

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL FRENADO
REGENERATIVO PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE ELÉCTRICO MASIVO TIPO
METRO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA:

INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de

INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL FRENADO
REGENERATIVO PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE ELÉCTRICO MASIVO
TIPO METRO

AUTOR:

STALIN SANTIAGO PULUPA MUZO

TUTOR:

ROGELIO ALFREDO ORIZONDO MARTÍNEZ

Quito, febrero del 2022

Stalin Santiago Pulupa Muzo

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL
FRENADO REGENERATIVO PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE
ELÉCTRICO MASIVO TIPO METRO

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2022
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Stalin Santiago Pulupa Muzo (Y'1994 -M' 8). Realizó sus estudios secundarios en “Colegio Instituto Tecnológico Superior Central Técnico”, se graduó de bachiller en “Instalaciones, equipos y maquinas eléctricas”. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en Almacenamiento de energía eléctrica mediante el frenado regenerativo para el sistema de transporte eléctrico masivo tipo metro. **spulupam@est.ups.edu.ec**

Dirigido por:



Rogelio Alfredo Orizondo Martínez (Y'1972 -M'1). Nació en Caracas, Venezuela. Recibió su título en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Simón Bolívar en 1999 y el MSc. en la Universidad Simón Bolívar en 2006. Actualmente es docente en la Universidad Politécnica Salesiana. Sus áreas de investigación incluyen electrónica de potencia, especialmente FACTS, sistemas de puesta a tierra y protección catódica. **rORIZONDO@ups.edu.ec**

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Rogelio Alfredo Orizondo Martínez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación Almacenamiento de energía eléctrica mediante el frenado regenerativo para el sistema de transporte eléctrico masivo tipo metro realizado por Stalin Santiago Pulupa Muzo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, Febrero 2022



.....
Rogelio Alfredo Orizondo Martínez
Cédula de identidad: 1757424195

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo , Stalin Santiago Pulupa Muzo, con documento de identificación N° 1723067367, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: Almacenamiento de energía eléctrica mediante el frenado regenerativo para el sistema de transporte eléctrico masivo tipo metro, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, Febrero 2022



.....
Nombre: Stalin Santiago Pulupa Muzo
Cédula: 1723067367

ÍNDICE GENERAL

1.	Introducción.....	10
2.	Marco Teórico	13
2.1.	Frenado regenerativo	13
2.2.	Consumo y operación del metro.....	15
2.3.	Supercapacitores.....	16
3.	Materiales, fuentes y métodos	17
3.1.	Recopilación de datos.....	17
3.2.	Modelo matemático.....	17
4.	Resultados	24
4.1.	Escenario 1	24
4.2.	Escenario 2	26
4.3.	Escenario 3	28
4.4.	Escenario 4	31
5.	Conclusiones	33
6.	Trabajos futuros.....	34
7.	Referencias	35
8.	Matriz de Estado del Arte.....	40
9.	Anexos.....	49
	ANEXO A	49
	ANEXO B.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de recuperación y almacenamiento de la energía de un sistema de transporte masivo tipo metro [Autor]	12
Figura 2: Funcionamiento del frenado regenerativo de un transporte masivo tipo metro con almacenamiento [Autor]	14
Figura 3: Esquema de un supercapacitor de doble capa [Autor].....	16
Figura 4: Modelo simulink del módulo de almacenamiento de energía con supercapacitores, ecuaciones 5, 6, 8 y 9 [Autor]	19
Figura 5: Modelo en simulink de la ecuación (8), cálculo de $V1$ [Autor].....	20
Figura 6: Modelo de simulación del perfil energético de trazado de línea 1 de metro de Quito y obtención del SOC en Simulink [Autor]	22
Figura 7: Flujograma para el dimensionamiento del almacenamiento de energía con supercapacitores [Autor].....	23
Figura 8: Trazado de la línea 1 del metro de Quito [Autor]	23
Figura 9: Perfil de potencia del caso 1 [Autor]	24
Figura 10: Perfil de energía del caso 1 [Autor]	25
Figura 11: Voltaje de supercapacitores caso 1 [Autor]	26
Figura 12: Perfil de potencia del caso 2 [Autor]	27
Figura 13: Perfil de energía del caso 2 [Autor]	27
Figura 14: Voltaje de supercapacitores caso 2 [Autor]	28
Figura 15: Perfil de potencia del caso 3 [Autor]	29
Figura 16: Perfil de energía del caso 3 [Autor]	30
Figura 17: Voltaje de supercapacitores caso 3 [Autor]	31
Figura 18: Perfil de potencia del caso 4 [Autor]	31
Figura 19: Perfil de energía del caso 4 [Autor]	32
Figura 20: Voltaje de supercapacitores caso 4 [Autor]	33
Figura 21: Detalle de las estaciones Norte Metro de Quito [Autor].....	49
Figura 22: Detalle de las estaciones Centro-Sur Quito [Autor].....	50
Figura 23: Detalle de las Estaciones del Sur del metro de Quito [Autor]	51
Figura 24: Hoja de datos del supercapacitor BCAP3000	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos del supercapacitor para el sistema de almacenamiento de la energía [Autor]	20
Tabla 2: Características de la línea 1 del metro de Quito [Autor]	20
Tabla 3: Valores de energía consumida y recuperada por parada del escenario 1 [Autor]	25
Tabla 4: Número de elementos del arreglo de supercapacitores [Autor]	26
Tabla 5: Valores de energía consumida y recuperada por parada del escenario 2 [Autor]	28
Tabla 6: Valores de energía consumida y recuperada por parada del escenario 3 [Autor]	30
Tabla 7: Valores de energía consumida y recuperada por parada del escenario 4 [Autor]	32

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL FRENADO REGENERATIVO PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE ELÉCTRICO MASIVO TIPO METRO

Resumen

Este artículo propone plantear un modelo matemático para el diseño del sistema de almacenamiento de la energía que se recupera en un vehículo, en el contexto del funcionamiento de un sistema de transporte masivo eléctrico tipo metro. Para realizar adecuadamente la tarea por medio de supercapacitores, se toman en cuenta los cambios en las magnitudes físicas que afectan directamente los consumos y recuperaciones energéticas que se obtienen por medio de simulaciones sucesivas georreferenciadas con SUMO, de tal software se obtiene la potencia requerida en cada momento del recorrido y que es dato de entrada del modelo de los elementos de almacenamiento en Simulink de Matlab. Se plantea la estrategia para determinar la cantidad de energía disponible en diferentes escenarios, mismos que modifican la forma en que han sido aplicados los frenos eléctricos regenerativos. Aspectos como la demanda que genera el transporte masivo tipo metro, el frenado regenerativo y los supercapacitores también se abordan. Los resultados de este modelo incluyen la obtención del voltaje en el sistema de almacenaje durante todo el trayecto del metro.

Palabras Clave: frenado regenerativo, almacenamiento de energía eléctrica, transporte masivo, supercapacitores.

Abstract

This paper proposes a mathematical model for the design of the storage system. This system is for the energy that is recovered in a huge vehicle. The vehicle is employed on context of an electric massive transportation as a subway. In order to accomplish the task with supercapacitors, some aspects are taken into account. The physical variables that affect directly the electrical energy consumption and recovery. The energy profile is obtained through successive georeferenced simulations on SUMO. The software allows to get the power that is required on every moment of the simulated journey. This data is employed as input for the model of storage elements on Simulink. Then, the authors propose a strategy to establish the quantity of energy that is available on different type of scenarios that are established on this paper. The changes modify the way electric regenerative braking is employed. Some aspects that the authors take account include the passengers demand, acceleration, deceleration and speed of a subway. The regenerative braking and supercapacitors main characteristics are also approached. The results of math modelling include to get the voltage on the storage system during all the journey of the subway.

Keywords: regenerative braking, electric energy storage, massive transportation, super capacitors.

1. Introducción

Las necesidades de utilización de la energía alrededor del mundo continúan incrementándose con el paso del tiempo, siendo diversas las industrias en las cuales es requerida en mayores cantidades; en un caso específico, la industria del transporte masivo es una de las mayores consumidoras de energía en un sistema de potencia [1][2][3][4].

Entre los sistemas que forman parte de una red de transporte se encuentran trenes, metros, tranvías y otros que emplean directamente la energía eléctrica. En este contexto, los sistemas de trenes subterráneos tipo metro resultan siendo los componentes más importantes de transporte masivo de personas en las grandes urbes alrededor del mundo, debido a varias ventajas como su gran capacidad, alta velocidad, seguridad y puntualidad [5][6][7].

En los grandes vehículos de transporte tradicionales la energía de frenado se disipa mediante elementos resistivos que se encuentran dentro de los vagones o es intercambiada con otros trenes, pero para una correcta aplicación de tal intercambio es necesaria la generación y utilización de tablas de tiempo precisas [8][9].

Los sistemas urbanos de transporte eléctrico son eficientes y en las fases de frenado de sus recorridos pueden recuperar parte de la energía que consumen, misma que puede ser reutilizada en el mismo instante por otras unidades de transporte o también existe la posibilidad de almacenarla aunque no en su totalidad; siempre que

los límites de voltaje y del sistema de suministro de la energía no sean sobrepasados [10].

En la actualidad, hay trenes que incorporan otros motores adicionales a los que permiten el movimiento, mismos que permiten tener la capacidad de frenado regenerativo; en este sentido técnicamente hablando, durante la desaceleración los motores actúan como generadores produciendo energía eléctrica, misma que puede ser inyectada al riel que distribuye la energía a los trenes para ser aprovechada por otros trenes y cargas del sistema [11][12][13].

Otra técnica de aprovechar la energía recuperada es mediante la colocación de elementos de almacenamiento de energía que se pueden encontrar junto a la línea de operación de las unidades de transporte o también se pueden encontrar dentro de los trenes y vagones del sistema de transporte masiva; en ese sentido, la energía recuperada puede ser empleada posteriormente; lo que requiere que sea instalada una cantidad elevada de elementos de almacenamiento que deben ser correctamente dimensionados de tal forma que los almacenadores de energía operen dentro de sus límites y la vida útil de los mismo no se vea afectada [12][14].

Si los sistemas de almacenamiento no están correctamente dimensionados, el voltaje en la línea de transmisión de la energía puede elevarse, lo que también puede conducir a fallas de los componentes del sistema de

regeneración, así también desperdicio de la energía [15].

El dimensionamiento de los componentes de almacenamiento de la energía recuperada ha sido abordado de diferentes maneras; en muchos casos empleando dos tipos de elemento de almacenaje de energía, conocidos como sistemas híbridos de almacenamiento, mismos que son utilizados por las características de funcionamiento de cada componente [16][17]. El uso de sistemas de almacenamiento de la energía supone varias ventajas para el sistema eléctrico en general, incluyendo la estabilización del voltaje de funcionamiento, la eficiencia de energía por la recuperación, también puede actuar como suministro de energía de emergencia y provocar la estabilidad del funcionamiento y operación [18].

En el caso específico de los supercapacitores, elementos que tienen una alta densidad de energía para ser almacenada, los sistemas de almacenaje de la energía recuperada, normalmente se componen de grandes arreglos de elementos en serie y paralelo, cuya principal ventaja frente al tradicional uso de baterías es que la estimación del estado de la carga (SoC) no requiere de complejos algoritmos, sino que puede ser medida en forma simple al determinar la magnitud del voltaje en los terminales del arreglo de supercapacitores [16][19].

