesive Weight	6.852
Max Axle Load	10
Min Axle Load	10

Line Voltage
KV

(a)

Min Axle Load	10
Length	17.308
Width	2.719
Height	3.859
▼ Rating - 1 Hour	(...)
Power	3000
P.S.	3000
Tractive Effort	320
Speed	80
Max Tractive Effort	320
Max Speed	80
Efficiency	82.45
▼ Continuous Rating	(...)
Power	3000
P.S.	3000
Voltage	1.5
Current	2806
Tractive Effort	66
Speed	80
Max Tractive Effort	66

Train Current Limitation
Train Current Limitation

(b)

Max Speed	80
Efficiency	82.45
▼ Continuous Rating	(...)
Power	3000
P.S.	3000
Voltage	1.5
Current	2806
Tractive Effort	66
Speed	80
Max Tractive Effort	66
Max Speed	80
Efficiency	82.45
▼ Train Current Limitation	(...)
Maximum Train Current	2806
Maximum Regenerative Cu	3480
Knee Point Factor (a)	0.9
Umax1	130
Umax2	130
Umin1	66
Umin2	66

Rating - 1 Hour
Rating - 1 Hour

(c)

▼ Resistance Coefficients	(...)
Cross Sectional Area (a)	10.16
A	1.464
A1	0
A2	0
B	0.000505
B1	0
C	9.338E-05
▼ Wheel Diameter	(...)
New	0.84
Half Worn	0.805
Full Worn	0.77
Cross Sectional Area (A)	7
▼ Inverter	
Rated Voltage	3300
Rated kVA	
Current Limit	3000
Number of Pulses	6
Ma	
Quantity	1

Height
m

(d)

Make	
Type	
> Protective Devices	
▼ Rectifier-Inverter Motor Control	
Volt/hertz 1	
Volt/hertz 2	
Frequency 1	
Frequency 2	
▼ Traction Motors	
Make	Inducción
Type	Jaula de Ardilla
Quantity	2
Insulation	
Suspension	
Ventilation	Natural
Pole Pairs	4
Rated Frequency	70.8
▼ Rating - 1 Hour	(...)
Power	155
Voltage	1.169

Cross Sectional Area (A)
Sq.meters

(e)

Quantity	2
Insulation	
Suspension	
Ventilation	Natural
Pole Pairs	4
Rated Frequency	70.8
▼ Rating - 1 Hour	(...)
Power	155
Voltage	1.169
Current	96.8
Speed	3660
SF	0
▼ Rating - Continuous	(...)
Power	155
Voltage	1.169
KVA	0
Current	96.8
Speed	3660
Gear Ratio	6.9547
SF	0

Volt/hertz 1

(f)

Figura 2.16. Ingreso de las Variables a utilizar en el Software eTrax de ETAP para los coches Ma y Mb
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

2.1.3.1. Coches Ma y Mb

En la **Tabla 2.8** se muestran las longitudes y las cargas (en toneladas) que cada vagón cuenta, considerando una configuración de 6 vagones por tren (T6).

Característica	Ma1	Mb1	Mb3 ²	R	Mb2	Ma2	Total (T6)
Longitud (m)	18.090	16.788	16.788	16.338	16.788	18.090	102.88
Carga: AW3 (ton)	44.91	45.84	45.84	43.93	45.78	44.87	271.17

Tabla 2.8. Características de Longitud y carga de los coches Alstom Metrópoli S9000

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de:[121][122]

Para el ingreso los valores de los coches de tracción (Ma y Mb) bajo la configuración de 6 vagones por tren (T6), se utilizó el promedio de las cargas bajo el tipo de carga AW3 (6 per/m²) resultando en un valor de 45.08 ton/locomotora, así como también para las distancias de cada vagón (17.308 m/locomotora). Esto se debió que el programa solo permite utilizar un tipo de Locomotora de Tracción para la configuración. Adicionalmente, según [123], las cargas de los servicios auxiliares dentro de los trenes fueron modeladas bajo una carga total de 100 kVA en una tensión de 440 VAC. Estos valores se ingresaron el software como se muestra en la gráfica (a) y (b) de la **Figura 2.16**.

- Motores de Inducción

Cada tren de 6 vagones cuenta con un total de 20 motores de tracción distribuidos entre los coches Ma y Mb. El modelo de estos motores es 4LCA 2132 (jaula de ardilla) de la marca Alstom y se montan transversalmente a la traviesa del bastidor del bogie intercalando de lado [122]. Las características del motor se encuentran descritas en el siguiente listado.

- Tipo Asíncrono con Jaula de Ardilla
- Número de Polos 4
- Potencia Nominal 155 kW

² Bajo la configuración de 6 vagones por tren (T6), el coche Mb3 es el mismo modelo que el coche Mb1, pero se considera separado para la diferenciación en el orden de agrupamiento.

○ Voltaje (F-N / F-F) ³	675 / 1169 V
○ Corriente Nominal	96.80 A
○ Ratio de Engranajes	6.9547
○ Par máximo en Arranque	1080 Nm
○ Par máximo en Frenado	1204 Nm
○ Rango de Velocidad (rpm) con rueda nueva (Ø 840)	0 a 3660 rpm (70.8 Hz)
○ Eficiencia Motor / Convertidor	0.85
○ Eficiencia Caja de Engranajes	0.97

Estas variables fueron ingresadas tanto para las operaciones de 1 hora como de manera continua, según como se muestra en las gráficas (e) y (f) de la **Figura 2.16**.

- **Limitación de Corriente**

Dadas las características de la Línea 1, se añadió también la restricción del 60% a la corriente máxima de tracción sobre la limitación de corriente con la que cada tren cuenta bajo una configuración T6 [121]. Esta limitación se describe únicamente en la corriente de tracción para cada tren como se puede ver en la **Figura 2.17**, mientras que no se presentan en el caso del Frenado. En esta se identifica que la corriente máxima de tracción de 2850 A, se limita a 1684A (60%) bajo un voltaje mínimo de línea de 1000V.

³ F-N: Voltaje Fase-Neutro; F-F: Voltaje Fase-Fase

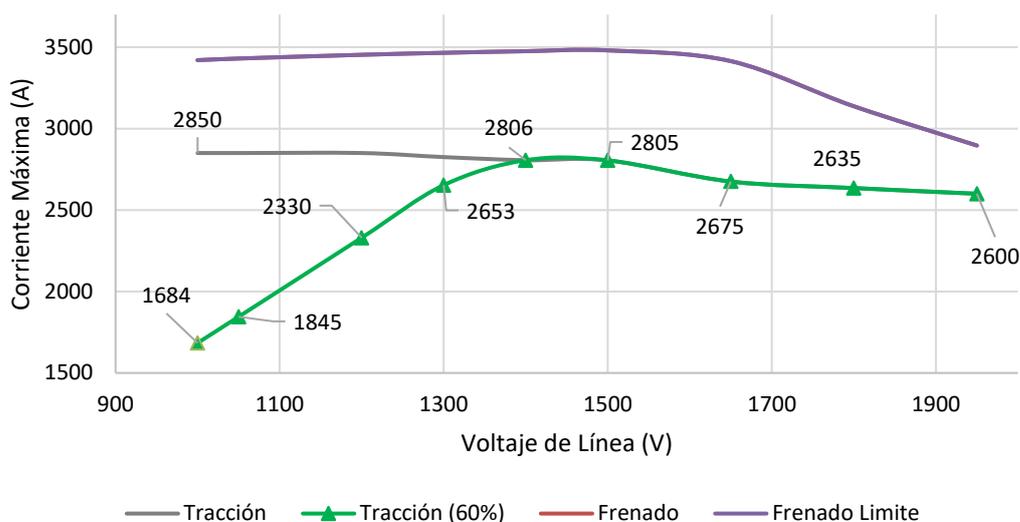


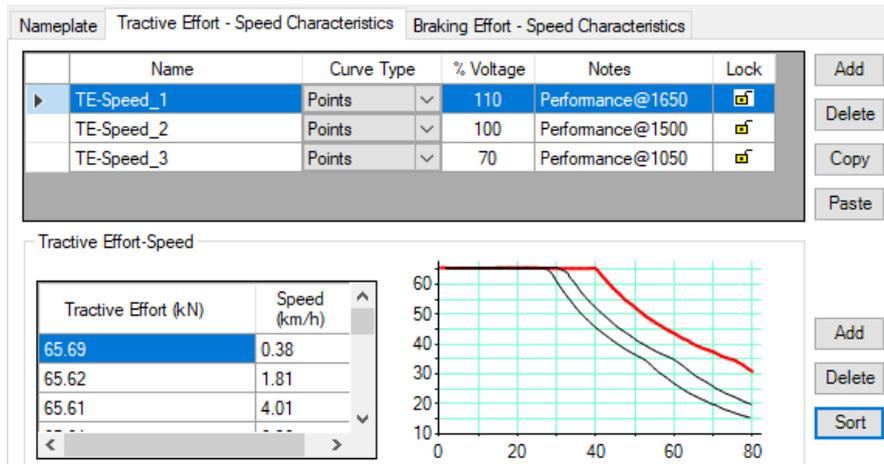
Figura 2.17. Curva de limitación de corriente para los trenes Alstom Metrópoli S9000
Fuente: Elaboración propia. Adaptado de: Alstom, “Metro Lima Extension : Material Rodante,” Lima, Perú, 2015 [121].

El ingreso de los valores de limitación de corriente se puede verificar en la gráfica (c) de la **Figura 2.16**, considerando los voltajes mínimos y máximos de operación tanto tracción como de frenado son del 66% (1000V) y del 130%(1950V), de la tensión nominal.

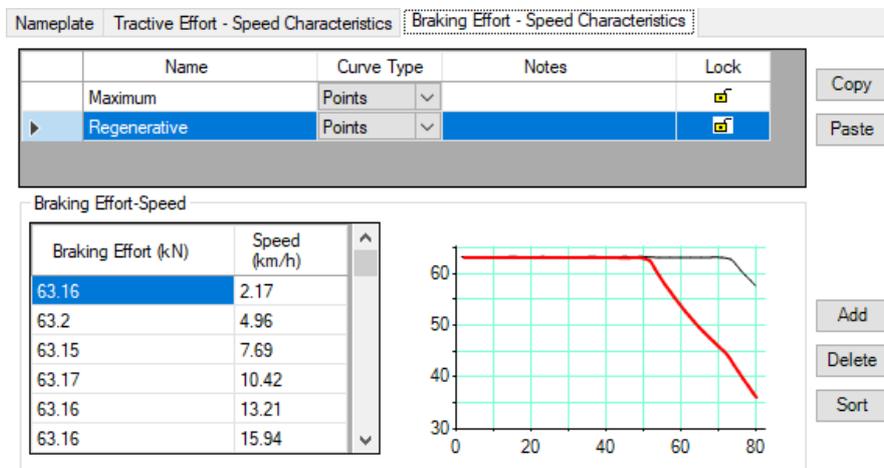
A continuación, se presenta el conjunto de capturas de pantalla, donde se muestra el ingreso de los parámetros generales del material rodante para los coches Ma y Mb en el software eTrax de ETAP.

- **Curvas de Esfuerzo**

Para el caso de las curvas de tracción y regeneración para cada coche Ma y Mb, se parametrizó la curva dada en [16] y se consideró que cada locomotora contaba con la mismas curvas de tracción, que se presentan para los voltajes al 70%, 100% y 110% del nominal (1500V). En cuanto a la regeneración se ingresaron las curvas para los valores del frenado máximo y del frenado máximo regenerativo de manera similar que las de tracción. Ambas curvas fueron ingresadas en el software como se presentan en las gráficas (a), para tracción, y (b), para frenado, de la **Figura 2.18**.



(a)



(b)

Figura 2.18. Ingreso de curvas de Esfuerzo (kN)-Velocidad (km/h) de los coches Ma y Mb para: (a) Tracción; (b) Frenado en el Software eTrax de ETAP

Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

- Intervalo de Voltajes de la Catenaria para del Freno Regenerativo

El umbral de voltaje enmarca el intervalo de operación al que este parámetro se tiene que presentar para la correcta alimentación. Según Norma UNE EN 50163:2004 los valores permisibles para Alimentaciones en Baja Tensión de Catenarias de 1500 VDC no pueden sobrepasar el límite inferior de 1050 VDC y el límite superior de 1800 VDC. En cuanto al frenado regenerativo, se aplica en el Intervalo en el que la Tensión oscila entre 1500 VDC y 1650 VDC, mientras que el frenado reostático, como alternativa final, entre 1650 VDC y 1800 VDC [22]. Esta característica de operación resulta en un rango de voltaje aprovechable por el frenado regenerativo a un 110% de 1500 VDC, el cual se

ingresa dentro de la primera fila de la viñeta de eTrax, en la ventana de Preferencias, como se muestra en la **Figura 2.19**.

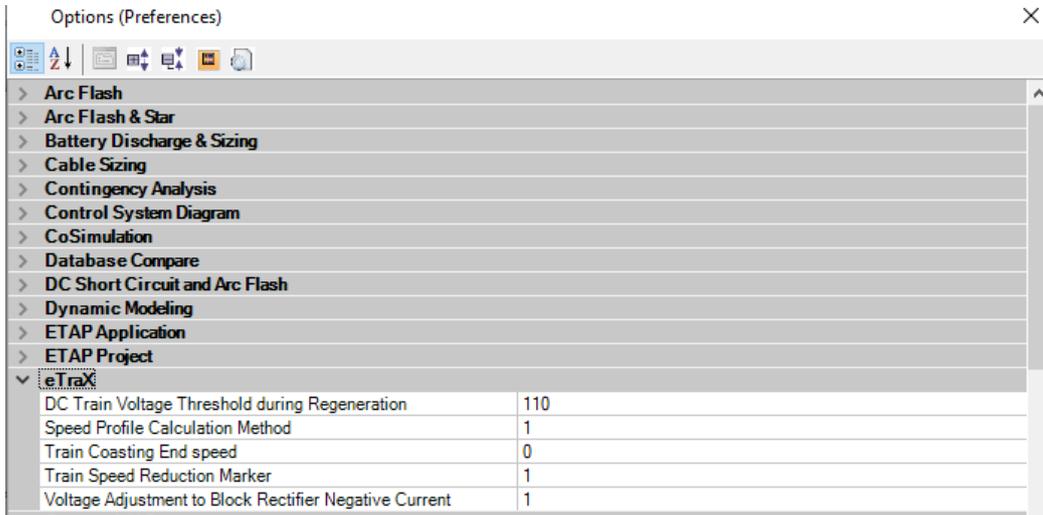


Figura 2.19. Ingreso del voltaje máximo aprovechable por el frenado regenerativo en el software ETAP
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

2.1.3.2. Coches R

Para el caso de los vagones denominados “R”, el modelo de vagón ingresado al software fue el de tipo “Pasajero”, por lo que solo se requerían valores sobre el dimensionamiento, carga y coeficientes de resistencia que fueron obtenidos de [17]. Estos valores fueron ingresados como se muestra en la **Figura 2.20**.

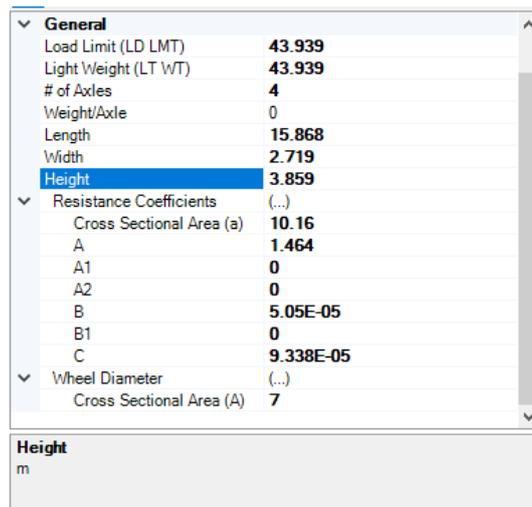


Figura 2.20. Ingreso de parámetros de dimensionamiento, carga y coeficientes de resistencia de los coches tipo R en el software eTrax de ETAP
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

2.1.3.3. Configuración de Trenes T6

Para la configuración de los trenes y el establecimiento del orden correcto, se optó por denominar a los trenes Alstom Metr poli S9000 con 3 vagones tipo Ma y Mb iniciales, 1 de tipo R intermedio y 2 del tipo Ma y Mb finales. Esta configuración se ingresó en la ventana eTrax Editor como se muestra en la **Figura 2.21**, bajo una condición de carga del 100%

Active	Type	Configuratio	Acceleration Limit (m/s ²)	Deceleration Limit (m/s ²)
<input checked="" type="checkbox"/>	Passenger	T6-1	1.1	1.2

Order	Quantity	Type	Manufacturer	Model	Weight	% Loaded	Length	Library
1	3	Locomotive	AlstomMS9000	MaYMb	45.08	100	17.308	...
2	1	Passenger	AlstomMS9000	R	43.939	100	15.868	...
3	2	Locomotive	AlstomMS9000	MaYMb	45.08	100	17.308	...

Figura 2.21. Ingreso de la configuración T6 de los trenes Alstom Metr poli S9000

Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

2.1.4. Características Operacionales

Dentro de este inciso se detallan las características de operación con las que la Línea 1 tiene bajo consideración en la ejecución y flujo de trenes.

2.1.4.1. Frecuencia de operación de Trenes

La frecuencia de operación de los trenes que se ingresaron al Software de Simulación se presenta en la **Tabla 2.9**, la cual explica a detalle las variaciones y el intervalo de horas pico y horas valle, así como también los días t picos de la semana en operación. Los horarios pico se caracterizan por suplir la vía con un tren cada 3 minutos (180s), mientras que los horarios valle, cada 6 minutos (240s). Para ello se tomó como referencia el itinerario diario para el día 10 de octubre del 2020 mostrado en el **Anexo 7**, en donde se presentan los tiempos recorridos por los trenes entre las estaciones a lo largo de la vía par e impar.

Intervalo	Lunes a viernes	Sábados, Domingos y feriados
5:30 – 6:00	6 min	6 min
6:00 – 9:30	3 min	6 min
9:30 – 17:30	6 min	6 min
17:30 – 20:30	3 min	6 min
20:30 – 22:30	6 min	6 min

Tabla 2.9. Frecuencia de Salida de Trenes desde ambos extremos de ambas vías en Minutos.

Fuente: Elaboración Propia. Gerencia de Regulación y Estudios Económicos, “Informe de Desempeño de la concesión del sistema eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao, Línea 1”.

Para el ingreso de esta frecuencia de operación de trenes en el software de simulación, fue necesario incluir el horario de partida, tiempo de espera (20s) y de salida para cada tren circulando en el transcurso de la Línea 1, dependiendo si circula en la vía par o impar. Un ejemplo de este ingreso de información se presenta en la **Figura 2.22**, en donde se establece el horario del tren ALN1, desde la estación VES hasta la estación BAY en la vía Par.

Station	ALN1			
	Arrival	Dwell (m)	Departure	Trip
Estación VES	5:30:00	0.33	5:30:20	1.66
Estación PIN	5:32:00	0.33	5:32:20	2.66
Estación PUM	5:35:00	0.33	5:35:20	1.66
Estación VMA	5:37:00	0.33	5:37:20	1.66
Estación MAU	5:39:00	0.33	5:39:20	1.66
Estación SJU	5:41:00	0.33	5:41:20	2.66
Estación ATO	5:44:00	0.33	5:44:20	1.66
Estación JCH	5:46:00	0.33	5:46:20	1.66
Estación AYA	5:48:00	0.33	5:48:20	1.66
Estación CAB	5:50:00	0.33	5:50:20	1.66
Estación ANG	5:52:00	0.33	5:52:20	1.66
Estación SBS	5:54:00	0.33	5:54:20	1.66
Estación CUL	5:56:00	0.33	5:56:20	2.66
Estación NAR	5:59:00	0.33	5:59:20	1.66
Estación GAM	6:01:00	0.33	6:01:20	1.66
Estación MIG	6:03:00	0.33	6:03:20	1.66
Estación ELA	6:05:00	0.33	6:05:20	1.66
Estación PRE	6:07:00	0.33	6:07:20	2.66
Estación CAA	6:10:00	0.33	6:10:20	1.66
Estación PIR	6:12:00	0.33	6:12:20	1.66
Estación JAR	6:14:00	0.33	6:14:20	1.66
Estación POS	6:16:00	0.33	6:16:20	1.66
Estación SCA	6:18:00	0.33	6:18:20	1.66
Estación SMA	6:20:00	0.33	6:20:20	1.66
Estación SRO	6:22:00	0.33	6:22:20	1.66
Estación BAY	6:24:00	0.33	6:24:20	

Figura 2.22. Ingreso del horario de operación de la carrera 1002 entre las estaciones VES y ATO (Par) dentro del horario Valle.

Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

2.2. Simulación bajo el Escenario Base

Como parte del escenario base a simular se ingresaron las consideraciones y condiciones según la operación de los trenes, así como la configuración de los componentes mencionados en el inciso: **Recopilación e Ingreso de Información a eTrax**. En este caso, las consideraciones generales para esta simulación se presentan en el siguiente listado:

- Periodo de Simulación 7 días consecutivos durante los horarios de apertura, de lunes a domingo para una semana típica sin contingencias ni retrasos. Para ello, se simularon dos días: uno típico de lunes a viernes y otro típico de sábado a domingo extrapolando sus resultados.
- Condiciones de Infraestructura Nominales sin fallas ni reemplazos
- Condiciones de Operación con la frecuencia semanal establecidas en la **Tabla 2.9**, condiciones previas al Estado de emergencia por Covid-19 en el Perú⁴
- Modelo de Trenes Alstom Metrópoli en configuración de 6 vagones (5 locomotoras Ma y Mb y un vagón tipo R)
- Condiciones de carga para todos los trenes en condición AW3.

Estas condiciones fueron simuladas, así como se muestra en la **Figura 2.23**, en donde se incluyen las siguientes características para la simulación:

- | | |
|-----------------------------------------------|------------|
| ○ Coeficiente de Adhesión | 0.16 [121] |
| ○ Máximo número de iteraciones | 999 |
| ○ Precisión | 0.1 |
| ○ Velocidad de Deriva global “Coasting” | 80 km/hr |
| ○ Intervalo de tiempo para la simulación (dt) | 10s |

⁴ Para el periodo de recopilación de información, no se tomarán en cuenta los valores registrados a partir del lunes 16 de marzo del 2020 hasta la fecha, en donde en Perú se decretó Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del brote del COVID-19 mediante el DS-N° 044-2020-PCM, afectando directamente la afluencia de pasajeros en la Línea 1, aun sin haber registrado cierres totales en su servicio. [132].

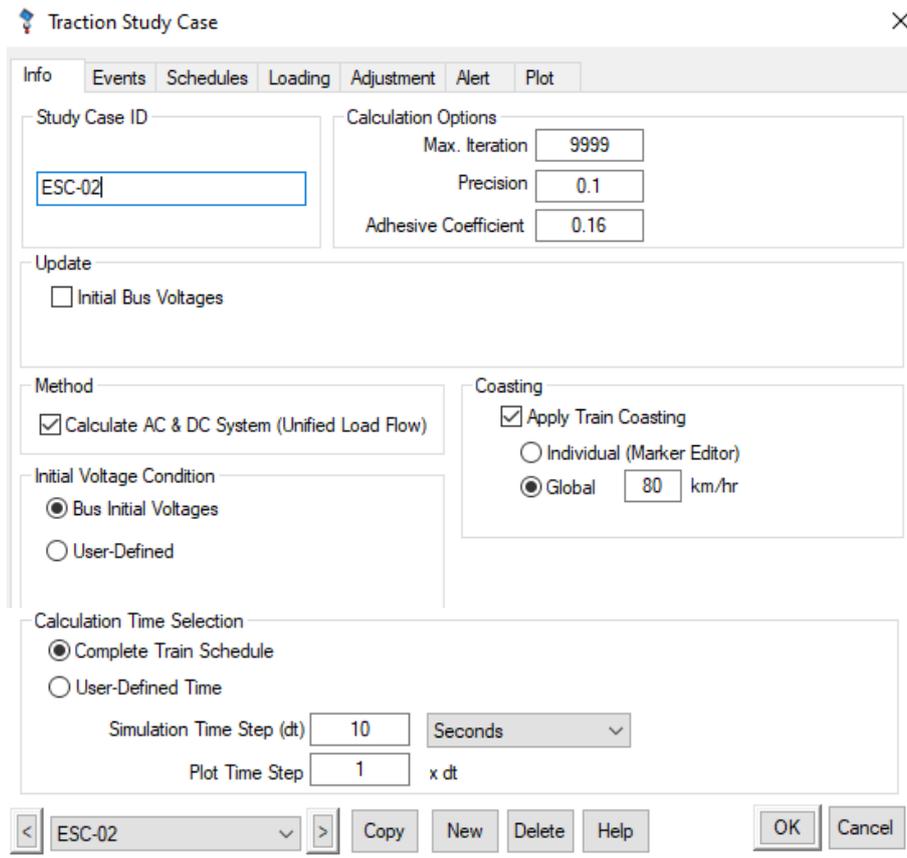


Figura 2.23. Ingreso de condiciones para escenario Base en el Software eTrax de ETAP
Fuente: Elaboración Propia. Software: ETAP 20.0.4

2.2.1. Validación del Modelo

El principal factor a comparar y poder evaluar la validez del modelo se aplicará a partir de las corrientes pico (A) presentadas en el estudio realizado en [17], en donde se presentan estos resultados en los puntos de alimentación en DC desde las SERs, así también con los resultado obtenidos de la medición de las corrientes de los alimentadores realizado por la misma operadora el Metro el día 06 de setiembre del 2019 [124].