Otra motivación para la utilización de supercapacitores como los elementos de almacenaje de la energía regenerada es que estos elementos se ajustan

adecuadamente a las necesidades específicas de la aplicación incluyendo la cantidad de ciclos de carga y descarga que tendrán durante la vida útil del arreglo, los tiempos relativamente cortos de carga y descarga, así como los altos valores de potencia de carga y descarga que deben ser capaces de soportar [20].

El problema del dimensionamiento del sistema de almacenamiento de la energía en [18] es abordado como un marco en el cual la optimización juega un papel fundamental siendo los objetivos el dimensionamiento preciso y la elevación del ciclo de vida de los elementos basados en un modelamiento de la degradación de las baterías y ultracapacitores. Usando un modelo multiobjetivo, se determina que bajo varios modelos de demanda y uso de un vehículo efectivamente pudieron introducir una herramienta que permite determinar la cantidad de elementos necesarios para almacenar la energía en un esquema híbrida y la expectativa de vida útil de tales elementos.

La propuesta que se presenta en [21] consiste en la utilización de un algoritmo de optimización de partículas dispersas en el que los autores no solamente dimensionan el sistema de almacenamiento sino que escogen el tipo de tecnología a emplearse entre tres opciones: solo baterías de ion de litio, solo supercapacitores y un sistema híbrido. Los resultados obtenidos que luego del análisis con simulación de las operaciones diarias de carga y descarga en los vehículos, con indicadores

cualitativos y cuantitativos, muestran problemas debido al elevado número de restricciones existentes, volviendo a la propuesta poco práctica de establecer. El comportamiento o los ciclos de funcionamiento de los vehículos y la influencia que tal característica tiene en el dimensionamiento de los dispositivos de almacenamiento de la energía es el objeto de estudio de [22]; en tal documento, los autores plantean una serie de pruebas con variables físicas estandarizadas de velocidad y en diferentes pendientes que se emplean para poder entender los niveles de consumo que tiene el vehículo en tales condiciones, pero también los medios de transporte son puestos a prueba en condiciones de conducción normales que incluyen eventos como el tráfico ciudadano, paradas programadas y otras. La metodología de dimensionamiento se basa en la revisión de perfiles de consumo y potencia en cada ciclo de trabajo planteado, siendo también analizado el rendimiento de baterías de baja densidad, alta densidad y con supercapacitores. Los investigadores también determinan que los ciclos de manejo y comportamientos del conductor no son relevantes en el

dimensionamiento del sistema de almacenamiento de la energía.

El trabajo establecido en [23] plantea un dimensionamiento de varios tipos de acumuladores de energía considerando variables como son la masa, el volumen y el costo de cada tipo de tecnología. Después de establecer la cantidad de dispositivos por tecnología es posible ejecutar una gestión de la potencia en los vehículos con el objetivo de que el rendimiento del sistema eléctrico de un medio de transporte mejore, en especial en determinados espacios de tiempo que son considerados como críticos y también se establece que la limitante de considerar una masa fija de los vehículos puede resultar contraproducente al problema de dimensionamiento de baterías y supercapacitores.

La propuesta establecida en el presente documento para el dimensionamiento de un sistema de almacenamiento de la energía por medio de supercapacitores, está basada en lo planteado en [24] y puede ser analizada de mejor forma mediante la figura 1, donde se considera la existencia de un sistema híbrido compuesto para acumular la energía que se genera mediante paneles fotovoltaicos. El sistema está

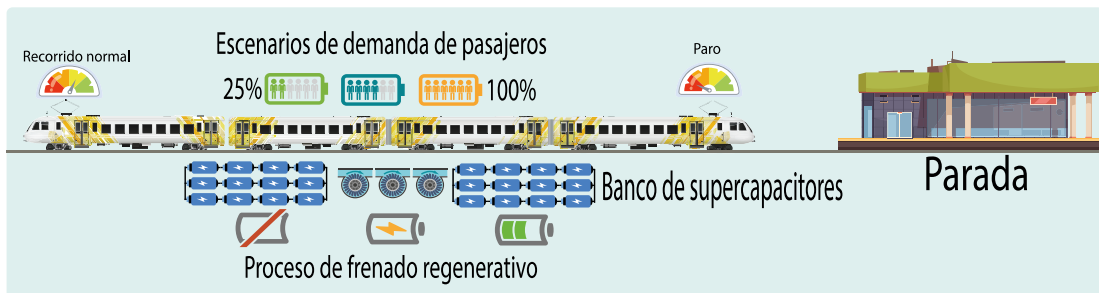


Figura 1: Sistema de recuperación y almacenamiento de la energía de un sistema de transporte masivo tipo metro [Autor]

compuesto de baterías, supercapacitores y cada elemento de almacenamiento se modela en forma independiente.

en el caso específico del supercapacitor se utiliza un modelo equivalente tipo resistencia-capacitor (RC) cuyas características específicas se encuentran en las hojas de datos de cada capacitor de doble capa. En el documento se encuentran los resultados de la carga y descarga de las baterías y los supercapacitores en diversas condiciones y trabajando en conjunto en conexión paralela y conectados a una barra con voltaje fijo que alimenta las cargas existentes en DC, lo que tiene similitudes en funcionamiento al sistema eléctrico planteado para que funcione en el transporte masivo tipo metro.

El presente documento está organizado de la siguiente forma: en la sección II se presentarán los aspectos más relevantes respecto al funcionamiento del frenado regenerativo, así como las características significativas que tienen los supercapacitores, que son los componentes de mayor significancia para la presente propuesta. En la sección III una vez los aspectos teóricos se han establecido, se procederá a revisar la metodología de simulación-modelamiento que se va a seguir para obtenerse los resultados planteados en un primer instante. En este sentido lo ejecutado mediante el software de micro simulación SUMO, así como lo establecido como el principal problema a ser resuelto, es decir el dimensionamiento de los

supercapacitores mediante el modelamiento del circuito equivalente y sus respectivas ecuaciones son planteadas. En esta sección también se plantean las características del caso específico de estudio que se aborda, así como de los cambios de variables físicas que se analizan para obtenerse la mejor alternativa de dimensionamiento, conforme las condiciones de operación y eléctricas del medio de transporte específica que se está estudiando.

En la sección IV se establecen los resultados obtenidos respecto a la carga y descarga de los supercapacitores en diversas formas de operación y condiciones de funcionamiento, las cuales son relevantes para comprobar el correcto dimensionamiento del sistema de acumulación de la energía planteado. Para finalizar la sección V establece las conclusiones derivadas de la presente investigación.

2. Marco Teórico

En los sucesivos se muestran los aspectos teóricos fundamentales para comprender el perfil energético que se maneja en un sistema de transporte masivo tipo metro, esto es el frenado con regeneración, los consumos de un metro y cómo funcionan los supercapacitores.

2.1. Frenado regenerativo

El freno regenerativo es una tecnología fundamental para el incremento de la eficiencia operacional de cualquier vehículo que contenga motores eléctricos y que además esté equipado

con unidades de almacenamiento de la energía que se recupera, sean tales unidades baterías o ultracapacitores. Los estudios demuestran que un adecuado sistema de frenado regenerativo puede aumentar la eficiencia de uso de la energía hasta en un 40% [25].

El frenado es la operación de reducción de la velocidad que se produce por diferentes tipos de sistemas denominados frenos, en el caso específico del presente documento el freno de interés está clasificado como electrodinámico [26]. Los frenos eléctricos pueden ser reostáticos, también conocidos como dinámicos o de tipo regenerativo; estos últimos son los que producen fuerza de frenado usando motores de tracción como generadores. Ambos tipos de freno producen una fuerza en los ejes de las ruedas, misma que luego permite la reducción de la velocidad de los vagones que componen un sistema masivo de transporte. En los frenos regeneradores la fuerza cinética que se produce en el proceso descrito es aprovechada para generar energía eléctrica mediante un típico proceso de conversión por máquina motriz y luego puede ser retornada al sistema eléctrico del mismo vehículo, de otro vehículo o almacenada según sea requerido, reduciendo en ciertos momentos del trazado, la dependencia del medio de transporte de la energía que proviene de la red pública de distribución, este

hecho se evidencia con facilidad en la figura 2 [27]–[30].

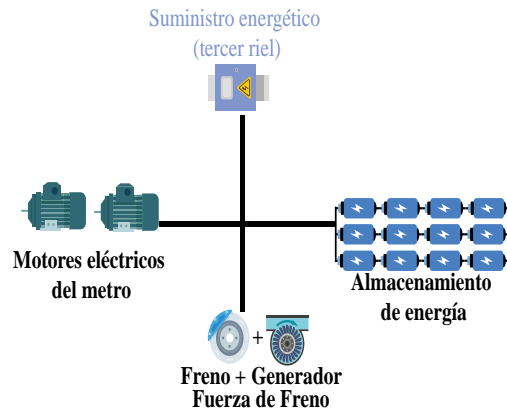


Figura 2: Funcionamiento del frenado regenerativo de un transporte masivo tipo metro con almacenamiento [Autor]

Este sistema aprovecha en forma eficiente la energía cinética, es decir usa la energía que posee un objeto como consecuencia del estado de movimiento en el que se encuentra. La fórmula de energía cinética se expone a continuación:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Donde

m: masa (kg)

v: velocidad (m/s)

Tal expresión hace alusión al hecho de que un objeto en movimiento puede realizar un trabajo (w), sobre cualquier otro componente que colisiones con este.

En el caso específico del frenado regenerativo aplicado en sistemas de trasportación masiva subterráneos, la energía regenerada se procura maximizar aprovechando todos los instantes de desaceleración de los trenes

mediante el reajuste del funcionamiento, incluyendo los horarios de trabajo. Hablando en forma general la energía que se regenera puede ser usada en diversas formas, incluyendo el suministro de los servicios auxiliares del medio de transporte, incluyendo aire acondicionado, iluminación, por nombrar otros, esta forma de reutilización suele ser inmediata y sin necesidad de componentes de almacenamiento [31].

Otra forma más común de uso de la energía es el almacenamiento de la energía para ser reutilizada posteriormente, en este caso los componentes de almacenaje pueden estar dentro de los vagones del metro o también junto al trazado en el que operan las unidades subterráneas. Pero la energía también enviada a la línea de alimentación para que pueda ser utilizada por otras unidades de transporte que estén siendo alimentadas por las mismas subestaciones. Para el análisis correcto de este tipo de aprovechamiento de la energía recuperada, cada unidad de transporte es entendida como una micro-red que tienen componentes que generan, cargan y almacenamiento que operan al mismo tiempo [30].

2.2. Consumo y operación del metro

El uso de la energía en medios de transporte urbanos subterráneos se puede clasificar en dos categorías, los

consumos de tracción y los que no tienen relación con la tracción. En la primera categoría están incluidos no sólo los que permiten el movimiento de las unidades sino también los sistemas auxiliares que están operando en modelo de revisión, es decir todo lo requerido para que los vagones se mantengan rodando en todo el trayecto. Los consumos que no tienen relación con la tracción en cambio refieren a la energía que es empleada en estaciones, zonas de descanso y otras instalaciones incluyendo los ventiladores del túnel, señalización, bombas de agua, entre otros [32].