Otro punto para evaluar es el perfil de velocidades con el que los trenes circulan a lo largo de la vía. Para este caso se corroboró el perfil de velocidades del tren con el mismo perfil dado en las mediciones reales del día 28 de enero el 2016 en [125] y se estimó un porcentaje de error promedio así como se identificaron los errores y sus causas puntuales.

2.2.2. Parámetros Base

Como resultados de esta primera simulación, se logró obtener los valores y las unidades de las siguientes variables en los 11 puntos de Suministro de energía (en las Barras de SER) y en los tres puntos de alimentación (Barras SEAT). Estas variables son:

- Energía activa total consumida (MWh) por todo el sistema de Alimentación
- Energía consumida y regenerada (MWh) en las Subestaciones de Rectificación.
- Potencia máxima consumida por las subestaciones de Rectificación (kW)
- Energía (MWh) consumida y regenerada por los trenes

Otro indicador considerado para la evaluación y estimación del modelo bajo el escenario base es el indicador denominado “estándar de consumo” (*EC*), el cual indica el consumo promedio de energía por carrera recorrida. Este indicador se calcula bajo la siguiente fórmula:

$$EC = \frac{CT}{NC} \quad (kWh/Carrera)$$

Donde:

- CT: Consumo Total Neto por la tracción de los trenes (MWh)
- NC: Número de carreras recorridas durante el periodo

2.3. Preselección de Alternativas

Las aplicaciones de las tres alternativas descritas cuentan con una variedad de formas y criterios que dependen mayoritariamente de las necesidades o problemas que cuentan las empresas operarias en su infraestructura eléctrica. Sin embargo, en base a los casos de estudio presentados por cada aplicación, en [126] se presenta la siguiente **Tabla 2.10** comparativa de las tres alternativas analizadas.

Característica	Almacenamiento en los Trenes	Almacenamiento en las Estaciones	Subestaciones Reversibles
Pérdidas en la Catenaria o tercer Riel reducidas	✓	-	
Alta eficiencia gracias a menores pérdidas por transformación y almacenamiento de energía	-	-	✓
La energía recuperada puede ser utilizada en otros tipos de equipos (Iluminación, escaleras eléctricas, etc.)	-	-	✓
Los vehículos pueden ser operados sin conexión sin punto de contacto por cortos tramos de la línea	✓	-	-
Los sistemas pueden ser instalados sin hacer modificaciones en los vehículos	-	✓	✓
Menos parámetros de seguridad que cumplir	-	✓	✓
Reducción del Calentamiento por el frenado reostático dentro de tramos subterráneos o bajo túneles	✓	✓	✓
Estabilización de Voltaje y Reducción de Potencia Pico	✓	✓	-

Tabla 2.10. Comparación de Alternativas para el aprovechamiento del frenado regenerativo
Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: F.-O. Devaux y X. Tackoen, “Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks,” 2014. [126]

En base a la cantidad de puntos a favor con los que las alternativas cuentan según la **Tabla 2.10**, se optó por no considerar la alternativa de “Almacenamiento en los trenes para la simulación” debido a que representan un cambio en el diseño y en la infraestructura de estos. En el caso de las Subestaciones Reversibles, no se consideró la tecnología que implica la instalación de módulos Bidireccionales (Rectificación + Inversión) ya que repercuten en el reemplazo permanente de los Grupos de Rectificación instalados actualmente. Además, en base a las posibilidades de simulación del Software eTrax de ETAP, se descartó las opciones de Almacenamiento con Supercapacitores (*EDLCs*) y finalmente se optó por simular las siguientes opciones bajo las condiciones descritas:

- **Subestaciones Reversibles:** Utilizando el mismo grupo rectificador con el que la línea ya cuenta, activando la opción de inversión y permitiendo el flujo bidireccional de potencia regenerada.
- **Almacenamiento en las Estaciones:** Utilizando bancos de baterías de Litio conectados en las barras DC mediante un Convertidor DC, en la barra principal.

2.4. Simulación con Alternativas Preseleccionadas

Tomando como referencia el diagrama eléctrico presentado en [115], a este diagrama se le añadieron las alternativas preseleccionadas y se simuló bajo las mismas condiciones para así poder comparar las mismas variables listadas en el inciso anterior entre las del escenario base y las de cada alternativa evaluada.

- Dimensionamiento y Ubicación

Para efectos de la simulación y por restricciones del Software utilizado se optó por simular la instalación de 1 módulo de estos dos tipos de alternativas ubicados a lo largo de todas las subestaciones de rectificación, con el objetivo de identificar la SER que cuente con mayor capacidad de aprovechamiento y el potencial aprovechable en toda la Línea utilizando las tecnologías descritas. Ya con esta simulación se verificará la SER que cuente con mejor capacidad de aprovechamiento de energía y se considerarán los valores resultantes para su comparación en la Matriz MCA.

2.4.1 Subestaciones Reversibles

Para esta alternativa se optó por utilizar la activación de la opción que contaba el software el cual permite el flujo bidireccional de energía a través de los ya instalados grupos de rectificación. Para ello, en el software se estableció un valor de “0” en el “Input” que establece el voltaje en “por unidad” (pu) que requiere el rectificador para bloquear la

corriente negativa en pu que se presenta en los bornes. El ingreso de esta característica se presenta en la **Figura 2.24**.

Train Coasting End speed	0
Train Speed Reduction Marker	1
Voltage Adjustment to Block Rectifier Negative Current	0
> Geospatial View	
> Ground Grid Systems	
> Harmonic Analysis	
> Load Allocation	
> Load Flow	
Voltage Adjustment to Block Rectifier Negative Current	
This entry is used when rectifier has negative current due to excessive train regeneration. Using this entry will result in rectifier output voltage increase in order to block negative current. Default is 1.0, i.e., when the negative current is 1.0 pu, rectifier will increase output voltage by 1.0 pu.	

Figura 2.24. Ingreso de Restricción de corriente negativa a los grupos de rectificación el software eTrax de ETAP para la simulación de Subestaciones Reversibles.

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: Software eTrax de ETAP 20.0.4

Esta opción asume la curva de Rectificación de los grupos presentada en **Figura 2.10**, pero en el 4to cuadrante, permitiendo el flujo bidireccional a través del grupo. Para su comparación se utilizaron las características de dimensionamiento, eficiencia y precios referenciales del Modelo SITRAS PCI 1500 V de 2 MW de la empresa Siemens [67]. El cual cuenta con las siguientes características:

- Eficiencia > 96%
- Largo 1.4 m
- Ancho 4.2 m
- Alto 2.5 m
- Peso 2100 kg

Para este caso, las variables que obtuvieron en el escenario base fueron comparadas con las mismas obtenidas en este escenario, identificando así su potencial aprovechamiento mediante esta alternativa.

2.4.2 Banco de Baterías

En el caso de los bancos de baterías de Litio-ion, se utilizaron las características de las batería del modelo CH-75-6 de la empresa HITACHI CHEMICAL Co.. Las

principales características de una celda para esta batería se detallan en el siguiente listado obtenido de [127]:

- Tipo Li-Ion
- Voltaje de celda en circuito abierto 3.7 V
- Resistencia @23°C 0.1 mΩ
- Capacidad 75 Amp.hr
- Corriente de Carga / Descarga (3C) 225 / 300 A
- Medidas Cilíndricas Ø67 mm x 410 mm

Las curvas características de este tipo de celda para los 5 niveles de corriente (0.2C, 0.5C, 1C, 2C y 3C) se presentan en la **Figura 2.25**:

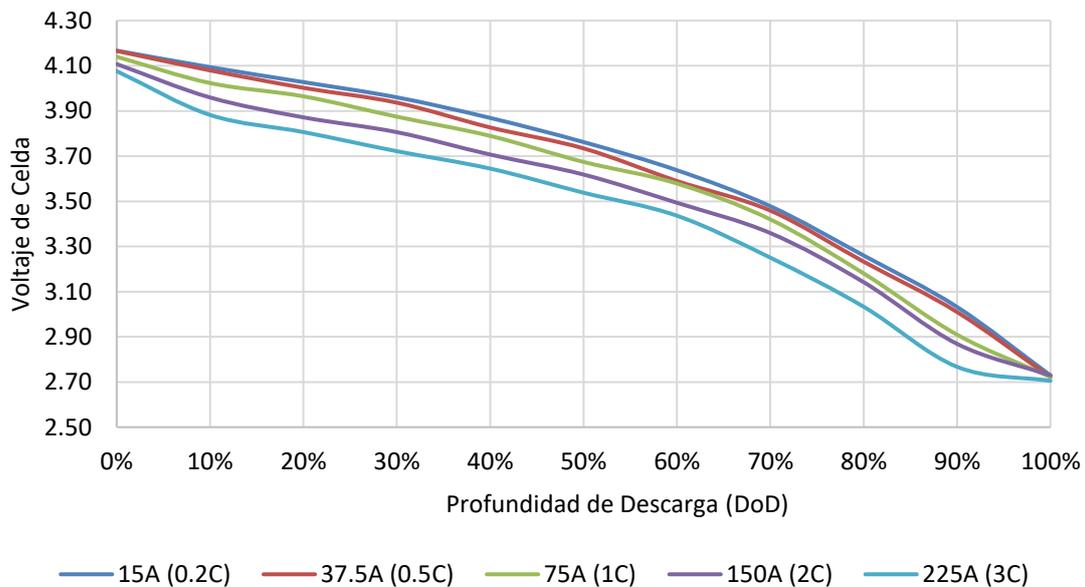


Figura 2.25. Curvas de Estado de Descarga (SoD%) de la Celda CH-75-6
Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: S. Hirota, K. Hara, M. Ochida, y Y. Mishiro, “Energy storage system with cylindrical large formatted lithium ion batteries for industrial applications” [128]

El arreglo del conjunto de baterías se dimensionó bajo una configuración con módulos de 6 celdas en serie (22.2V) conectadas en 68S 2P (136 módulos), para obtener un voltaje de 1510 VDC y una capacidad nominal de 150 Ah o 226.5 kWh por módulo. La potencia del banco de baterías resulta de un total de 679.5 kW bajo una corriente de 225 Amperios.

En cuanto a las características consideradas para la configuración del BMS, se optó por establecer que el porcentaje del voltaje de la barra conectada (BPDC) para la carga se da mientras este se mantenga por encima del 100% (1500 VDC), mientras que la descarga se dé cuando el voltaje de la línea esté por debajo del 95%. La corriente máxima de carga y descarga del módulo es de 225A (para un factor de 3C, corriente nominal) para cada celda. Las características del banco de baterías se ingresaron al software como parte de la librería, así como se muestra en la **Figura 2.26**.

The figure shows two screenshots of the ETAP software interface for configuring a Battery Management System (BMS). Both screenshots show the same basic information: MFR: Hitachi, VPC: 3.7, R: 0.0001, Temp: 23, Model: CH-75-6-F, Capacity: 225.000, Type: Li-Ion, Char: SoC vs. Voltage.

Left Screenshot (Rating Tab):

- Rating: # of Cell: 6, # of Packs: 68, # of Strings: 2, Rated Voc: 1510 V, Total Capacity: 450 AH.
- Temperature: Max: 40 °C, Min: 20 °C.
- Cut-off SoC: Charge: 100 %, Discharge: 0 %.
- Operating SoC: 0 %.
- Library... button.
- State of Charge table:

	SoC Category	SoC %	Cap AH
1	Design	75	337.5
2	Normal	75	337.5
3	Charging	50	225
4	Discharging	80	360
5	Floating	80	360
6	Startup	70	315
7	Emergency	80	360
8	Backup	80	360
9	Standby	80	360
10	Bat. Cat. 10	80	360

Right Screenshot (BMS Tab):

- Battery Management System (BMS)
- Charge/Discharge Mode:
 - Logic Schedule
 - Bus Voltage: Bus ID: BPDC-VMA, %: 100, Band: 1, % Charge; 95, % Discharge.
 - Operating Generation: Bus ID: MW, %: 1, 0.001, MW Charge; 0.1, 0.001, MW Discharge.
 - UDM: UDM Model: [dropdown]
- Charge/Discharge Control Parameters:
 - Vbat: min 50, max 150 %
 - Idischarge: max 225 A, Eff: 90 %
 - Icharge: 300 A

Figura 2.26. Ingreso de las características del banco de baterías en el software ETAP. Ejemplo SER PIN
Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de Software: ETAP 20.0.4

Para su evaluación se optó por instalar estos módulos de baterías en las barras principales de las SERs (BPDC-SER) con el objetivo de identificar el potencial ahorro que estas permiten en cada punto verificando las mismas variables mencionadas en el escenario base.

2.5. Selección de alternativa óptima mediante Matriz MCA

Para la selección de la alternativa óptima se utilizó la Matriz multicriterio (*MCA* de *Multi-Criteria Analysis*) presentada en la **Tabla 2.11**, la cual ha sido adaptada de la metodología implementada en las Líneas 2 y 6 del Metro de Bruselas, ya que cuenta con la misma cantidad de estaciones que la Línea 1 del metro de Lima (26) y es similar en la cantidad de pasajeros [129]. En dichas estaciones se obtuvo un resultado de ahorro de energía anual promedio del 9% con la propuesta de Subestaciones reversibles en 2 ubicaciones de 1.5 MW [130].

Esta metodología ha sido seleccionada ya que las alternativas potenciales son de funcionamiento particular y cumplen objetivos específicos diferentes entre ellas, por lo que una matriz que las compare bajo los criterios de (A) Inversión, (B) Performance, (C) Ciclo de Vida (C) Implementación, bajo la ponderación y requerimientos que la empresa operaria contemple, resulta ser una buena alternativa de comparación. Esta matriz se presenta a continuación en la **Tabla 2.11**.

	Objetivo	Unidad	Alternativa 1	Alternativa 2
A. INVERSIÓN				
(A.1) Costo Unitario por Potencia Instalada	Min	\$ / kW		
(A.2) Costo Unitario por Energía Regenerada	Min	Miles de \$ / MWh		
B. PERFORMANCE				
(B.1) Eficiencia del Sistema	Max	%		
(B.2) Reducción de Potencia Pico en la SER	Min	kW		
(B.3) Energía Recuperada	Max	MWh		
C. CICLO DE VIDA				
(C.1) Tiempo de Vida Teórico	Max	Años		
D. IMPLEMENTACIÓN				
(D.1) Volumen	Min	m ³		
(D.2) Área	Min	m ²		

Tabla 2.11. Matriz de Análisis Multicriterio (MCA) para la Selección de las Alternativas
Fuente: Elaboración Propia.

En esta matriz se define al Objetivo como el enfoque óptimo en el que se busca, maximizar o minimizar el valor, en orden de obtener el mayor beneficio de la variable. La definición y la fuente de recopilación de las variables listadas se presentan de manera individual en la **Tabla 2.12** a continuación. En ella se presentan los criterios de puntuación según la variable indicada para los cuales se estableció un rango entre 0 y 5 según los intervalos de valores que se obtuvo en la simulación del escenario base.

Variable	Definición	Puntuación e Intervalos					
		0	1	2	3	4	5
(A.1)	Costos de Inversión de la Alternativa por Unidad de Potencia Instalada (\$ / kW)	>550	≤ 550 > 450	≤ 450 > 350	≤ 350 > 250	≤ 250 > 150	≤ 150
(A.2)	Costo de Inversión de la Alternativa por Unidad de Energía Recuperada (Miles de \$ / MWh)	>25	≤ 25 > 20	≤ 20 > 15	≤ 15 > 10	≤ 10 > 5	≤ 5

Variable	Definición	Puntuación e Intervalos					
		0	1	2	3	4	5
(B.1)	Eficiencia del Sistema (%)	< 80%	≥ 80% < 90%	≥ 90% < 93%	≥ 93% < 96%	≥ 96% < 99%	≥ 99%
(B.2)	Reducción de Máxima registrada en las SERs (kW)	≤ 50	> 50 ≤ 150	> 150 ≤ 500	> 500 ≤ 1000	> 1000 ≤ 2500	> 2500
(B.3)	Energía recuperada en las SEATs (MWh)	≤ 0	> 0 ≤ 100	> 100 ≤ 200	> 200 ≤ 400	> 400 ≤ 800	> 800
(C.1)	Tiempo de Vida Teórico (años)	≤ 2	> 2 ≤ 5	> 5 ≤ 10	> 10 ≤ 15	> 15 ≤ 25	> 25
(D.1)	Volumen total necesario para la aplicación según dimensiones (m ³)	≥ 100	< 100 ≥ 50	< 50 ≥ 25	< 25 ≥ 12	< 12 ≥ 6	< 6
(D.2)	Área de ocupación de planta según dimensiones (m ²)	≥ 50	< 50 ≥ 25	< 25 ≥ 15	< 15 ≥ 10	< 10 ≥ 5	< 5

Tabla 2.12. Definición de variables y puntajes para Evaluar en la Matriz MCA
Fuente: Elaboración Propia.

Se debe tener en cuenta que los criterios de evaluación para las variables (B.3) y (B.4) están en función al tiempo de simulación de 1 semana, considerando 5 días tipo de lunes a viernes y 2 días tipo de sábados y domingos según el cronograma.

Los criterios seleccionados para la asignación de los pesos ponderados se presentan en la **Tabla 2.13**:

	Peso
A. INVERSIÓN	30%
(A.1) Costo Unitario por Potencia Instalada	35%
(A.2) Costo Unitario por Energía Regenerada	65%
B. PERFORMANCE	55%
(B.1) Eficiencia del Sistema	10%
(B.2) Reducción de Potencia Pico	25%
(B.3) Energía Recuperada	65%
C. CICLO DE VIDA	5%
(C.1) Tiempo de Vida Teórico	100%
D. IMPLEMENTACIÓN	10%
(D.2) Volumen	30%
(D.3) Área	70%

Tabla 2.13. Asignación de los pesos ponderados para criterios de evaluación.
Fuente: Elaboración Propia.

Los porcentajes de ponderación mostrados en la **Tabla 2.13**, han resultado de los criterios utilizados en ejemplo tomado como base en Bruselas [129] y en base a los criterios de decisión tomados con la empresa operaria [131].

- El rendimiento o “Performance” resulta ser el principal indicador al evaluar la instalación de un solo prototipo (55%)
- La inversión por unidad de potencia y energía resultaron ser como conjunto el segundo indicador de mayor peso (30%) debido a que el estudio tiene un enfoque más técnico que económico.
- El Ciclo de vida (5%) así como la Implementación (10%), resultaron ser criterios de calificación con bajo peso ya que la instalación de su aplicación no se restringe directamente de estos.

Para el cálculo del puntaje Total de las alternativas seleccionadas, se realizó un cálculo de ponderación mediante la siguiente ecuación:

$$Puntaje\ Total\ de\ Alternativa\ (X) = \sum_i^{N=4} \sum_j^{n=\{2,3\}} (P_i * P_{ij} * R)$$

Donde:

- P_i : Peso ponderado del conjunto “i”
- P_{ij} : Peso ponderado de la variable “j” del conjunto “i”
- R : Puntuación recibida según **Tabla 2.12** (número entero entre 0 y 5)

Además, “i” puede variar entre el conjunto {A, B, C, D} asumiendo “N = 4” y la variable “j” puede variar hasta “n” en función del número de subvariables que cuente cada conjunto, que para A y D: n = 2, para C: n = 1; y para B: n = 3.

Mediante los resultados obtenidos en la **Tabla 2.11** y el acondicionamiento de las variables para el cálculo de su ponderación, se obtuvieron los valores totales y finales de cada variante. La alternativa que contaba con un mayor puntaje ponderado fue la seleccionada para presentarla como la solución seleccionada y óptima para ser instalada bajo las consideraciones obtenidas en la Línea 1 del Metro de Lima y Callao.

CONCLUSIONES

1. Como se ha demostrado, los resultados en todas las aplicaciones revisadas con alguna tecnología implementada han contado con beneficios considerables para las empresas operarias, el sistema eléctrico de la infraestructura y los trenes en operación. Este compendio de aplicaciones alrededor del mundo demuestra a la empresa operaria de la Línea 1 del Metro de Lima, que la implementación de una alternativa correctamente seleccionada, dimensionada y ubicada obtendrá resultados positivos para la misma.
2. A manera de preselección inicial, dados los requerimientos y las aplicaciones de las tecnologías en otros sistemas ferroviarios vistos en el Marco Teórico, se puede identificar a la Alternativa de Subestaciones Reversibles como la opción más eficiente en cuanto al mayor porcentaje aprovechable de la energía por regeneración, y también, al Sistema de Almacenamiento de energía en las Estaciones, como la opción más práctica y de bajo costo de instalación. La alternativa de implementación de un sistema de almacenamiento de energía en el tren no se reconoce como una solución aplicable para la Línea 1 ya que contempla la modificación de las características de diseño estático y dinámico de los trenes y coches en operación, alterando factores críticos como el peso total, el centro de masa, la capacidad de transporte, entre otros factores que podrían ser contraproducentes en su rendimiento energético.
3. La metodología descrita en la Tesis mediante la utilización del software eTrax de ETAP como software de simulación electrodinámica, permite hacer un modelo gemelo de la línea 1, y simularlo bajo el escenario base y bajo escenarios con las alternativas preseleccionadas instaladas de tal manera que se puede realizar una correcta comparación de los beneficios en la Línea 1 bajo la aplicación de estas.
4. La comparación de los resultados mediante la matriz MCA, resulta ser una herramienta que permite comparar las distintas alternativas que se desempeñan

con objetivos y funcionalidades distintas, argumentando su utilización en la presente tesis con los resultados obtenidos para el Metro de Bruselas y consiguientemente para la aplicación de la alternativa mejor calificada.