A diferencia de las unidades de transporte que funcionan con motores de combustión interna donde la energía requerida para el movimiento está dentro de la misma unidad; en las unidades eléctricas de transporte masivo es requerida una fuente de suministro externa de la energía que es transmitida a los trenes a través de una línea de distribución de la energía conocida como tercer riel. Los motores de las unidades de transporte pueden funcionar tanto con corriente alterna como continua, aunque esta última es la más común, tienen voltajes de operación que suelen ser 750, 1500 o hasta 3000 VCC [11],[32].

En lo referente al perfil de consumo de la energía, es conocido que un transporte de las características mencionadas tiene tres fases operativas, la aceleración, momento en que gran cantidad de energía es absorbida por las

unidades de potencia y dura hasta que el transporte alcanza su velocidad máxima, la cantidad de energía varía en función de la tasa de aceleración, así como de la velocidad inicial y final. Después, durante determinada cantidad de tiempo, el tren mantiene su velocidad y la potencia que requiere es mínima, y es la requerida para superar pendientes, curvas y otros. Finalmente se pasa a la fase de desaceleración; estado que es el más relevante para la presente investigación. En este punto las unidades generadoras previstas para el efecto son capaces de regenerar la energía consumida en las fases previas; la cantidad total depende de energía recuperada depende de la tasa de desaceleración, así como las velocidades iniciales que se presenten en cada periodo del trazado que siguen los metros [33][34].

2.3. Supercapacitores

Los supercapacitores son capacitores electrolíticos que son construidos en forma diferente a los capacitores ordinarios. Los supercapacitores son dispositivos de almacenamiento de energía instantáneos que almacenan electrostáticamente la energía en electrodos porosos que están contruidos típicamente de carbón que evitan las limitaciones de los electrodos metálicos de un capacitor tradicional, además cuentan con un diafragma que evita que existan cortocircuitos entre las diferentes capas de los supercapacitores. Debido a ello tienen densidades de energía mayores, reducida dependencia

de la temperatura y degradación inferior; aunque en otro sentido, aún no se ha podido llegar a las densidades energéticas que tienen las baterías de ion de litio ni a los costos reducidos de tal tecnología [19],[35][36]. En la figura se presentan dos electrodos de carbono, las cuales presentan doble capa de interfaz electrolítica de carga.

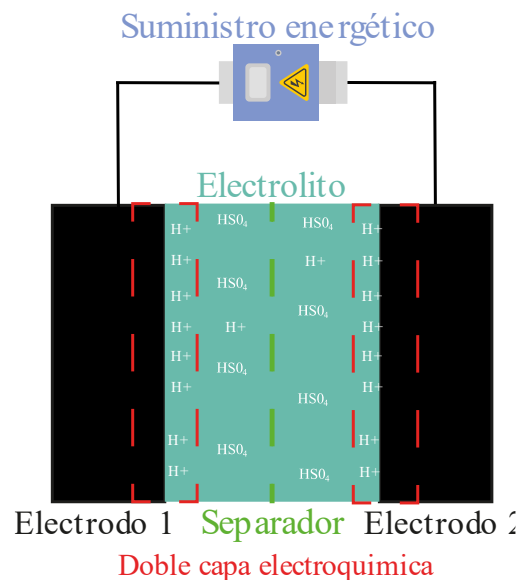


Figura 3: Esquema de un supercapacitor de doble capa
[Autor]

Los capacitores de doble capa también pueden ser entendidos como elementos que están en medio de los capacitores estáticos y las baterías química con velocidad elevada de carga y descarga, así también buena protección medioambiental, además es una tecnología que continuamente está siendo mejorada en sus procesos constructivos, para lo cual lo procesos adecuados de simulación como el presentado en la actual propuesta serán fundamentales [36]. Debido a la alta capacidad disponible, normalmente los

supercapacitores han sido empleados para el almacenamiento de los excedentes de energía regenerada. Otro motivo para tal elección es el elevado ciclo de vida útil que tienen estos elementos. En diversos estudios hechos en vehículos urbanos personales eléctricos también demuestran la utilidad de los capacitores de doble capa, concluyendo que los mismos también puede ser usada en trenes urbanos de alta capacidad, sabiendo que comparando con las baterías la potencia disponible es superior aunque la energía almacenada es inferior [37]. La cantidad de energía que se puede almacenar en este tipo de capacitor se expresa con la ecuación (2).

$$E_c = \frac{1}{2} C v^2 \quad (2)$$

Donde:

C: Capacitancia

v: Diferencia de potencial o voltaje de operación

Por otro lado, la potencia se refiere a la capacidad del elemento de alojar e inyectar carga según se requiera. Mientras mayor sea la potencia, es más rápida la acción con la que el supercapacitor puede ejecutar tales acciones. Para expresar lo mencionado se entiende que los capacitores tienen una resistencia eléctrica equivalente (ESR), misma que genera una caída de voltaje que afecta el rendimiento de la entrega y absorción de potencia, esto se expresa con la ecuación (3) que muestra la máxima potencia.

$$V_{max} = \frac{v^2}{4 * ESR} \quad (3)$$

Donde:

ESR: Resistencia eléctrica equivalente

v: Voltaje de la fuente o suministro

Vmax: Voltaje máximo aplicable a los supercapacitores

3. Materiales, fuentes y métodos

3.1. Recopilación de datos

En lo sucesivo se presentan los dos componentes más relevantes de la presente investigación, la forma en la que se ejecutaron las diversas simulaciones por medio de SUMO para obtener los perfiles energéticos del metro de la ciudad de Quito a lo largo de todo su trayecto, así también la estructura que se ha planteado en una herramienta de procesamiento matemático para la simulación adecuada del funcionamiento de los supercapacitores con las respectivas cargas y descargas de tales elementos en cada etapa del trazado que sigue el medio de transporte planteado; misma en la que posteriormente se comprueba la efectividad del proceso de dimensionamiento de la componente de almacenamiento de la energía que se regenera en todo el trayecto; todo ello basado en la utilización del circuito equivalente del supercapacitor.

3.2. Modelo matemático

Como se había mencionado previamente, los supercapacitores son

una tecnología muy promisoría para distintas aplicaciones, debido a que la energía que se almacena en forma de campo eléctrico entre los electrodos porosos es elevada.

Otra de las características que debe ser tomada en cuenta para el modelamiento de los capacitores es su bajo voltaje de celda y que se debe color en cada uno de sus terminales. Es por ello que los módulos de almacenamiento de la energía para una aplicación como la propuesta en el presente documento debe ser construida como una combinación de conexiones en serie y en paralelo para alcanzar la capacidad y voltaje requeridos.

En lo sucesivo, para poder establecer en forma adecuada la estructura con lo que puede ser analizado matemáticamente un supercapacitor, se plantea un modelo de circuito equivalente de tal elemento con un formato de dos ramales, que puede ser dividido en tres partes, cada una representa el comportamiento de todo el capacitor de doble capa, esto es una zona compuesta por una resistencia equivalente en paralelo R_f y que representa las pérdidas típicas del elemento.

Luego se encuentra la zona denominada celda principal que contiene una resistencia equivalente en serie R_1 , luego un capacitor equivalente que tiene un valor de capacitancia que es variable en paralelo C_1 . Finalmente se encuentra la celda lenta, en donde se ubica una resistencia equivalente en serie R_2 y un capacitor equivalente en paralelo de valor fijo C_2 .

El ramal principal equivale a la respuesta inmediata del supercapacitor durante los eventos de carga y descarga en un rango de tiempo de pocos segundos. La resistencia interna R_1 representa el desperdicio de potencia por el calentamiento interno de los componentes en la carga y descarga, típicamente está en el orden de los mili-ohmios. Por otro lado, el valor de la capacitancia variable C_1 depende directamente del valor de voltaje V_1 que circula a través del mismo, y que se expresa mediante (4)

$$C_1 = C_0 + C_v V_1 \quad (4)$$

En este caso la capacitancia C_0 es un valor constante en Faradios y C_v es un factor constante que es expresado en Faradios/Voltio. A continuación, se encuentra el ramal lento, mismo que representa la distribución de la energía interna al final de los ciclos de carga y descarga en un rango de minutos, así mismo la resistencia de pérdidas R_f describe la fuga de corriente que se produce cuando el supercapacitor está en reposo; propiedad que no puede ser considerada en ciclos de carga y descarga que se producen rápidamente. Con lo mencionado es posible obtener el voltaje que representa el estado de carga del supercapacitor V_{SC} y que se representa mediante (5).

$$V_{sc} = N_S U_{SC} = N_S (V_1 + R_1 \frac{I_{SC}}{N_P}) \quad (5)$$

Donde:

N_S : número de supercapacitores en serie
 N_P : número de supercapacitores en paralelo

U_{SC} : Voltaje de la celda

I_{sc} : Corriente del módulo de supercapacitores

En lo relativo a la celda lenta, la expresión de voltaje V_2 que se puede expresar con (6) y está en función del circuito de la figura 4

$$V_2 = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = \frac{1}{C_2} \int \frac{1}{R_2} (V_1 - V_2) dt \quad (6)$$

Por otro lado, el voltaje del equivalente de la celda principal V_1 se expresa por medio de (7)

$$V_1 = \frac{-C_0 + \sqrt{C_0^2 + 2C_v Q_1}}{C_v} \quad (7)$$

Donde:

Q_1 : Valor de la carga instantánea del capacitor C_1

El valor de tal carga se expresa en (8)

$$Q_1 = C_0 V_1 + \frac{1}{2} C_v V_1^2 \quad (8)$$

Q_1 también se puede expresar mediante la ecuación (9)

$$Q_1 = \int (i_{sc} - i_2) dt \quad (9)$$

Que, al igual que la ecuación 5, también se expresa mediante estructuras matemáticas de Simulink en la figura 4. Una vez que se tienen las ecuaciones que representan el funcionamiento de un módulo de supercapacitores y en especial su estado de carga (SOC) representado por V_{sc} , el siguiente paso consiste en la utilización de bloques de representación de todas estas ecuaciones en la herramienta que forma parte de Matlab denominada Simulink, en la figura 4, se puede observar la implementación del supercapacitor por medio de su representación matemática y los bloques matemáticos de simulink.

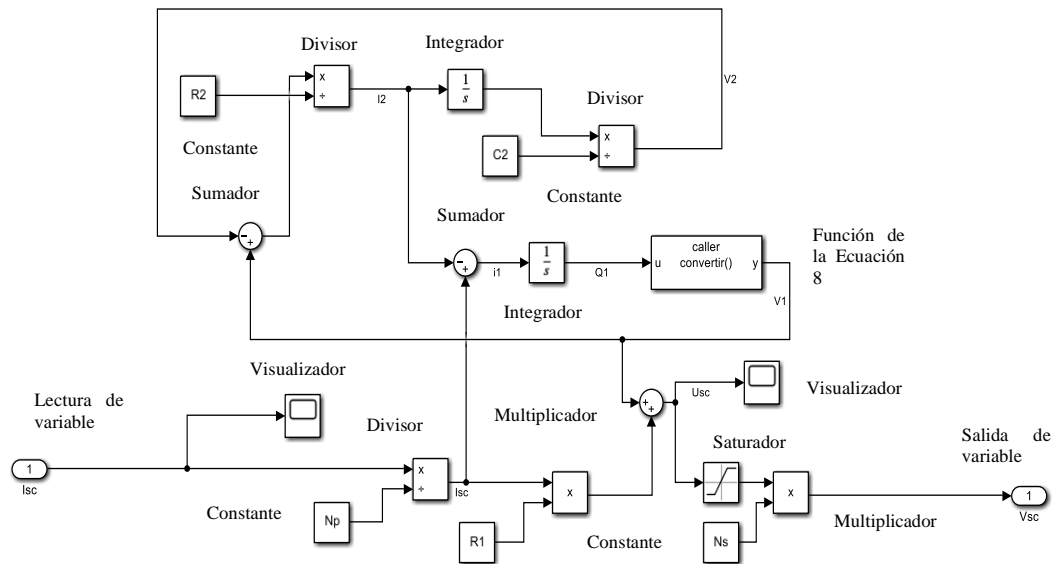


Figura 4: Modelo simulink del módulo de almacenamiento de energía con supercapacitores, ecuaciones 5, 6, 8 y 9 [Autor]

Es importante mencionar que el supercapacitor como se menciona antes funciona a un nivel bajo de voltaje, en la implementación

realizada se ha colocado un módulo que limita la cantidad de voltaje con el cual puede ser alimentado cada uno de los supercapacitores, tanto un límite

hacia abajo como un límite hacia arriba. Tal limitación es fundamental para evitar descargas profundas y afectaciones a la vida útil de cada uno de los elementos evitando voltajes por debajo de cero y también es necesaria para evitar las sobrecargas de los elementos de almacenamiento.