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a la UTEC por el apoyo que me ha brindado a lo largo de mi carrera y por los conocimientos que he podido adquirir gracias a ella. A la empresa Concar y a la Línea 1 por haberse visto muy abierta y comprometida con mi proyecto de investigación desde el inicio. A la empresa ETAP por haberme dado la posibilidad de utilizar sus mejores herramientas para mi aprendizaje y el desarrollo del presente trabajo de investigación. Y sobre todo mi asesor, el profesor Luis García, quien me ha guiado y ayudado a lo largo de esta etapa final de mi carrera y quien, junto con todos los profesores de la carrera de Ingeniería de la Energía de la UTEC, han formado una parte muy importante de mi carrera profesional. Muchas Gracias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Línea 1 del Metro de Lima, “Informe de Sostenibilidad 2019”, Lima, Perú, 2019.
- [2] Línea 1 del Metro de Lima, “Informe de Sostenibilidad 2015”, Lima, Perú, 2015.
- [3] COES SINAC, “Informe de la operación anual del SEIN 2019”, Lima, Perú, 2020.
- [4] COES, “Estadística de Operación 2014 - Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional”, 2015.
- [5] International Union of Railways (UIC), “Evaluation of Energy Efficiency Technologies for Rolling Stock and Train Operation of Railways - Regenerative braking in DC systems”, 2002. [En línea]. Disponible en: http://www.railway-energy.org/static/Regenerative_braking_in_DC_systems_103.php. [Accedido: 14-abr-2020].
- [6] Concar S.A., “Reporte Anual Operaciones: Línea 1 - 2019”. Lima, Perú, 2020.
- [7] M. Khodaparastan, A. A. Mohamed, y W. Brandauer, “Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems”, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, n° January, pp. 1–16, 2019.
- [8] Gerencia de Regulación y Estudios Económicos de OSITRAN, “Boletín Estadístico”, Lima, Perú, 2020.
- [9] J. Speller, “Frank J. Sprague”, *US Railroads*, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://spellerweb.net/rhindex/USRH/>. [Accedido: 17-sep-2020].
- [10] Global Mass Transit Report, “Regenerative Braking: Gaining acceleration”, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.globalmasstransit.net/archive.php?id=17689>. [Accedido: 17-sep-2020].
- [11] J.-L. de W. D’Estmael, F.-O. Devaux, y X. Tackoen, “Overview of braking energy recovery technologies in the public transport field”, 2011.
- [12] M. Figueroa, A. E. Diez, L. E. Castrillón, y E. Manrique, “Simulación, Implementación y Pruebas de un Sistema de Compensación en Corriente Directa

- basado en Ultra Capacitores , para Sistemas Ferroviarios”, *Inf. Tecnológica*, vol. 28, n° 1, pp. 179–188, 2017.
- [13] F. V. Uribe, “Encontraron cómo aprovechar mejor la energía que produce el Metro de Medellín al frenar”, *Revista VEC*, 2018.
- [14] P. R. Concha Reátegui y R. F. Zamalloa Rubina, “Proyecto de viabilidad para implementar un sistema de generación de energía renovable en las estaciones de la línea 1 del tren eléctrico de Lima”. p. 225, 2017.
- [15] AméricaEconomía, “Se inicia recorrido completo de la Línea 1 del Metro de Lima”, *Perú*, Lima, Perú, p. 1, 25-jul-2011.
- [16] Alstom, “Lima L1 Extension - Performances Calculation Report”, Belgium, 2016.
- [17] Siemens y GyM Ferrovías, “Mejoras infraestructura L1- Metro Lima 01 - ‘Simulación del Sistema Eléctrico’”, Lima, Perú, 2017.
- [18] Línea 1 del Metro de Lima, “LÍNEA 1 del Metro de Lima logra batir un nuevo récord al movilizar en un solo día a 692 mil pasajeros de forma confiable moderna y segura.”, *Comunicado 22*, 24-dic-2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.lineauno.pe/noticias/comunicado-22/>.
- [19] Línea 1, “Horarios de Operación”, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.lineauno.pe/horarios/>. [Accedido: 07-may-2020].
- [20] A. Mohamed, A. Reid, y T. Lamb, “White Paper on Wayside Energy Storage for Regenerative Braking Energy Recuperation in the Electric Rail System”, New York.
- [21] Climate Technology Centre & Network (CTCN), “Regenerative braking for trains”, *Vehicle and fuel technologies*, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.ctc-n.org/technologies/regenerative-braking-trains>. [Accedido: 20-abr-2020].
- [22] H. Hayashiya y K. Kondo, “Recent Trends in Power Electronics Applications as Solutions in Electric Railways”, *IEEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 15, pp. 632–645, 2020.
- [23] G. Podestá, “Entrevista Piero Arana”. Lima, 2020.

- [24] Proinversión, “Proyecto de la Línea 2 del Metro de Lima y Callao permitirá ahorrar tiempo con transporte moderno, seguro y de calidad”, *Sala de Prensa*, Lima, 17-feb-2019.
- [25] Presidente de la República, “Decreto Supremo N° 001-86-MIPRE”, 1986, p. 4.
- [26] AATE, “Descripción histórica del proyecto ‘Línea 1 del Metro de Lima’”, *Proyecto Línea 1*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.aate.gob.pe/desarrollo/linea-1/>. [Accedido: 05-may-2020].
- [27] Presidente de la República, “Decreto Supremo N° 059-2010-MTC”, 2010, p. 3.
- [28] Presidente de la República, “Decreto Supremo N° 009-2013-MTC”, 2013, pp. 27–28.
- [29] AATE, “Red Básica del Metro de Lima - Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao”. Lima, Perú, 2013.
- [30] GyM, “Metro de Lima Línea 1 - Tramo 1 y Tramo 2”, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.gym.com.pe/nuestros-proyectos/proyecto/proyecto-metro-de-lima>. [Accedido: 07-may-2020].
- [31] Miquique, “Mapa de Estaciones de la Línea 1”, 2014. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Mapa_de_Línea_1_de_Metro_de_Lima.png. [Accedido: 13-abr-2020].
- [32] OSITRAN, “Informe de Desempeño 2018 Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao , Línea 1”, n° Gerencia de Regulación y Estudios Económicos. pp. 1–52, 2018.
- [33] I. Medina, “Tren Eléctrico: Viajar de San Juan de Lurigancho a Villa El Salvador será en menos de una hora”, *Trome.pe*, 10-may-2012. [En línea]. Disponible en: <https://web.archive.org/web/20160917214435/http://trome.pe/actualidad/desde-manana-tren-electrico-llevara-desde-san-juan-lurigancho-villa-salvador-menos-hora-linea-1-metro-lima-tendra-26-estaciones-y-atravesara-11-districtos-lima-54-minutos-2017005>. [Accedido: 12-may-2020].
- [34] L. Liudvinavičius y L. P. Lingaitis, “Electrodynamic braking in high - speed rail transport”, *Transport*, vol. 22, n° 3, pp. 178–186, 2007.

- [35] International Union of Railways (UIC), *Technologies and Potential Developments for Energy Efficiency and CO2 Reductions in Rail Systems*. Paris, 2016.
- [36] I. E. Commission, “IEC 60850:2014 Railway applications - Supply voltages of traction systems”. p. 37, 2014.
- [37] IEEE Power and Energy Society, “IEEE 519:2014 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”, 2014.
- [38] Wikipedia.org, “List of railway electrification systems”. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_railway_electrification_systems#Systems_using_non-standard_voltages. [Accedido: 10-jun-2020].
- [39] Metrobits.org, “WORLD METRO DATABASE”, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://metrobits.com/metro/table.html?feat=CIANCOCSNOPLGSTSSLILSLLSLDPPLAPPYPOUSLRTPTRWDGGPCVORUDRDYPDACWTRM&orderby=VO&sort=ASC&unit=&status=>. [Accedido: 16-jun-2020].
- [40] RailSystems.net, “Rigid Catenary (or Overhead Contact System)”, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.railsystem.net/rigid-catenary-or-overhead-contact-system/>. [Accedido: 12-may-2020].
- [41] C. M. Pappalardo, M. D. Patel, B. Tinsley, y A. A. Shabana, “Contact Force Control in Multibody Pantograph / Catenary Systems Page Proof Instructions and Queries”, *J. Multi-body Dyn. Proc. Inst. Mech. Eng. [PIK]*, vol. K, n° 604756, 2015.
- [42] G. Shirkoohi y A. Jenkins, “Computation of Rectifier Transformers employed in Railway Networks”.
- [43] G. Abad, *Power Electronics and Electric Drives for Traction Application*. Wiley, 2017.
- [44] M. Wang, Y. Li, B. An, L. Luo, y P. Wang, “A New 24-pulse Rectifier Transformer with Delta-extended Connection”, en *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, p. 7.
- [45] Siemens y Consorcio Metro de Lima, “Diagrama Unifilar de las Subestaciones

- Rectificadoras (8)”, 2012.
- [46] Línea 1 del Metro de Lima, “Subestaciones y Catenarias”. Lima, Perú, 2019.
- [47] DISHA Experts, *Basic Science and Engineering for Indian Railways (RRB)*, II. New Delhi: DISHA Publication, 2018.
- [48] V. A. Profillidis, *Railway Management and Engineering*, 4th ed. Ashgate, UK: Ashgate Publishing Company, 2014.
- [49] Alstom y Línea 1 del Metro de Lima, “Metro de Lima Línea 1 - Alstom Metrópolis Manual Descriptivo de Componentes”, vol. 02, 2013, pp. 1–66.
- [50] M. Sarrazin, S. Gillijns, J. Anthonis, K. Janssens, y H. Van Der Auweraer, “NVH analysis of a 3 phase 12 / 8 SR motor drive for HEV applications”, *EVS27*, pp. 17–20, 2013.
- [51] G. A. Soubllette Castro, “Sistemas de recuperación de energía para la Línea 1 del Metro de Santiago”, Universidad de Chile, 2011.
- [52] C. A. Bulucea, D. A. Nicola, M. A. Rosen, N. E. Mastorakis, y C. A. Bulucea, “Operation analysis of AC traction motors in terms of electromagnetic torque capability on sustainable railway vehicles Operation analysis of AC traction motors in terms of electromagnetic torque capability on sustainable railway vehicles”, *MATEC Web Conf.*, n° July 2017, 2016.
- [53] P. A. Hernández Peñaloza, “Conversión de Trenes del STC MP-68R93 a Sistema de Tracción-Frenado VVVF”, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2010.
- [54] Alstom y Línea 1 del Metro de Lima, “Metro de Lima Línea 1 - Alstom Metrópolis Manual Descriptivo de Componentes”, vol. 01, Lima, Perú, 2013, pp. 1–178.
- [55] K. Keskin y A. Karamancioglu, “Energy-Efficient Train Operation Using Nature-Inspired Algorithms”, *J. Adv. Transp.*, vol. 2017, p. 12, 2017.
- [56] C. Duca, *Trazado de las curvas de marcha de trenes*, vol. C. Buenos Aires, Argentina, 2016, pp. 1–13.
- [57] V. Singh, “EFFICIENT UTILISATION OF REGENERATIVE BRAKING IN RAILWAY”, *Int. Res. J. Eng. Techonology*, vol. 04, n° 12, pp. 1421–1428, 2017.
- [58] M. Khodaparastan y A. Mohamed, “Modeling and Simulation of Regenerative

- Braking Energy in DC Electric Rail Systems”, en *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2018, n° January 2019, pp. 1–6.
- [59] S. S. Fazel, Saman Firouzian, y B. K. Shandiz, “Energy-Efficient Emplacement of Reversible DC Traction Power Substations in Urban Rail Transport through Regenerative Energy Recovery”, *Int. J. Railw. Res.*, vol. 1, n° 2, pp. 11–22, 2014.
- [60] V. Gelman, “Energy Storage That May Be Too Good to Be True”, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 8, n° 4, pp. 70–80, 2013.
- [61] M. Popescu y A. Bitoleanu, “A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems”, *Energies*, vol. 12, n° 6, pp. 1092–1117, 2019.
- [62] Siemens, “Sitrans TCI”. Siemens AG 2010, Erlangen, 2020.
- [63] W. Li, J. Xiao, J. Wu, J. Liu, y X. He, “Application Summarization of Coupled Inductors in DC / DC Converters”, *Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pp. 1487–1491, 2009.
- [64] V. Gelman, “Braking Energy Recuperation”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, p. 9, 2009.
- [65] J. M. Ortega, “INGEBER System for kinetic Energy recovery System & Metro Bilbao Experience”, Madrid, 2011.
- [66] A. González-gil, R. Palacin, y P. Batty, “Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 374–388, 2013.
- [67] Siemens, “Sitrans PCI”. p. 4, 2020.
- [68] S. Jang, C.-Y. Choi, C.-H. Bae, S.-H. Song, y C.-Y. Won, “Study of Regeneration Power Control Inverter for DC Traction with Active Power Filter Ability”, *31st Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. . IECON*, pp. 1272–1277, 2005.
- [69] W. De Jager, “DC / AC Converters voor het terugvoeden van tractie energie naar het Middenspanningsnet Will de Jager”. Imtech Traffic & Infra, Rotterdam, pp. 1–28, 2014.
- [70] IMTECH Traffic & Infra B.V. y V. Grot, “Braking energy recovery on the metro network – RET (Rotterdam)”, Rotterdamse Elektrische Tram, 2014.

- [71] V. Suru, A. Bitoleanu, y M. Linca, “Indirect Current Control of a Filtering and Regeneration System used in DC Substations for Urban Traction”, *Athens Journal Technol. Eng.*, nº March, pp. 17–32, 2017.
- [72] M. Popescu, S. M. Ieee, A. Bitoleanu, S. M. Ieee, V. Suru, y A. Preda, “System for Converting the DC Traction Substations into Active Substations”, en *The 9th International Symposium on advanced topics in electrical engineering*, 2015, pp. 632–637.
- [73] S. Sagareli y V. Gelman, “Implementation of New Technologies in Traction Power Systems”, en *ASME/IEEE Joint Rail Conferen15*, 2004, pp. 1–6.
- [74] ABB, “Enviline TCR Traction Controlled Rectifier for DC rail transportation”. ABB Sp. z.o.o., Aleksandrow Lodzki, Poland, p. 4, 2020.
- [75] Alstom, “HESOP: Saving energy and costs in a single solution”, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.alstom.com/our-solutions/infrastructure/hesop-saving-energy-and-costs-single-solution>. [Accedido: 17-may-2020].
- [76] D. Cornic, R. Senior, y D. Engineer, “Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation”, *Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propulsion.*, 2010.
- [77] S. Clément, “Layman’s Report”, Milan, 2018.
- [78] European Comission, “Transformative tech for metros from Milan to Sydney”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/easme/en/news/transformative-tech-metros-milan-sydney>. [Accedido: 25-may-2020].
- [79] Alstom, “Activity Report 2015/16”, France, 2016.
- [80] F. Meishner y D. S. Uwe, “Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids”, *eTransportation 1 10001*, vol. 1, p. 20, 2019.
- [81] M. Peña-Alcaraz, A. Fernández, A. P. Cucala, A. Ramos, y R. R. Pecharromán, “Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, pp. 226–397, 2012.
- [82] A. J. Ghanizadeh, S. H. Hosseinian, y G. B. Gharehpetian, “Harmonic Disturbance

- Compensating and Monitoring in Electric Traction System”, *Electr. Electron. Eng.*, vol. 2, n° 3, pp. 1–11, 2013.
- [83] T. Konishi, “Fixed Energy Storage Technology Applied for DC Electrified Railway”, pp. 270–277, 2010.
- [84] P. Arboleya, I. El-Sayed, B. Mohamed, y C. Mayet, “Modeling, Simulation and Analysis of On-Board Hybrid Energy Storage Systems for Railway Applications”, *Energies*, vol. 12, n° 2199, 2019.
- [85] D. Sutanto y K. W. E. Cheng, “Superconducting Magnetic Energy Storage Systems for Power System Applications”, en *IEEE International Conference of Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, 2009, pp. 377–380.
- [86] National Academies of Sciences Engineering and Medicine, *Guiding the Selection & Application of Wayside Energy Storage Technologies for Rail Transit and Electric Utilities*. 2010.
- [87] A. González, E. Goikolea, J. Andoni, y R. Mysyk, “Review on supercapacitors: Technologies and Materials”, *Renew. Sustain. Energies Rev.*, vol. 58, pp. 1189–1206, 2016.
- [88] Maxwell Technolgies, “3.0V 3400F Ultracapacitor Cell: Maxwell’s Highest Power and Energy Cell”. San Diego, California, p. 5, 2020.
- [89] N. Ghaviha, J. Campillo, M. Bohlin, y E. Dahlquist, “Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation”, *Energy Procedia*, vol. 105, n° The 8th International Conference on Applied Energy-ICAE2016, pp. 4561–4568, 2017.
- [90] F. Ciccarelli, “Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems”, University of Naples “Federico II”, 2014.
- [91] E. K. Heidari, A. Kamyabi-gol, M. H. Sohi, y A. Ataie, “Electrode Materials for Lithium Ion Batteries : A Review”, vol. 51, n° 1, pp. 1–12, 2018.
- [92] D. Bender, “Sandia Report - Flywheels”, Albuquerque, USA, 2015.
- [93] Calnetix Technologies, “Vycon® regen® The Proven Flywheel Energy Storage

- System for Rail Innovation”. Vyncon, Cerritos, California, p. 4, 2017.
- [94] M. Shimada, Y. Miyaji, T. Kaneko, y K. Suzuki, “Energy-saving Technology for Railway Traction Systems Using Onboard Storage Batteries”, *Hitachi Rev.*, vol. 61, n° 7, pp. 312–318, 2012.
- [95] C. Sumpavakup, T. Ratniyomchai, y T. Kulworawanichpong, “Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy”, *J. Mod. Transp.*, vol. 25, n° 4, pp. 223–235, 2017.
- [96] M. Meinert, “New mobile energy storage system for rolling stock”, en *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009, pp. 1–10.
- [97] ABB Poland y M. Krodas, “Energy Management System for Braking Train Energy Recovery”. Siofok, Poland, p. 15, 2015.
- [98] ABB, “ABB substations and wayside energy storage system support metro in Poland”, *Web Story*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://new.abb.com/news/detail/46010/abb-substations-and-wayside-energy-storage-system-support-metro-in-poland>. [Accedido: 29-may-2020].
- [99] T. Hiramatsu, *Regenerative Power Storage Equipment CAPAPOST for Hong Kong Mass Transit Railway*, vol. 3, n° 174. 2018, pp. 48–49.
- [100] Woojin Industrial Systems Co. Ltd., “ESS for Railways”, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.wjis.co.kr/en/business/energy_storage_railway.php. [Accedido: 28-jun-2020].
- [101] DOE Global Energy Storage Database, “Woojin/Maxwell Daejeon Line 1 - Gapcheon Station (115)”, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://dev.energystorageexchange.org/projects/1241>. [Accedido: 29-may-2020].
- [102] A. Killer, A. Armstorfer, A. E. Díez, y H. Biechl, “Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems”, en *IEEE Colombian Intelligent Transportation Systems Symposium CITSS 2012*.
- [103] A. E. Diaz, M. F. Carrillo, J. A. Velásquez, A. Armstorfer, y E. M. Álvarez Cano, “Simulación del sistema de tracción del metro de Medellín”, Medellín, 2015.
- [104] Saft, “Capturing energy from train braking in Philadelphia – a world first Case

- study”, vol. February. Saft Batteries, Bagnolet, France, p. 2, 2013.
- [105] Constellations Energy Resources L.L.C., “New Battery Storage Network Pioneered for SEPTA”. Philadelphia, USA, p. 2, 2016.
- [106] Kawasaki, “Kawasaki Conducts Successful Verification Test of Its Railway Wayside Energy Storage System Directly Connected to a 1,500 VDC Traction Power Line”, *Jan. 18*, 2011. [En línea]. Disponible en: http://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/20110118_1.html. [Accedido: 29-may-2020].
- [107] P. V. Radu y Z. Drazek, “Analysis of wayside energy storage devices for DC heavy rail transport”, vol. 04001, pp. 0–5, 2018.
- [108] M. Oattara y J. Gordon Yu, “WMATA Energy Storage Demonstration Project Final Report”, Washington D.C., 2014.
- [109] W. Francis, T. Matsumura, y K. Ogura, “Battery Power System for Trackside Energy Storage”, New York, 2010.
- [110] D. Smith y D. Ting, “Modelling of Rail Traction and Power Distribution Systems”, 2018.
- [111] ETAP, *ETAP 20 Userguide*, 20^a ed. California, USA, 2020.
- [112] “LINEA 1-PLANTA Y PERFIL(27-10-2016)-LAYOUT”. p. 1, 2016.
- [113] Siemens y GyM Ferrovías, “Mejoras Infraestructura L1- Metro Lima”, Lima, Perú, 2017.
- [114] GyM Ferrovías, “LÍNEA DE CONTACTO PLANO DE ALIMENTACIÓN LÍNEA 1”, Lima, Perú, 2018.
- [115] Siemens y GyM Ferrovías, “Mejoras Infraestructura L1- Metro Lima AC”, Lima, Perú, 2017.
- [116] ENEL y MINPETEL S.A., “Informe Técnico Sustentatorio del Proyecto ‘ Ampliación de la SET Mirador (antes Nueva Jicamarca) con un transformador de 3x60 MVA 220 / 60 kV ’”, ENEL, Lima, Perú, 2018.
- [117] COES/DP-02-2011, “Informe de diagnóstico de las condiciones operativas del SEIN 2013-2022”, pp. 31–37, 2011.

- [118] ABB, “Pruebas FAT L30417 - SEAT PAT”, Callao, Perú, 1992.
- [119] Shim Eui-bong y GyM Ferrovías, “Mejoras Infraestructura L1 - Metro Lima - Protocolo de pruebas FAT - Transformadores de grupos rectificadores y servicios auxiliares”, Lima, Perú, 2018.
- [120] Alstom y Línea 1 del Metro de Lima, “Metro de Lima Línea 1 - Alstom Metrópolis Manual Descriptivo de Componentes”, vol. 14, Lima, Perú, 2013, pp. 1–72.
- [121] Alstom, “Metro Lima Extension : Material Rodante”, Lima, Perú, 2015.
- [122] Alstom y Línea 1 del Metro de Lima, “Metro de Lima Línea 1 - Alstom Metrópolis Manual Descriptivo de Componentes”, vol. 12, 2013.
- [123] Alstom, “Metro Lima L1 Ext. Material Móvil: Cálculos Técnicos”, Lima, Perú, 2016.
- [124] Concar S.A. y Línea 1 del Metro de Lima, “Consumo 06092019 - SERs Anexo 1: Mediciones de Carga”. Lima, Perú, 2019.
- [125] Concar S.A. y L. 1 del M. de Lima, “Resultados de Conducción 2016”. Lima, Perú, 2016.
- [126] F.-O. Devaux y X. Tackoen, “Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks”, 2014.
- [127] H. Kodama y Hitachi Chemical, “Hitachi Chemical Technical Report - Electrical Energy Storage Devices & Systems”, n° 55, pp. 50–53, 2015.
- [128] S. Hirota, K. Hara, M. Ochida, y Y. Mishiro, “Energy storage system with cylindrical large formatted lithium ion batteries for industrial applications”, en *2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 2015, pp. 1–6.
- [129] A. Bernardini *et al.*, “Technological solutions aiming at recovering metro braking energy: a multi-criteria analysis case study”, *Toward an Inclusive, Safe, Resilient Sustain. City Approaches Tools*, vol. 14, n° 2, pp. 65–89, 2014.
- [130] STIB, “Braking energy recovery on the metro network – RET (Rotterdam)”, Bruselas, Bélgica, 2014.
- [131] G. Podestá, “Acta de Reunión - Concar S.A.” Lima, Perú, 2020.

[132] Presidencia de la República, *Decreto Supremo N° 044-2020-PCM: Decreto Supremo que declara Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del brote del COVID-19*. Lima, Perú: El Peruano, 2020, pp. 10–13.

ANEXOS

Anexo 1. Diálogo telefónico con el Superintendente de Mantenimiento de la empresa Concar S.A., Piero Arana, a las 22:34 el lunes 20 de abril del 2020

- Gianfranco *Buenas tardes, Piero, quisiera hacerte unas preguntas sobre el*
(Tesisista): *estado actual de la Línea 1, haciendo hincapié en el uso del frenado regenerativo.*
- Piero Arana: *Sí claro, por supuesto.*
- Gianfranco *Perfecto, entonces empecemos. Desde que trabajas en este medio*
(Tesisista): *de transporte, ¿Cuáles son los problemas principales u oportunidades de mejora en la operación de la Línea 1?*
- Piero Arana: *La verdad hay bastantes. Desde la operación con la que los conductores manejan los trenes hasta en los problemas presentes en la infraestructura eléctrica. Lo que sí hemos notado, así como indicas con el uso del frenado regenerativo, es que la energía que se produce cuando los trenes frenan, se disipa en las parrillas en forma de calor, para no sobre cargar la Línea, ahí vemos una gran posibilidad de mejora.*
- Gianfranco *Si definitivamente, pero ahora ¿cuentan con alguna estimación o*
(Tesisista): *cálculo de cuánto representa esta energía?, ¿Saben algún porcentaje de su uso?*
- Piero Arana: *Bueno, previo al inicio de operaciones de los trenes Alstom Metrópoli, se realizó una estimación bajo condiciones óptimas y no tan reales, pero a partir de ahí por motivos de tiempo y trabajo no hemos logrado a hacer algo similar. Según las curvas de Voltaje y potencia en la Línea que contamos en el SCADA maso menos se puede ver que se produce este fenómeno reiteradas veces, pero por lo que no tenemos medidores de energía en cada tren aún no podemos estimarla. Si es que se logra hacer algo para estimar esta*

energía y aprovecharla adecuadamente, el ahorro potencial de esta energía puede ser sustancial en el beneficio económico.