Una sección que no se muestra en la figura 4 es la implementación del cálculo del voltaje $V1$ correspondiente a la ecuación (7), misma que se encuentra dentro de la función caller convertir (), el contenido de tal elemento se muestra en la figura 5.

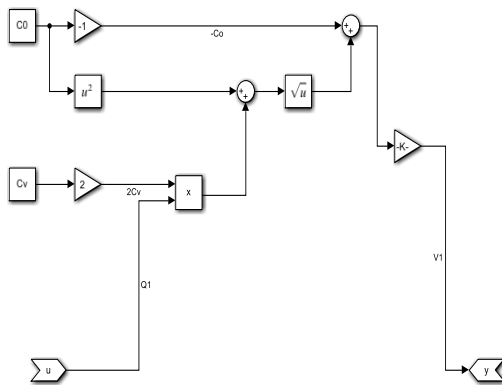


Figura 5: Modelo en simulink de la ecuación (8), cálculo de $V1$
[Autor]

Otro aspecto destacable del modelo que se ha implementado es que los valores $R1$, $R2$, $C1$, $C2$, NS , NP son leídos de un script de Matlab que contiene los datos que entrega el fabricante de cada uno de los supercapacitores, en este caso se trata de un elemento que tiene una capacidad de 3000 Faradios y que funciona a 2.7 V. Las características más relevantes del modelo son las que se muestran en la tabla 1:

Tabla 1: Datos del supercapacitor para el sistema de almacenamiento de la energía
[Autor]

Característica	Valor
R_1	0.29 m Ω
C_0	2100 F
C_v	623 F/v
R_2	1.92 Ω
C_2	172 F
Voltaje	2.7 v

En lo que respecta a los valores de N_p y N_s , esto ya corresponde al dimensionamiento de la cantidad de supercapacitores a colocarse en paralelo y serie respectivamente. Para determinar el número de elementos que se colocarán en serie, resulta fundamental saber los datos de la alimentación que tiene el metro que está en estudio, es decir el voltaje de línea y otros relevantes que se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Características de la línea 1 del metro de Quito
[Autor]

Característica	Valor
No. de paradas	15
Distancia	22 km
No de vagones por tren	6
Nivel de voltaje	1500 VCC
Tipo de alimentación	Tercer riel
Capacidad pasajeros	1259 (6 por m ²)
	144 asientos
Longitud del tren	109.104 m

Sabiendo que el voltaje de alimentación es de 1500 V lo deseable sería que el voltaje total del arreglo sea el mismo o inferior, de tal forma que, al conectar el sistema de almacenamiento, no existan problemas en la línea de alimentación en la que están conectados todos los trenes que componen el sistema de transporte masivo tipo metro. Por tal motivo, la cantidad de supercapacitores a ser colocados en serie N_s se expresa mediante (10) [22]

$$N_s = \frac{V_{sum}}{V_{sc}} \quad (10)$$

Donde:

V_{sum} : Voltaje de alimentación del metro

V_{sc} : Voltaje en terminales del supercapacitor elegido.

La siguiente componente del dimensionamiento consiste en determinar la cantidad de ramales en paralelo que se deben colocar para cubrir las necesidades energéticas del sistema en estudio. En efecto, esta es la misión más compleja de la presente investigación, debido a que se tienen que considerar variados aspectos incluyendo la dinámica del vehículo, la estrategia de gestión de la energía, el perfil de velocidad, de aceleración, de desaceleración, así como la tasa de recuperación de la energía que se puede obtener en la fase de frenado bajo diferentes condiciones. Evitar las descargas profundas y los momentos de sobrecargas también resulta fundamental para lograr un adecuado funcionamiento del banco de supercapacitores que almacena la energía recuperada.

Para el cálculo, los valores de potencia P_{sc} y de energía E_{sc} serán aquellas variables que actúan como restricciones para el dimensionamiento. La potencia del sistema se obtiene mediante la simulación del ciclo de manejo a lo largo de todo el trazado y en aquellas condiciones de mayor exigencia, esto es con la máxima demanda de pasajeros (1259), la velocidad máxima y la mayor tasa de aceleración y desaceleración posible. Es importante señalar que el perfil de consumo señalado será mostrado con claridad en la sección de resultados. Así mismo, de este perfil es posible identificar que existirán picos máximos de potencia demandada en determinados puntos del trazado, mismos que deberían poder ser cubiertos por el sistema de almacenamiento sin llegar a una completa descarga de los elementos de ser posible y sin necesidad de acudir al sistema de suministro de la energía, esto es P_{DEM_max} expresada en kW.

El segundo aspecto que es decisivo para el dimensionamiento es la energía en cada trayecto, considerando las constantes cargas y descargas que se producen en tiempos cortos. Así mismo se considera la porción de recorrido en que el metro consume más energía y cuya sumatoria se expresa en (11)

$$E_{sc}(t_p) = \int_{t_0}^{t_0+t_p} [P_{sc}(t) - P_{sc}(t_0)] dt \quad (11)$$

Donde:

t_0 : tiempo inicial del trazado de potencia pico

t_p : tiempo de finalización del trazado de potencia pico.

Una vez que se determina la máxima energía requerida, es posible ya poder determinar la cantidad de ramales de supercapacitores en paralelo N_P y que viene dada por (12), por supuesto si el número no es entero, el mismo debe ser redondeado hacia arriba, en forma tal que las necesidades energéticas del caso extremo queden cubiertas.

$$N_P = \frac{8 * E_{SC_max}}{3 * V_{SC_max}^2} * \frac{N_S}{C_{SC}} \quad (12)$$

Donde:

E_{SC_max} : energía máxima de un trayecto calculado con (10)

V_{SC_max} : voltaje máximo de los supercapacitores dado por el fabricante

C_{SC} : Capacitancia del supercapacitor escogido, dado por fabricante.

Una vez que el dimensionamiento está correctamente cubierto, es momento de que el sistema de almacenamiento sea puesto a prueba en las condiciones de trabajo reales de funcionamiento y que se han obtenido mediante la simulación ejecutada en SUMO. Para ello, la potencia que se requiere durante todo el trazado es dividida para el voltaje de suministro, pudiendo ser expresada en forma de corriente, en este caso con un cambio de signo en los valores, de tal forma que el modelo de Simulink pueda reconocer los consumos (corrientes negativas) y las recuperaciones (corrientes positivas). El modelo implementado en Simulink hace uso de los bloques From Workspace y To

Workspace para poder obtener los valores del script de Matlab que contiene los resultados de las diferentes simulaciones; así como enviar los resultados de corriente y voltaje del banco para poder ser graficados. Es muy importante mencionar que, para obtener un correcto funcionamiento de la simulación, como cualquier vehículo eléctrico, es necesario un tiempo de carga inicial del sistema de almacenamiento, el cual se ejecuta durante 100 segundos en la primera estación con una señal tipo rampa, y posterior a ello la unidad de transporte tipo metro puede iniciar su recorrido haciendo uso de la energía cargada, en caso contrario los supercapacitores podrían presentarse afectaciones. La estructura del modelo de funcionamiento en Simulink completa puede ser observada en la figura 6, sabiendo que el bloque supercapacitor es el mismo que se encuentra en la figura 3.

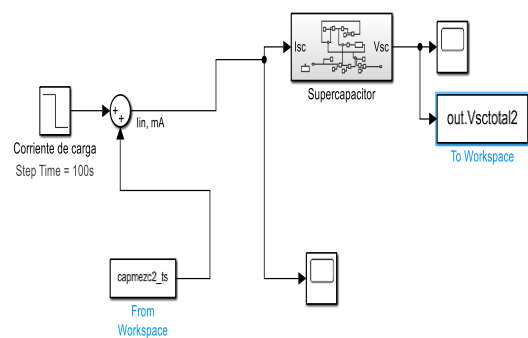


Figura 6: Modelo de simulación del perfil energético de trazado de línea 1 de metro de Quito y obtención del SOC en Simulink [Autor]

En función de todo lo descrito, en la figura 7 se describe el flujograma que describe el proceso indicado, esto

incluye la simulación georreferenciada, el dimensionamiento de los supercapacitores y los resultados obtenidos.

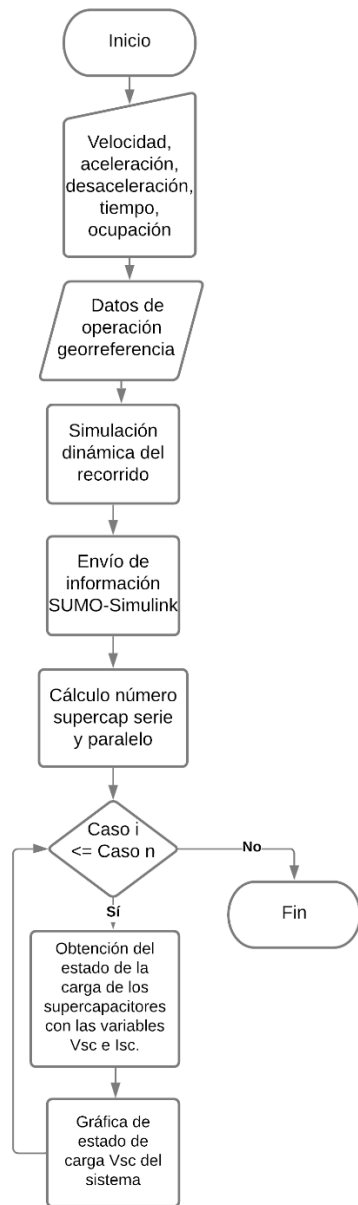


Figura 7: Flujoograma para el dimensionamiento del almacenamiento de energía con supercapacitores [Autor]

En la figura 8 se observa la ruta que sigue la línea 1 del metro de la ciudad de Quito, Ecuador con un mapa

georreferenciado y que muestra al Distrito visto a lo largo del norte hacia el sur.

En la imagen, cada parada está representada por un ícono azul con morado de un tren que sale de un túnel, un símbolo que representa al metro. En color verde se observa el nombre de cada una de las 15 paradas que componen la línea 1 del transporte subterráneo y en color rosado se ve la forma que tiene la ruta que sigue el metro y las zonas por las que pasa en el norte, en el centro y en el sur de la ciudad.

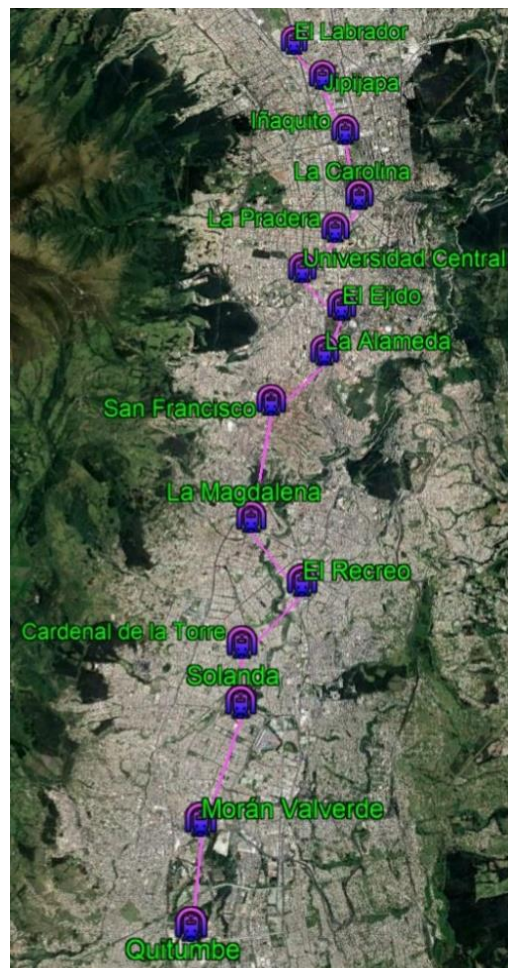


Figura 8: Trazado de la línea 1 del metro de Quito [Autor]

4. Resultados

Para comenzar el planteamiento de los resultados se van a establecer todos los escenarios que se plantearon para comprobar la efectividad del método propuesto de dimensionamiento del sistema de almacenamiento de la energía mediante supercapacitores, bajo diversas condiciones de operación de las unidades de transporte masivo tipo metro, esto es con diverso número de pasajeros, variaciones en la aceleración, desaceleración, así como la velocidad máxima que puede alcanzar, aspectos que modifican significativamente el perfil energético de los metros.

4.1. Escenario 1

Este escenario corresponde a una ocupación completa de los vagones que componen el tren tipo metro de más de 1000 personas, con una velocidad máxima de 100 kilómetros por hora, así como una aceleración que puede alcanzar los 1.5 m/s^2 , y una desaceleración del mismo valor, situación que genera un perfil energético que tienes picos elevados tanto de consumo como de recuperación. En la figura 9 se observa el perfil de potencia de este escenario y se puede notar, en todas las paradas hay recuperación uniforme de la energía, excepto al iniciar el trazado y en la parada 11 hay una recuperación más baja. En lo referente a los consumos, se nota un perfil similar en varias paradas, exceptuando la quinta, la sexta, la décima y la onceava parada en las que se nota un consumo mayor durante la

etapa de aceleración, mientras que hay otros momentos en que la etapa de mantenimiento dura más, mientras que en la décima parada existe un corto periodo en que se conserva de mantenimiento, momento en que la potencia requerida es baja.

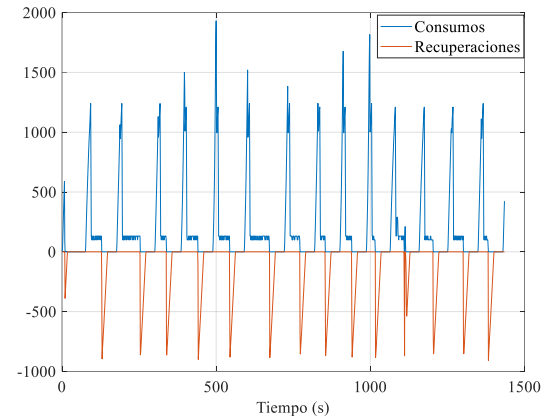


Figura 9: Perfil de potencia del caso 1
[Autor]

En la figura 10 se puede observar en cambio el perfil energético del primer escenario. En este caso, se puede notar que la mayor parte de energía es consumida en cada etapa de aceleración en color azul hasta alcanzar la velocidad máxima y también es posible notar que tales consumos tienen valores variados, existiendo picos en la quinta y décima parada, que son superiores a 60 kWh. En lo que respecta a la energía usada durante la etapa de mantenimiento, esta tiene un valor inferior y que tiene picos en la segunda y quinta parada. Un particular del funcionamiento del metro es el que se produce en la llegada a la primera parada donde se da un recorrido corto entre las cocheras y la parada, por lo cual el vehículo no alcanza la velocidad máxima y por ello, solo consume energía para acelerar y

también hay una leve recuperación. En lo que respecta al frenado, se nota que la energía recuperada acumulada es prácticamente la misma en todas las paradas, exceptuando la parada once en que el valor se aumenta y alcanza los 10 kWh.

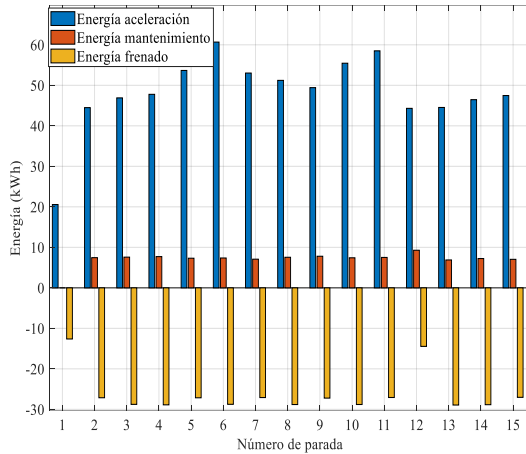


Figura 10: Perfil de energía del caso 1
[Autor]

En la tabla 3 está la tabulación de los valores que se muestran en la figura 10, aquí se notan los altos consumos que se dan en varias paradas cuando el sistema de transporte masivo tipo metro está lleno, pero también los valores elevados de recuperación de energía que existen cuando la masa total involucrada es mucho mayor y por tanto los esfuerzos requeridos para que el sistema de transporte masivo tipo metro frene son superiores. En este caso también es preciso establecer que los valores observados que se producen contribuyen a que la carga de los supercapacitores sea continua.

Tabla 3: Valores de energía consumida y recuperada por parada del escenario 1

[Autor]

No de parada	Aceleración [kWh]	Mantenimiento [kWh]	Frenado [kWh]
Parada 1	20.5608	0.0000	-12.6255
Parada 2	44.4910	7.4506	-27.1328
Parada 3	46.8922	7.5774	-28.7680
Parada 4	47.7708	7.7089	-28.8836
Parada 5	53.6639	7.3115	-27.1449
Parada 6	60.6678	7.3667	-28.7552
Parada 7	53.0239	7.0752	-27.0859
Parada 8	51.2152	7.5453	-28.8098
Parada 9	49.4230	7.7968	-27.2212
Parada 10	55.4498	7.4148	-28.8012
Parada 11	58.5076	7.5050	-27.0718
Parada 12	44.3085	9.2795	-14.4551
Parada 13	44.5289	6.8806	-28.9314
Parada 14	46.4538	7.2339	-28.8487
Parada 15	47.4750	7.0365	-27.0320

Para completar el análisis que se establece para el primer caso, se va a observar lo que ocurre con el banco que se diseña con los supercapacitores, en lo referente a sus cargas y descargas, mismo que luego de la etapa de diseño arroja los siguientes resultados resumidos en la tabla 4.

Tabla 4: Número de elementos del arreglo de supercapacitores

Característica	Valor
N_p	2
N_s	556

Del arreglo establecido, la figura 11 muestra que el sistema se carga durante 100 segundos y, posteriormente todo el trazado planteado usando exclusivamente la energía que está almacenada en el arreglo de supercapacitores. En este caso lo que se revisa es el voltaje VSC que representa el estado de carga durante todo el funcionamiento del metro. Es importante señalar que en esta gráfica se resume lo que ocurre con los supercapacitores cuando la ocupación de pasajeros es del 25, 50, 75 y el 100 %. Así se puede notar que, en el caso de demanda completa, se conserva un voltaje estable que oscila en medio de los 500 VCC, pero es importante establecer que no se producen descargas completas durante todo el trazado, un comportamiento similar ocurre con el 75% de la demanda, con mayor voltaje.

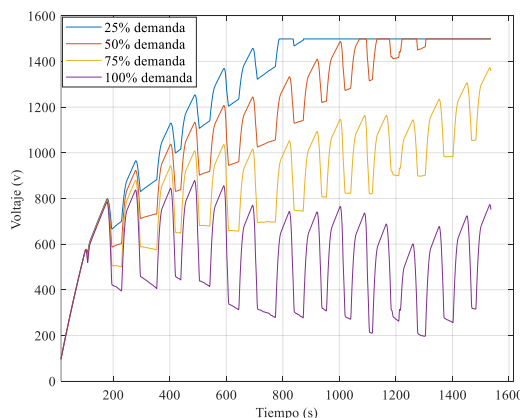


Figura 11: Voltaje de supercapacitores caso 1 [Autor]

En cambio, con el 25% y 50% de la demanda, los supercapacitores continúan cargándose durante varias paradas hasta que se cargan por completo; cuando la demanda es escasa se produce la carga completa más o menos a la mitad del trayecto del metro.

4.2. Escenario 2

Este escenario corresponde a una carga de pasajeros equivalente al 75% de la disponible, con una velocidad máxima de 80 km/h, y una aceleración y desaceleración de 1 m/s^2 este escenario es una situación más conservadora de manejo de la forma en la que se producen las variaciones de las etapas de aceleración, mantenimiento y frenado, y de la cual así mismo se observará los perfiles de la potencia y la energía requeridas para producirse el movimiento de la unidad de transporte masivo tipo metro.

En la figura 12 se va a observar el perfil correspondiente a la potencia. Si se establece una comparación con el primer caso, es preciso señalar que el comportamiento en cada parada con respecto a la recuperación energética es similar, aunque con valores que son bastante inferiores de potencia que se recupera. En lo que respecta a como es consumida la potencia, existen diferencias en que cada una de las paradas tiene un pico diferente de potencia.

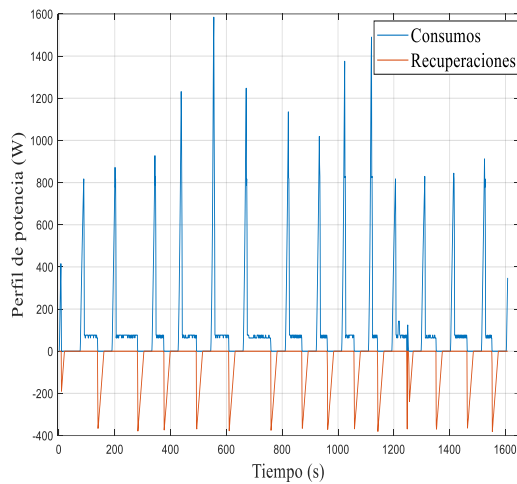


Figura 12: Perfil de potencia del caso 2
[Autor]

Con este escenario los picos de potencia se encuentran en la quinta y décima parada y son cercanos a los 1600 W, situación que se repite en el planteamiento previo. Luego, existen picos menos significativos en la cuarta y novena parada; notando que la potencia requerida es menor a la del primer caso en todas las situaciones, incluso para el mantenimiento de la velocidad.