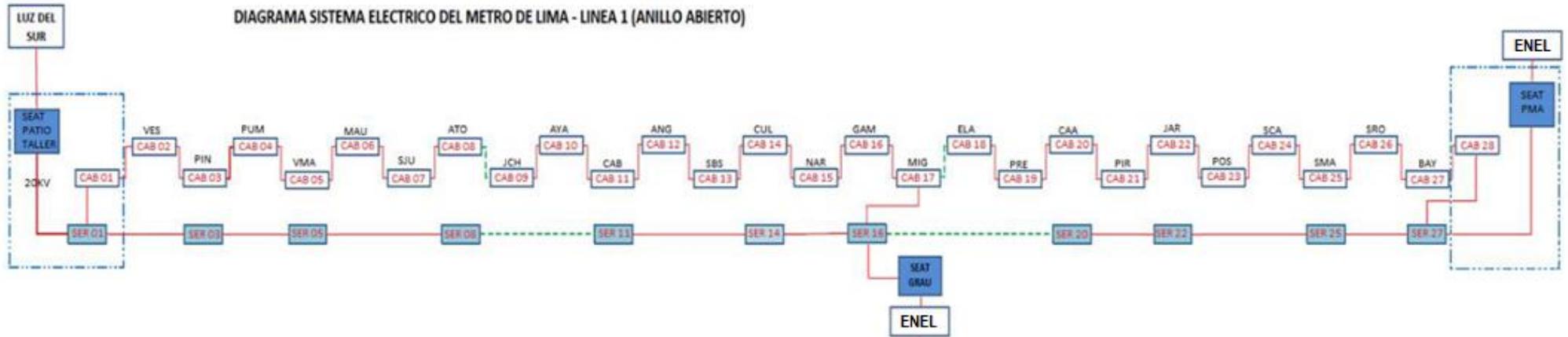
Gianfranco *Si, entiendo. Sé que el Metro se considera una carga crítica para*
(Tesisista): *el país, no sólo por la importancia de su uso, sino también por la cantidad de energía y potencia que consume. Un ahorro de energía vendría excelente, aunque sea el mínimo. He visto que en otros trenes se aplican tecnologías de almacenamiento con baterías o similares, o también que regresan esta energía a la Red en AC. ¿Tú crees que sea posible aplicar alguna?*

Piero Arana: *Deseo que sí. Habría que ver el ahorro energético y económico que nos daría, y sobre todo si la empresa está dispuesta a invertir en estos momentos. De todas maneras, se tendría que evaluar la compatibilidad técnica con la Línea, pero dudo que no sea factible ya que la gran mayoría de metros son similares en infraestructura.*

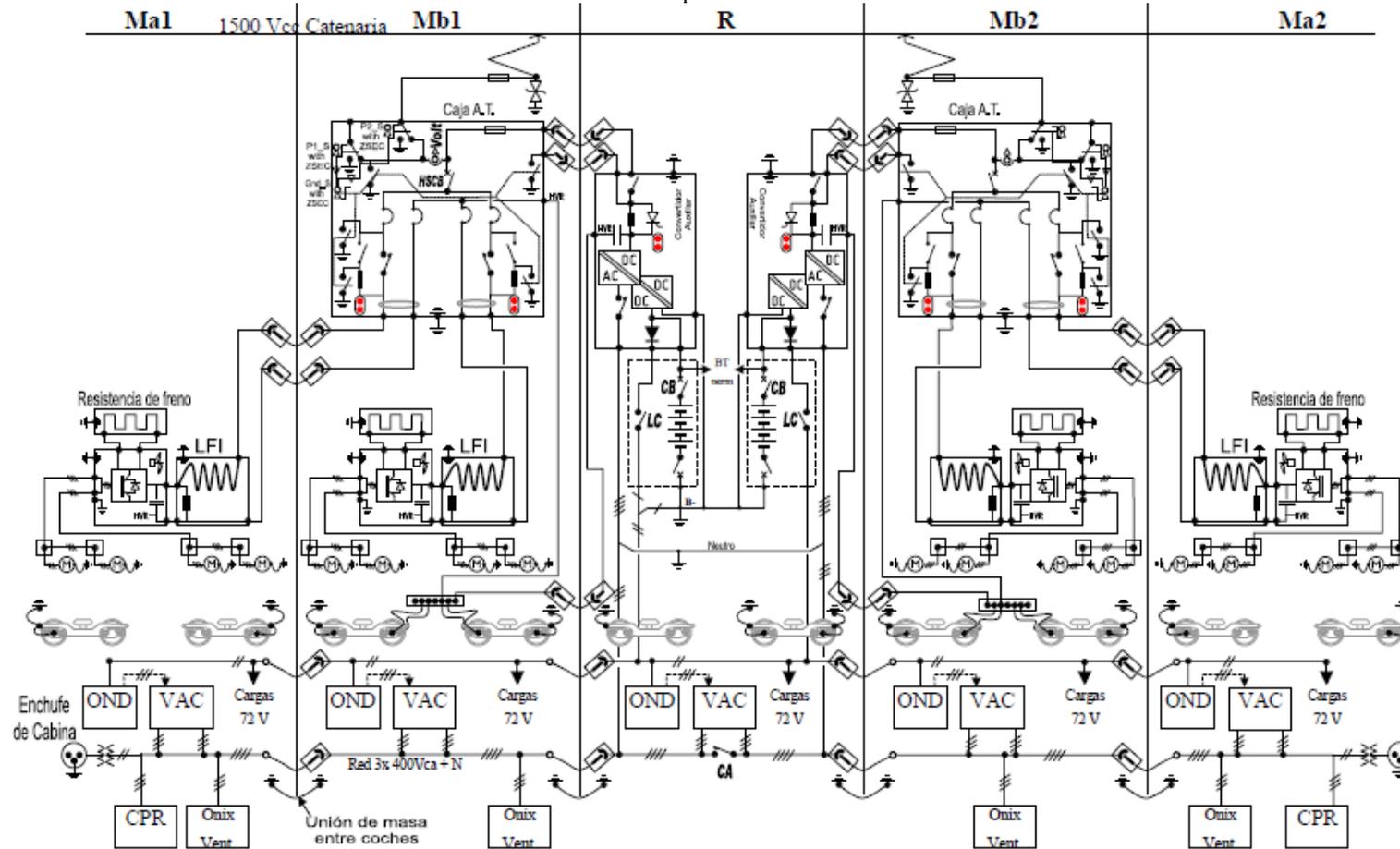
Gianfranco *¡Excelente! Gracias Piero por el tiempo y estamos en contacto.*
(Tesisista): *¡Suerte!*

Piero Arana: *¡Gracias a ti por la iniciativa! Cualquier cosa me avisas. ¡Saludos!*

Anexo 2. Diagrama Sistema Eléctrico del Metro de Lima - Línea 1 (Anillo Abierto)



Anexo 3. Esquema Eléctrico de Potencia Tren Alstom



Leyenda :

- CPR = compresor de aire
- LC = contactor de batería
- VAC = ventilación y aire acondicionado

- CA = Contactor acoplamiento redes 400 Vca
- > = Sólo ventilación en caso de pérdida de la red normal de 400 Vca
- CB = Interruptor automático protección batería
- HSCB = Disyuntor ultrarrápido (high speed circuit breaker)

SPA531041000_--_ ESQUEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Anexo 4. Marcadores y valores ingresados de los marcadores en la interfaz geoespacial de eTrax según PK

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de: [112], [113] y [114]

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
AL-1	0	200.46	-	-
VM-1	3	-	-	80
AL-2	167	200.46	-	-
AL-3	326	196.32	-	-
AL-4	812	184.27	-	-
AL-5	1017	180.72	-	-
AL-6	1294	171.05	-	-
AL-7	1410	170.60	-	-
AL-8	1541	169.95	-	-
AL-9	2022	154.01	-	-
AL-10	2331	143.20	-	-
AL-11	2484	137.99	-	-
AL-12	2656	131.96	-	-
C-1 (I)	2731	-	399	-
VM-2	2732	-	-	70
VM-3	2919	-	-	80
C-1 (F)	2923	-	399	-
AL-13	2990	124.56	-	-
AL-14	3242	124.56	-	-
AL-15	3360	124.56	-	-
VM-4	3420	-	-	70
C-2 (I)	3426	-	382	-
C-2 (F)	3600	-	382	-
VM-5	3603	-	-	80
AL-16	3764	134.53	-	-
VM-6	3842	-	-	70
C-3 (I)	3845	-	380	-
VM-7	4093	-	-	80
C-3 (F)	4094	-	380	-
AL-17	4111	145.48	-	-
VM-8	4153	-	-	70

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
VM-28	11143	-	-	80
AL-50	111	109.45	-	-
VM-29	11197	-	-	80
C-14 (F)	11201	-	3000	-
AL-51	11291	109.75	-	-
C-15 (I)	11455	-	3150	-
VM-30	11455	-	-	80
AL-52	11474	110.20	-	-
VM-31	11544	-	-	80
C-15 (F)	11548	-	3150	-
AL-53	11584	111.34	-	-
C-17 (I)	11830	-	198	-
C-16 (I)	11833	-	4000	-
VM-32	11835	-	-	80
C-16 (F)	11857	-	4000	-
VM-33	11858	-	-	80
AL-54	11884	112.84	-	-
VM-34	11928	-	-	51
AL-55	12022	115.05	-	-
C-17 (F)	12210	-	198	-
VM-35	12210	-	-	80
AL-56	12247	115.67	-	-
AL-57	12317	115.87	-	-
AL-58	12699	122.57	-	-
C-18 (I)	12789	-	382	-
VM-36	12791	-	-	70
VM-37	12962	-	-	80
C-18 (F)	12966	-	382	-
VM-38	12977	-	-	80
C-19 (I)	12979	-	1008	-
AL-59	13079	128.55	-	-

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
VM-61	22243	-	-	60
VM-62	21835	-	-	60
C-30 (F)	21848	-	302	-
AL-88	21909	196.26	-	-
C-31 (I)	21976	-	2500	-
VM-59	21977	-	-	60
C-31 (F)	21994	-	2500	-
C-32 (I)	22058	-	5500	-
VM-60	22058	-	-	80
C-32 (F)	22097	-	5500	-
AL-89	22199	197.74	-	-
C-33 (I)	22243	-	263	-
VM-61	22243	-	-	60
C-33 (F)	22390	-	263	-
AL-90	22444	196.51	-	-
C-34 (I)	22554	-	258	-
C-34 (F)	22856	-	258	-
AL-91	22871	195.46	-	-
AL-92	23041	203.10	-	-
C-35 (I)	23218	-	402	-
VM-63	23218	-	-	80
AL-93	23341	202.99	-	-
C-35 (F)	23457	-	402	-
AL-94	23475	203.10	-	-
C-36 (I)	23584	-	298	-
VM-64	23585	-	-	65
AL-95	23691	203.00	-	-
C-36 (F)	23778	-	298	-
AL-96	23846	200.01	-	-
C-37 (I)	23875	-	803	-
VM-65	23875	-	-	80

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
C-4 (I)	4154	-	383	-
C-4 (F)	4293	-	383	-
VM-9	4293	-	-	80
AL-18	4320	149.17	-	-
C-5 (I)	4332	-	193	-
VM-10	4333	-	-	50
AL-19	4431	151.27	-	-
VM-11	4528	-	-	80
C-5 (F)	4530	-	193	-
AL-20	4588	153.87	-	-
AL-21	4700	154.33	-	-
VM-12	4842	-	-	80
C-6 (I)	4844	-	766	-
VM-13	5005	-	-	80
C-6 (F)	5007	-	766	-
AL-22	5104	156.02	-	-
AL-23	5609	141.76	-	-
AL-24	5795	141.11	-	-
VM-14	5839	-	-	77
C-7 (I)	5841	-	461	-
AL-25	5904	140.74	-	-
AL-26	5960	140.66	-	-
AL-27	6046	140.43	-	-
VM-15	6142	-	-	80
C-7 (F)	6146	-	461	-
AL-28	6186	139.97	-	-
AL-29	6532	127.81	-	-
AL-30	6801	123.28	-	-
AL-31	6898	122.75	-	-
AL-32	7003	122.71	-	-
AL-33	7243	122.61	-	-
AL-34	7530	122.31	-	-
AL-35	7736	122.05	-	-