Al observar la figura 13, es posible notar la sumatoria de los consumos y recuperaciones del metro producidos previo a cada parada; tal y como se había visto en la primera aproximación en casi todas las paradas la cantidad de energía que se recupera es la misma y tiene un valor acumulado menor que el primer caso, aquí también para la llegada a la primera parada por el corto trayecto, solo hay una aceleración de bajo valor y también una recuperación reducida, aunque no tan baja a la existente previo a la llegada a la doceava parada.

En lo referente al consumo también se observa que la cantidad de energía requerida varía mucho en cada etapa del trayecto, con un pico de acumulación de color azul que no supera los 50 kWh, tanto para el momento de aceleración como en el mantenimiento. Lo que más llama la atención es que en las paradas intermedias hay consumos acumulados que tienen una magnitud que no supera los 5 kWh para la etapa de mantenimiento de la velocidad.

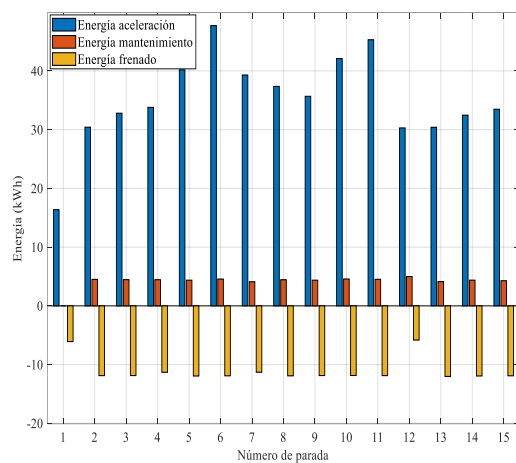


Figura 13: Perfil de energía del caso 2
[Autor]

En la tabla 5 se observan los valores presentes en la figura 12, comprobando que, en todas las etapas de funcionamiento, los valores son bastante inferiores a los observados en el primer escenario, en todos los momentos de funcionamiento, esto es durante la aceleración, el momento de mantenimiento y también en la etapa de frenado, lo que implica que los supercapacitores funcionen en forma diferente a lo observado en el primer caso.

Tabla 5: Valores de energía consumida y recuperada por parada del escenario 2

[Autor]

No de parada	Aceleración	Mantenimiento	Frenado
	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Parada 1	16.3669	0.0000	-6.0809
Parada 2	30.4074	4.5060	-11.8811
Parada 3	32.7899	4.4600	-11.8681
Parada 4	33.7871	4.4505	-11.3114
Parada 5	40.1778	4.3646	-11.9450
Parada 6	47.7048	4.5587	-11.9129
Parada 7	39.2984	4.0990	-11.3020
Parada 8	37.3588	4.4456	-11.9159
Parada 9	35.6713	4.3666	-11.8671
Parada 10	42.1015	4.5713	-11.8561
Parada 11	45.3011	4.5167	-11.8791
Parada 12	30.2873	4.9819	-5.8253
Parada 13	30.3960	4.1256	-12.0204
Parada 14	32.4614	4.3719	-11.9391
Parada 15	33.4695	4.2734	-11.9121

Lo que se puede apreciar en la figura 13 corresponde al voltaje que tiene el arreglo de los supercapacitores bajo las mismas condiciones del primer escenario. Como se puede observar, al iniciar el trayecto, luego del tiempo de carga que ya se ha descrito que es necesario para un correcto funcionamiento del sistema de almacenamiento de la energía. Luego, se observa que, con una ocupación de pasajeros del 25 y 50%, que en la gráfica están en color azul y rojo poco después

de iniciar el recorrido, los supercapacitores alcanzan el valor máximo de voltaje de 1500 VCC y por tanto la máxima carga disponible. En cambio, con ocupación del tren del 75 y el 100%, en color naranja y morado, se produce la carga completa del supercapacitor cuando el tren circula en las paradas finales, con valores que inician en 600 VCC y alcanzan el máximo de 1500 VCC. Es importante destacar que la carga total del sistema de almacenamiento puede ser empleada fácilmente en el siguiente trayecto, por ello se puede establecer que es muy positivo que se produzcan las cargas completas en determinadas condiciones de funcionamiento en la que, a diferencia del primer caso en todas las capacidades de ocupación, el banco alcanza la carga completa expresada en el voltaje.

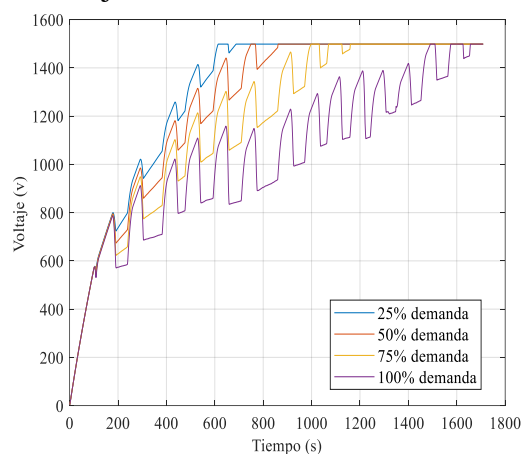


Figura 14: Voltaje de supercapacitores caso 2 [Autor]

4.3. Escenario 3

El siguiente escenario que se establece para la presente investigación corresponde a una zona intermedia de condiciones físicas entre el primer y

segundo escenario, esto es que la velocidad máxima es de 100 km/h, mientras que la aceleración máxima posible y la desaceleración viene estableciéndose en un valor de 1.2 m/s^2 . En este caso se va a considerar el 50% de la ocupación de los vagones del sistema de transporte tipo metro; y con una forma de acelerar y desacelerar que está en un punto intermedio entre los casos previos.

Al revisar la figura 15, que corresponde a las necesidades de potencia del tren cuando se presenta el caso establecido, es posible notar lo siguiente: al igual que en los casos previos, las recuperaciones son muy similares en cada uno de los trayectos que ejecuta el metro, con la excepción de la primera y doceava parada y con un valor que es apenas superior que el pico recuperable que tiene el metro en las condiciones del segundo caso. En lo referente a los consumos, existe una mayor uniformidad de los picos de potencia requeridos y que están cercanos a 800 W en la mayoría de los casos. Luego, en la sexta, décima y onceava paradas hay picos superiores, el mayor alcanza un valor que supera los 1200 W. En las etapas de mantenimiento de la velocidad, se producen comportamientos muy similares a los que existen en el segundo caso y con valores ligeramente superiores.

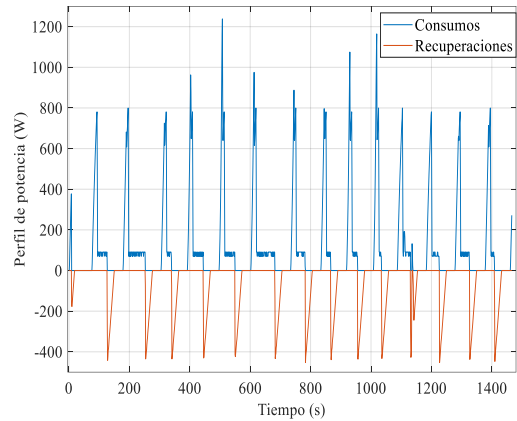


Figura 15: Perfil de potencia del caso 3
[Autor]

La siguiente figura, permite observar lo que ocurre con la energía consumida y recuperada en cada trayecto que se realiza diariamente en la línea 1 del metro de Quito con las condiciones físicas que se expusieron previamente.

En la figura 16 se observa la energía que existe en las tres etapas de funcionamiento que ocurren entre las paradas del medio de transporte masivo tipo metro y que ya se han descrito extensamente. La energía que se produce en el frenado, es bastante similar y se acerca a un valor absoluto de 14 kWh, es decir en una zona intermedia si se ponen en consideración los casos previos. La tendencia de que en la primera y doceava paradas se produce una recuperación inferior se mantiene en este nuevo caso.

Pasando a analizar la primera etapa de funcionamiento, graficada de color azul, la tendencia de valores de energía consumidos de valores diferentes para cada parada se conserva, y se puede notar inclusive que, las sumatorias energéticas tiene valores que tienen valores inferiores a los del caso 2, como se podrá comprobar en la tabla 7, misma

situación que ocurre en la etapa de mantenimiento de la velocidad, pero observándose consumos incluso más inferiores que en otros casos, mismos que tienen un aspecto semejante a los observados en el primer caso. Por último, se establecen los valores que más se repiten en cada parada, y que están en valores cercanos y que superan los 35 kWh.

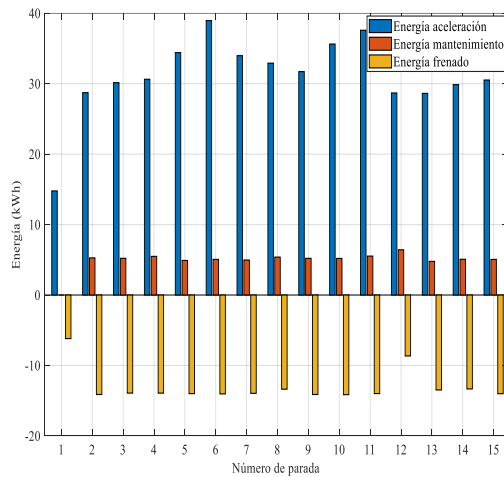


Figura 16: Perfil de energía del caso 3
[Autor]

La tabla 6 muestra los valores de energía consumida antes de la llegada a cada parada, aquí se comprueba que hay poca diferencia en la energía que se recupera en cada momento del recorrido y que la energía gastada tiene una repartición diferente a la de los escenarios previos, esto porque el consumo en la etapa de mantenimiento es más alto al segundo caso, pero en la etapa de aceleración los valores son más bajos respecto al segundo escenario.

Tabla 6: Valores de energía consumida y recuperada por parada del escenario 3

[Autor]			
No de parada	Aceleración [kWh]	Mantenimiento [kWh]	Frenado [kWh]
Parada 1	14.7765	0.0000	-6.1854
Parada 2	28.7244	5.2696	-14.1249
Parada 3	30.1417	5.2102	-13.9199
Parada 4	30.6278	5.4865	-13.9250
Parada 5	34.4028	4.9062	-13.9970
Parada 6	38.9532	5.0560	-14.0377
Parada 7	33.9777	4.9667	-13.9568
Parada 8	32.9174	5.3825	-13.3663
Parada 9	31.7127	5.2065	-14.1227
Parada 10	35.6283	5.1917	-14.1472
Parada 11	37.5858	5.5253	-13.9909
Parada 12	28.6797	6.4166	-8.6481
Parada 13	28.6269	4.7762	-13.4811
Parada 14	29.8692	5.0735	-13.3320
Parada 15	30.5229	5.0494	-14.0063

Como se ha realizado y presentado en los casos anteriores, la figura 17 es la que permite la visualización del perfil que tiene el voltaje y por tanto la carga presente en el banco de supercapacitores en las condiciones de velocidad, aceleración y desaceleración establecidas y con los 4 niveles de ocupación antes determinados. Las formas que se obtienen resultan bastante similares a las que se vieron en el primer caso, especialmente en lo referente a la ocupación baja y media, donde la

saturación se produce luego de cumplirse al menos la mitad de trayecto planteado. En el caso de la demanda equivalente al 75%, se puede observar que luego de una carga y descarga que permite un crecimiento sostenido del estado de la carga, al final del recorrido, el arreglo de supercapacitores prácticamente ha podido ser cargado en su totalidad, situación que es diferente a la que ocurre con los vagones llenos donde la carga y descarga establece un valor medio de voltaje que oscila entre poco menos de 400 VCC y apenas sobrepasa los 800 VCC situación que se repite en cada uno de los trayectos que fueron simulados.

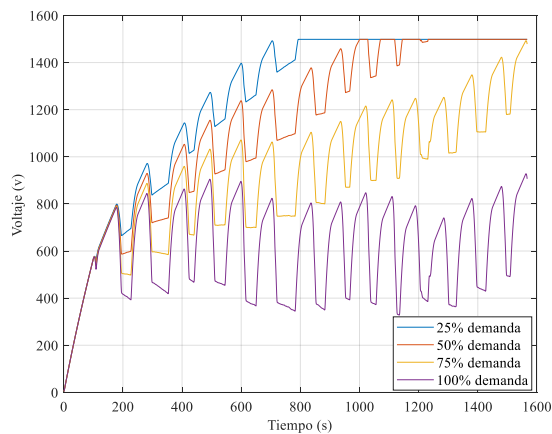


Figura 17: Voltaje de supercapacitores caso 3 [Autor]

4.4. Escenario 4

El escenario que se plantea para finalizar con el estudio es el correspondiente a una utilización de los metros que alcanza el 25% de la capacidad, con una velocidad máxima de 90 km/h, una aceleración de 1 m/s^2 y una desaceleración de 1.6 m/s^2 lo que implicará comprobar que ocurre cuando la fuerza de aceleración difiere de la empleada para frenar, y que se

encuentra dentro de los valores que ya se han comprobado en los casos previos. En la figura 18 se observa el perfil de la potencia cuando se establecen las condiciones que se describieron en el párrafo previo. Se nota a primera vista que, a pesar de que la cantidad de pasajeros es inferior en los escenarios previos, la cantidad del pico de la potencia que se recupera tiene un valor escasamente inferior al que se obtiene con una desaceleración más baja, pero con ocupación mayor, es decir casi 400 W. En la primera y doceava paradas se producen picos de potencia mucho más bajos.

La potencia de consumo y sus picos se pueden notar que son inferiores que los que se pudieron observar en los otros casos, siendo los picos más bajos de todos los sistemas, esto podría deberse a la baja ocupación que se está planteando en este nuevo escenario, en que los picos superan los 700 W en la sexta, decima y onceava parada. Mientras tanto, en otras paradas la potencia de pico está cercana a los 500 W, siendo variadas las potencias que son requeridas.

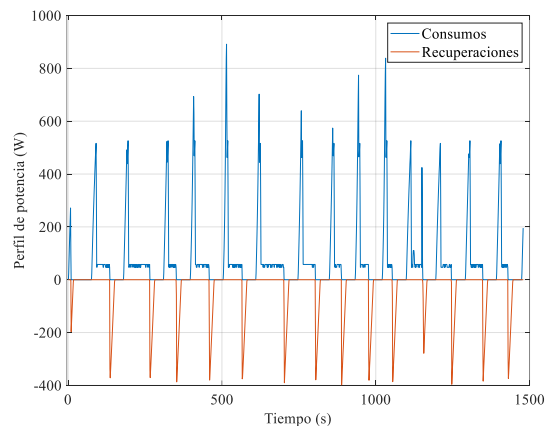


Figura 18: Perfil de potencia del caso 4 [Autor]

La situación de la potencia usada para mantenimiento resulta similar a las de los otros casos, aunque en la doceava parada se produce un pico importante antes de que comience la etapa de frenado, hecho que llama la atención porque tal pico tiene una magnitud superior a lo de los anteriores casos. En lo referente al perfil de la energía en cada trayecto del recorrido establecido en la línea 1 del metro de Quito, lo que se puede observar en la figura 19 es que las sumatorias de energía que se recuperan son similares en casi todas las paradas, exceptuando la primera y la doceava parada; en una situación que resulta similar a las sumatorias que se consiguieron en los casos previos; el valor de tal energía alcanza prácticamente los 13 kWh. La energía que se utiliza para acelerar tiene valores pico que superan los 25 kWh en la sexta y onceava parada, mientras que los valores que más se repiten están sobre los 20 kWh.

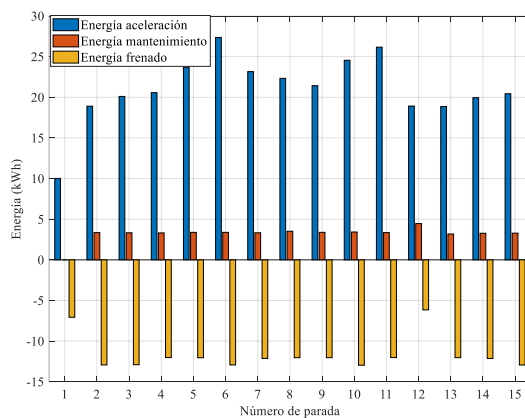


Figura 19: Perfil de energía del caso 4
[Autor]

La tabla 7 muestra los datos que se muestran como barras en la figura 18 y con esto se comprueba que los valores

que se consumen para mantener la velocidad son bajos y también se observa que en la etapa de aceleración los valores son diferentes desde los 10 hasta los 26 kWh.

Tabla 7: Valores de energía consumida y recuperada por parada del escenario 4
[Autor]

No de parada	Aceleración [kWh]	Mantenimiento [kWh]	Frenado [kWh]
Parada 1	10.0150	0.0000	-7.0641
Parada 2	18.9009	3.3468	-12.9328
Parada 3	20.1053	3.3253	-12.9052
Parada 4	20.5636	3.3123	-12.0245
Parada 5	23.6989	3.3817	-12.0448
Parada 6	27.3602	3.3817	-12.9307
Parada 7	23.1559	3.3278	-12.1262
Parada 8	22.3277	3.5205	-12.0399
Parada 9	21.4243	3.3831	-12.0360
Parada 10	24.5498	3.4237	-12.9702
Parada 11	26.1642	3.3503	-12.0269
Parada 12	18.9214	4.4600	-6.1555
Parada 13	18.8584	3.1772	-12.0342
Parada 14	19.9455	3.2713	-12.1319
Parada 15	20.4359	3.2818	-12.9390

Para completar el análisis aquí se observa el voltaje en los supercapacitores para este escenario. Al igual que en los tres casos previos, la carga está representada por el voltaje V_{sc} . En la figura 20 se puede observar que el voltaje alcanza los 1500 VCC cuando la ocupación es del 25 y 50%,

representadas en color rojo y azul respectivamente. En el caso de la demanda de pasajeros del 75% de color naranja hay un comportamiento en el cual el voltaje se mantiene aumentando la carga que tienen los supercapacitores hasta terminar el recorrido analizado, y, en el caso cuando el metro está completamente lleno, en color morado, la carga de supercapacitores se mantiene subiendo y bajando constantemente con valores que oscilan entre 600 y 800 VCC.

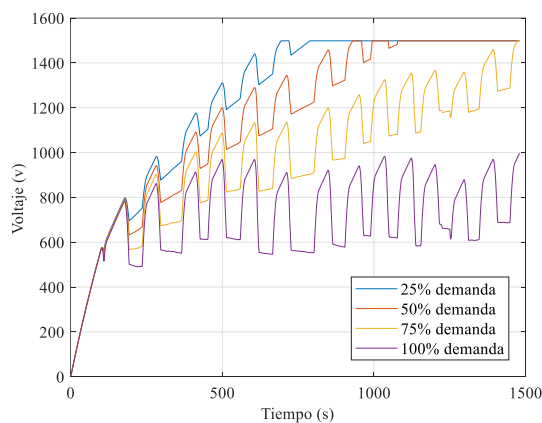


Figura 20: Voltaje de supercapacitores caso 4
[Autor]

5. Conclusiones

El proceso de dimensionamiento del almacenamiento de la energía de un sistema de transporte masivo tipo metro, con sus respectivas paradas, debe considerar detalles específicos del funcionamiento entre los que el análisis de la demanda de pasajeros que se puede presentar en los diversos horarios en los cuales funciona el metro; por ello la simulación de 4 demandas que son diferentes es fundamental para la comprobación de un correcto proceso de dimensión de los arreglos de supercapacitores tanto en serie como en

paralelo, notando que la recuperación posible varía entre un 42% hasta un 48% de la energía consumida, misma que podría ser almacenada.

Los aspectos de demanda, aceleración, desaceleración, la velocidad máxima, el peso, área y otros que influyen directamente en la utilización y regeneración de la energía; es posible realizar la simulación mediante el software SUMO de cada escenario planteado, de tal forma de obtener la necesidad de potencia en cada segundo del recorrido del metro, datos que luego son empleados para poner a prueba el banco de almacenamiento de la energía, sabiendo que en el caso 1 del mayor consumo este pico supera por más del 45% la cantidad de potencia pico del caso 4 que tiene menores consumos, esto implica también que en el caso más bajo los supercapacitores se carguen rápidamente y con los mayores picos de potencia la carga apenas llegue al 50% de la disponible por instantes.

Los resultados obtenidos en la simulación muestran que, en todos los escenarios dados, la energía que se recupera es muy similar en cada uno de los trayectos entre parada y parada, difiriendo en cada caso primordialmente en la cantidad que se regenera en porcentuales que van desde el 47% de lo consumido en cada trayecto hasta más del 63% en los momentos en que el frenado se produce rápidamente, esto varía en función de la fuerza que está disponible para el frenado.

La energía que se consume para la aceleración y el mantenimiento en cada

recorrido entre paradas, es diferente en sus picos y también en la cantidad de tiempo requerida para alcanzar determinada velocidad que ya estaba establecida, lo que genera consumos que pueden ser hasta 27% inferiores que los consumos requeridos para completar los recorridos más distantes entre paradas y que tienen las mayores pendientes.

La capacidad disponible de energía recuperada es analizada en cada caso hasta poder determinar la condición en la que la cantidad de energía requerida sea la máxima posible, esto es un pico de energía que es superior hasta en un 60% a lo que se requiere cuando el tren está menos ocupado y la magnitud de la aceleración y desaceleración es inferior. Los momentos en los cuales la capacidad instantánea disponible alcance a cubrir lo requerido para la movilidad del metro sin depender de la energía externa, esto es que se cubra el 100% de la energía con los capacitores o que se cubra necesidades energéticas que sean hasta 45% menores a las máximas, este análisis también puede ser establecido para aprovechar la energía en forma instantánea, sabiendo que las recuperaciones más bajas que pueden llegar a ser 39% más bajas que las que ocurren cuando la aceleración y desaceleración son máximas.

El modelo matemático establecido en forma de circuito equivalente de los supercapacitores y las fórmulas establecidas para el dimensionamiento del almacenamiento, se muestran como una alternativa efectiva para determinar

un sistema que cubra las necesidades energéticas en cada instante de funcionamiento del sistema de transporte masivo, esto es los picos de hasta 2000 kW de consumo, que representan un 40% de lo consumido en las condiciones del tercer caso y también una situación en que la regeneración es tan baja como picos de menos de 400 kW, lo que es un 39% inferior a la regeneración que se produce en las condiciones del primer caso.