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
VM-39	13311	-	-	80
C-19 (F)	13313	-	1008	-
AL-60	13559	133.68	-	-
AL-61	13859	136.56	-	-
VM-40	13861	-	-	80
C-20 (I)	13862	-	585	-
VM-41	13977	-	-	80
C-20 (F)	13978	-	585	-
AL-62	14041	142.04	-	-
AL-63	14188	142.78	-	-
AL-64	14322	143.45	-	-
C-21 (I)	14676	-	4000	-
VM-42	14676	-	-	80
C-21 (F)	14697	-	4000	-
VM-43	14697	-	-	80
AL-65	15155	154.87	-	-
AL-66	15293	155.40	-	-
AL-67	15446	156.17	-	-
AL-68	15569	158.25	-	-
AL-69	16619	166.69	-	-
AL-70	16830	167.50	-	-
AL-71	17013	168.42	-	-
AL-72	17140	172.60	-	-
VM-44	17173	-	-	69
C-22 (I)	17174	-	374	-
AL-73	17440	174.44	-	-
VM-45	17669	-	-	80
C-22 (F)	17673	-	374	-
C-23 (I)	17762	-	319	-
VM-46	17763	-	-	65
AL-74	17821	168.55	-	-
C-24 (I)	18096	-	776	-
C-23 (F)	18096	-	319	-

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
C-37 (F)	24033	-	803	-
AL-97	24083	200.01	-	-
VM-66	24155	-	-	80
C-38 (I)	24162	-	448	-
C-38 (F)	24372	-	448	-
AL-98	24491	200.01	-	-
AL-99	25037	210.05	-	-
VM-67	25097	-	-	80
C-39 (I)	25103	-	698	-
C-39 (F)	25235	-	698	-
VM-68	25288	-	-	65
C-40 (I)	25293	-	352	-
AL-100	25301	218.62	-	-
C-40 (F)	25415	-	352	-
AL-101	25486	218.75	-	-
VM-69	25538	-	-	60
C-41 (I)	25543	-	257	-
C-41 (F)	25771	-	257	-
AL-102	25931	220.40	-	-
VM-70	26048	-	-	80
C-42 (I)	26054	-	402	-
C-42 (F)	26324	-	402	-
AL-103	26851	221.08	-	-
VM-71	27315	-	-	80
C-43 (I)	27328	-	598	-
VM-72	27498	-	-	80
C-43 (F)	27558	-	598	-
C-44 (I)	27728	-	3002	-
AL-104	27781	221.95	-	-
C-44 (F)	27842	-	3002	-
AL-105	27983	223.73	-	-
AL-106	28147	224.55	-	-
AL-107	28321	225.44	-	-

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
AL-36	8181	110.83	-	-
VM-16	8363	-	-	80
C-8 (I)	8376	-	1580	-
C-8 (F)	8430	-	1580	-
VM-17	8434	-	-	80
AL-37	8491	99.96	-	-
AL-38	8538	99.67	-	-
AL-39	8607	100.08	-	-
AL-40	8676	100.01	-	-
AL-41	8841	98.82	-	-
VM-18	9073	-	-	80
C-9 (I)	9075	-	1698	-
VM-19	9175	-	-	80
C-9 (F)	9181	-	1698	-
AL-42	9236	91.52	-	-
VM-20	9420	-	-	72
C-10 (I)	9423	-	403	-
VM-21	9672	-	-	80
C-10 (F)	9674	-	403	-
AL-43	9712	89.23	-	-
VM-22	9901	-	-	80
C-11 (I)	9903	-	815	-
VM-23	9997	-	-	80
C-11 (F)	10000	-	815	-
AL-44	10101	90.60	-	-
AL-45	10198	96.59	-	-
AL-46	10280	96.81	-	-
VM-24	10476	-	-	80
C-12 (I)	10478	-	764	-
AL-47	10513	98.23	-	-
VM-25	10618	-	-	80
C-12 (F)	10621	-	764	-
AL-48	10634	101.75	-	-

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
VM-47	18103	-	-	80
AL-75	18360	167.88	-	-
C-24 (F)	18388	-	776	-
VM-48	18396	-	-	80
AL-76	18522	168.71	-	-
AL-77	18789	170.04	-	-
VM-49	18794	-	-	80
C-25 (I)	18796	-	4900	-
VM-50	18829	-	-	80
C-25 (F)	18830	-	4900	-
AL-78	19216	170.04	-	-
AL-79	19531	171.70	-	-
AL-80	19652	172.30	-	-
VM-51	19962	-	-	72
C-26 (I)	19964	-	402	-
AL-81	20060	176.48	-	-
VM-52	20130	-	-	80
C-26 (F)	20132	-	402	-
AL-82	20259	176.48	-	-
VM-53	20370	-	-	63
C-27 (I)	20371	-	297	-
AL-83	20709	189.31	-	-
VM-54	20748	-	-	80
C-27 (F)	20749	-	297	-
VM-55	20887	-	-	80
AL-84	20832	189.30	-	-
AL-85	20952	189.30	-	-
AL-86	21141	189.30	-	-
C-28 (I)	21200	-	1198	-
VM-56	21200	-	-	80
C-28 (F)	21301	-	1198	-
C-29 (I)	21339	-	257	-
VM-57	21339	-	-	65

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
VM-73	28474	-	-	80
C-45 (I)	28479	-	498	-
C-45 (F)	29141	-	498	-
AL-108	29226	233.83	-	-
VM-74	29315	-	-	60
C-46 (I)	29319	-	322	-
C-46 (F)	29551	-	322	-
AL-109	29576	235.58	-	-
AL-110	29791	236.68	-	-
VM-75	30046	-	-	80
C-47 (I)	30051	-	798	-
C-47 (F)	30188	-	798	-
VM-76	30230	-	-	80
C-48 (I)	30235	-	598	-
C-48 (F)	30391	-	598	-
C-49 (I)	30478	-	398	-
VM-77	30478	-	-	80
C-49 (F)	30671	-	398	-
AL-111	30841	253.09	-	-
AL-114	31861	279.27	-	-
AL-112	30972	253.74	-	-
AL-113	31131	254.52	-	-
VM-78	31323	-	-	80
C-50 (I)	31328	-	702	-
C-50 (F)	31589	-	702	-
AL-115	32015	285.04	-	-
AL-116	32128	280.63	-	-
VM-79	32396	-	-	80
C-51 (I)	32401	-	6002	-
C-51 (F)	32517	-	6002	-
C-52 (I)	32661	-	6002	-
VM-80	32713	-	-	80
C-52 (F)	32719	-	6002	-

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
VM-26	10757	-	-	80
C-13 (I)	10758	-	3000	-
VM-27	10780	-	-	80
C-13 (F)	10781	-	3000	-
AL-49	11026	105.05	-	-
C-14 (I)	11045	-	3000	-

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
C-29 (F)	21570	-	257	-
AL-87	21641	194.92	-	-
C-30 (I)	21710	-	302	-
VM-58	21710	-	-	55
VM-59	21977	-	-	60
VM-60	22058	-	-	80

Item	Punto (Pk)	Altura (m)	Radio (m)	Vel. Máxima (km/h)
AL-117	33006	311.09	-	-
AL-118	33122	311.67	-	-
VM-81	33263	-	-	15
VM-82	33309	-	-	15
VM-83	33541	-	-	15

Anexo 5. Cargas consideradas para las Cabinas de la Línea 1

Fuente: “Mejoras Infraestructura L1- Metro Lima AC”, Siemens y GYM Ferrovías, 2017 [115]

Cabina	Carga (kVA)
CAB 01 VES / PATIO	2 x 400
CAB02 VES	186
CAB03 PIN	76
CAB04 PUM	80
CAB05 VMA	90
CAB 06 MAU	64
CAB07 SJU	78
CAB08 ATO	71
CAB09 JCH	72
CAB10 AYA	92
CAB11 CAB	73
CAB12 ANG	73
CAB13 SBS	74
CAB14 CUL	128

Cabina	Carga (kVA)
CAB15 NAR	76
CAB16 GAM	149
CAB17 MIG	124
CAB18 ELA	104
CAB19 PRE	118
CAB20 CAA	107
CAB21 PIR	117
CAB22 JAR	122
CAB23 POS	101
CAB24 SCA	118
CAB25 SMA	97
CAB26 SRO	122
CAB27 BAY	215
CAB28 PMA	350

Anexo 6. Longitudes para los tipos de cableado según los puntos de conexión.
Fuente: “Mejoras Infraestructura L1- Metro Lima AC”, Siemens y GYM Ferrovías, 2017 [115]

Desde	Hasta	Cableado	Longitud (m)
SER01	SER03	Cu 300 mm2 en Aire	2245
SER03	SER05	Cu 240 mm2 en Aire	3285
SER05	SER08	Cu 240 mm2 en Aire	4200
SER08	SER11	Cu 240 mm2 en Aire	3727
SER11	SER14	Cu 240 mm2 en Aire	4735
SER14	SER16	Cu 300 mm2 en Aire	2730
SER16	SER20	Cu 240 mm2 en Aire	4684
SER20	SER22	Cu 240 mm2 en Aire	2874
SER22	SER25	Cu 240 mm2 en Aire	4221
SER25	SER27	Cu 240 mm2 en Aire	2250
SER16	CAB17	Cu 70 mm2 en Aire	1406
SER01	CAB01	Cu 70 mm2 en Aire	400
CAB01	CAB02	Cu 70 mm2 en Aire	1115
CAB02	CAB03	Cu 70 mm2 en Aire	1513
CAB03	CAB04	Cu 70 mm2 en Aire	1810
CAB04	CAB05	Cu 70 mm2 en Aire	1640
CAB05	CAB06	Cu 70 mm2 en Aire	1150
CAB06	CAB07	Cu 70 mm2 en Aire	1100
CAB07	CAB08	Cu 70 mm2 en Aire	1790
CAB08	CAB09	Cu 70 mm2 en Aire	1691
CAB09	CAB10	Cu 70 mm2 en Aire	1240
CAB10	CAB11	Cu 70 mm2 en Aire	996

Desde	Hasta	Cableado	Longitud (m)
CAB11	CAB12	Cu 70 mm2 en Aire	2110
CAB12	CAB13	Cu 70 mm2 en Aire	1105
CAB13	CAB14	Cu 70 mm2 en Aire	1720
CAB14	CAB15	Cu 70 mm2 en Aire	1770
CAB15	CAB16	Cu 70 mm2 en Aire	1060
CAB16	CAB17	Cu 70 mm2 en Aire	1406
CAB17	CAB18	Cu 70 mm2 en Aire	1210
CAB18	CAB19	Cu 70 mm2 en Aire	665
CAB19	CAB20	Cu 70 mm2 en Aire	1713
CAB20	CAB21	Cu 70 mm2 en Aire	1509
CAB21	CAB22	Cu 70 mm2 en Aire	1465
CAB22	CAB23	Cu 70 mm2 en Aire	1398
CAB23	CAB24	Cu 70 mm2 en Aire	1532
CAB24	CAB25	Cu 70 mm2 en Aire	1491
CAB25	CAB26	Cu 70 mm2 en Aire	1143
CAB26	CAB27	Cu 70 mm2 en Aire	1207
CAB27	CAB28	Cu 70 mm2 en Aire	510
CAB28	SER27	Cu 70 mm2 en Aire	510
SEAT PAT	SER01	Cu 240 mm2 en Tierra	45
SEAT GRAU	SER16	Cu 240 mm2 en Tierra	1158
SEAT PMA	SER27	Cu 240 mm2 en Tierra	510

Anexo 7. Tiempos de recorrido de trenes entre estaciones para la vía Par e Impar

Vía Par	
Estación	Tiempo a próxima Estación
VES	2 min
PIN	3 min
PUM	2 min
VMA	2 min
MAU	2 min
SJU	3 min
ATO	2 min
JCH	2 min
AYA	2 min
CAB	2 min
ANG	2 min
SBS	2 min
CUL	3 min
NAR	2 min
GAM	2 min
MIG	2 min
ELA	2 min
PRE	3 min
CAA	2 min
PIR	2 min
JAR	2 min
POS	2 min
SCA	2 min
SMA	2 min
SRO	2 min
BAY	2 min

Vía Impar	
Estación	Tiempo a próxima Estación
BAY	2 min
SRO	2 min
SMA	2 min
SCA	2 min
POS	2 min
JAR	2 min
PIR	2 min
CAA	3 min
PRE	2 min
ELA	2 min
MIG	2 min
GAM	2 min
NAR	3 min
CUL	2 min
SBS	2 min
ANG	3 min
CAB	2 min
AYA	2 min
JCH	2 min
ATO	3 min
SJU	2 min
MAU	2 min
VMA	2 min
PUM	2 min
PIN	2 min
VES	2 min