6. Trabajos futuros

En esta forma la simulación y la utilización de circuito equivalente fueron las herramientas principales para realizar el dimensionamiento de un sistema de almacenamiento de la energía que es posible recuperar por medio de frenado regenerativo para su utilización en los procesos de aceleración y mantenimiento de velocidad en un sistema de transporte masivo tipo metro, es preciso establecer un futuro en el que otras metodologías sean puestas a prueba, tales metodologías pueden incluir no solo la simulación, sino también la recolección de datos de funcionamiento reales de los metros cuando el metro que es objeto del presente análisis esté en pleno funcionamiento, pudiendo luego, establecerse comparativas entre los datos obtenidos en la simulación y los que son reales.

Por otro lado, también se podrían ejecutar estudios donde las optimizaciones tomen protagonismo, considerando aspectos que no forman

parte del alcance del presente documento, es decir los costos asociados a la implementación de un dispositivo de almacenamiento, la modificación de los horarios y de la forma en la que operan los trenes, por nombrar otros; pudiendo así considerarse no solo los aspectos técnicos sino también los aspectos que pueden ser decisivos para realizar una inversión como la que puede estar involucrada en la implementación del sistema de almacenaje de la energía.

7. Referencias

- [1] M. Brenna, F. Foiadelli, E. Tironi, and D. Zaninelli, "Ultracapacitors application for energy saving in subway transportation systems," *2007 Int. Conf. Clean Electr. Power, ICCEP '07*, no. figure 1, pp. 69–73, 2007, doi: 10.1109/ICCEP.2007.384188.
- [2] S. Su, X. Li, and T. Tang, "A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy," *2012 Jt. Rail Conf. JRC 2012*, vol. 14, no. 2, pp. 717–727, 2012, doi: 10.1115/JRC2012-74017.
- [3] I. Sengor, H. C. Kilickiran, H. Akdemir, and B. Kilic, "Determination of Potential Regenerative Braking Energy in Railway Systems: A Case Study for Istanbul M1A Light Metro Line," *J. Autom. Control Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 21–25, 2017, doi: 10.18178/joace.5.1.21-25.
- [4] Y. Huang, L. Yang, T. Tang, F. Cao, and Z. Gao, "Saving energy and improving service quality: Bicriteria train scheduling in urban rail transit systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, no. 12, pp. 3364–3379, 2016, doi: 10.1109/TITS.2016.2549282.
- [5] E. M. Shabanova and V. V. Biryukov, "Analysis of the Effectiveness of Regenerative Braking on Subway Trains," *Int. Conf. Young Spec. Micro/Nanotechnologies Electron Devices, EDM*, vol. 2019-June, pp. 491–494, 2019, doi: 10.1109/EDM.2019.8823221.
- [6] P. Liu, L. Yang, Z. Gao, Y. Huang, S. Li, and Y. Gao, "Energy-efficient train timetable optimization in the subway system with energy storage devices," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 19, no. 12, pp. 3947–3963, 2018, doi: 10.1109/TITS.2018.2789910.
- [7] S. Su, T. Tang, and C. Roberts, "A Cooperative Train Control Model for Energy Saving," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 622–631, 2015, doi: 10.1109/TITS.2014.2334061.
- [8] A. L. Allègre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, E. Chattot, and S. El-Fassi, "Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway," *IEEE Trans.*

- Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4001–4012, 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2044124.
- [9] Z. Yang, H. Xia, B. Wang, and F. Lin, “An overview on braking energy regeneration technologies in Chinese urban railway transportation,” *2014 Int. Power Electron. Conf. IPEC-Hiroshima - ECCE Asia 2014*, pp. 2133–2139, 2014, doi: 10.1109/IPEC.2014.6869883.
- [10] C. Mayet, P. Delarue, A. Bouscayrol, and E. Chattot, “EMR-Based Simulation Tool of a Multi-Train Subway System,” *2016 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2016 - Proc.*, 2016, doi: 10.1109/VPPC.2016.7791680.
- [11] M. Khodaparastan, O. Dutta, M. Saleh, and A. A. Mohamed, “Modeling and Simulation of DC Electric Rail Transit Systems With Wayside Energy Storage,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 3, pp. 2218–2228, 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2895026.
- [12] H. Liu, M. C. Zhou, X. Guo, Z. Zhang, B. Ning, and T. Tang, “Timetable Optimization for Regenerative Energy Utilization in Subway Systems,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, no. 9, pp. 3247–3257, 2019, doi: 10.1109/TITS.2018.2873145.
- [13] R. Teymourfar, B. Asaei, H. Iman-Eini, and R. Nejati Fard, “Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 56, pp. 206–214, 2012, doi: 10.1016/j.enconman.2011.11.019.
- [14] H. Moghbeli, H. Hajisadeghian, and M. Asadi, “Design and simulation of hybrid electrical energy storage (HEES) for Esfahan urban railway to store regenerative braking energy,” *7th Power Electron. Drive Syst. Technol. Conf. PEDSTC 2016*, no. Pedstc, pp. 93–98, 2016, doi: 10.1109/PEDSTC.2016.7556844.
- [15] Z. Yang, Z. Yang, F. Lin, and H. Xia, “Improved control strategy of energy storage system considering train operation states,” *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC*, vol. 2018-March, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/ITSC.2017.8317623.
- [16] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, “Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network,” in *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008*, 2008, no. October, pp. 1–8, doi: 10.1109/VPPC.2008.4677491.
- [17] J. Shen, S. Dusmez, and A. Khaligh, “Optimization of sizing

- and battery cycle life in battery/ultracapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicle applications,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2112–2121, 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2334233.
- [18] A. Castaings, H. Caron, H. Kharrat, A. Ovalle, and B. Vulturescu, “Energy Storage System based on Supercapacitors for a 750 v DC railway power supply,” in *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, ESARS-ITEC 2018*, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607725.
- [19] K. Popoola, “Modelling and Simulation of Supercapacitor for Energy Storage Applications,” *ADB- Journal Eng. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 2–7, 2018.
- [20] M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela, “Energy storage system with Ultracaps on board of railway vehicles,” in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications, EPE*, 2007, pp. 1–10, doi: 10.1109/EPE.2007.4417400.
- [21] A. Ostadi and M. Kazerani, “A Comparative Analysis of Optimal Sizing of Battery-Only, Ultracapacitor-Only, and Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for a City Bus,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 10, pp. 4449–4460, 2015, doi: 10.1109/TVT.2014.2371912.
- [22] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeüs, B. Barbedette, and P. Le Moigne, “Influence of the drive cycles on the sizing of hybrid storage system battery-supercapacitor supplying an electric vehicle,” in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2011, pp. 4106–4112, doi: 10.1109/IECON.2011.6119984.
- [23] W. Martinez, C. Cortes, and L. Munoz, “Sizing of ultracapacitors and batteries for a high performance electric vehicle,” in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2012*, 2012, pp. 1–6, doi: 10.1109/IEVC.2012.6183242.
- [24] M. C. Argyrou, P. Christodoulides, C. C. Marouchos, and S. A. Kalogirou, “Hybrid battery-supercapacitor mathematical modeling for PV application using Matlab/Simulink,” in *Proceedings - 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2018*, 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/UPEC.2018.8541933.
- [25] J. Ko, S. Ko, H. Son, B. Yoo, J. Cheon, and H. Kim,

- “Development of brake system and regenerative braking cooperative control algorithm for automatic-transmission-based hybrid electric vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 2, pp. 431–440, 2015, doi: 10.1109/TVT.2014.2325056.
- [26] P. Patel, H. Chandra, and T. Sahoo, “Study on regenerative braking system, considerations of design, safety and associated effects,” *2015 IEEE Int. Transp. Electrification Conf. ITEC-India 2015*, pp. 1–8, 2016, doi: 10.1109/ITEC-India.2015.7386930.
- [27] V. Singh, “Efficient Utilisation of Regenerative Braking in Railway Operations,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, pp. 1421–1428, 2017, [Online]. Available: www.irjet.net.
- [28] X. Yang, A. Chen, X. Li, B. Ning, and T. Tang, “An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 57, pp. 13–29, 2015, doi: 10.1016/j.trc.2015.05.002.
- [29] D. Chakraborty and A. K. Nandi, “Finding optimal deceleration with serial regenerative braking of electric vehicle using a multi-objective genetic algorithm,” *1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2016*, 2017, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853333.
- [30] A. Belay Kebede and G. B. Worku, “A research on regenerative braking energy recovery: A case of Addis Ababa light rail transit,” *eTransportation*, vol. 8, p. 100117, 2021, doi: 10.1016/j.etrans.2021.100117.
- [31] X. Li, B. Zhang, and Y. Liu, “A little bit flexibility on headway distribution is enough: Data-driven optimization of subway regenerative energy,” *Inf. Sci. (Ny.)*, vol. 554, pp. 276–296, 2021, doi: 10.1016/j.ins.2020.12.030.
- [32] F. Meishner and D. U. Sauer, “Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids,” *eTransportation*, vol. 1, p. 100001, 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.04.001.
- [33] M. A. Pimenta, W. Komatsu, and L. Matakas Junior, “Electrical Simulation of Traction Subway System for Energy Recovery and Energy Saving Studies,” *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electron. Conf. 5th IEEE South. Power Electron. Conf. COBEP/SPEC 2019*, 2019, doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065532.
- [34] Q. Pu, X. Zhu, R. Zhang, J. Liu, D. Cai, and G. Fu, “Optimal design of automatic train operation information with the consideration of regenerative

- braking,” *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, pp. 118–122, 2019, doi: 10.1145/3357419.3357446.
- [35] H. M. Sharf, E. A. Elghanam, M. S. Hassan, A. H. Osman, and A. O. Elmeligy, “Performance enhancement of a hybrid battery-supercapacitor EV energy storage system,” in *2021 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC 2021*, 2021, pp. 702–707, doi: 10.1109/ITEC51675.2021.9490063.
- [36] H. Ma, Y. Zhang, and M. Shen, “Application and prospect of supercapacitors in Internet of Energy (IOE),” *J. Energy Storage*, vol. 44, no. PA, p. 103299, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103299.
- [37] N. Ghaviha, J. Campillo, M. Bohlin, and E. Dahlquist, “Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 4561–4568, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.980.

8. Matriz de Estado del Arte

Almacenamiento de energía eléctrica mediante el frenado regenerativo para el sistema de transporte eléctrico masivo tipo metro																															
ITEM	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DATOS				TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA														
			REVISTA Cuartil (Q1,Q2,Q3,Q4), Scielo, Conferencia	Cita en formato para ShareLatex desde Mendeley	Patentes	CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	FRENADO REGENERATIVO	OPERACIÓN DEL METRO	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	SUPERCAPACITORES	PRINCIPIOS DE LA RECUPERACIÓN ENERGÍA	PERFIL ENERGÉTICO DE CONSUMO Y RECUPERACIÓN	ARREGLOS DE SUPERCAPACITORES E HÍBRIDOS	ESTRUCTURA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL METRO	ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO DEL METRO Y CARACTERÍSTICAS	LIMITES DE OPERACIÓN	ACELERACIÓN, DESACELERACIÓN, VELOCIDAD	CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO	REVISIÓN DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO ESPECÍFICAS	CIRCUITO EQUIVALENTE	OPTIMIZACIÓN	COLOCACIÓN DE ELEMENTOS EN SERIE Y PARALELO	PRONÓSTICOS Y MANEJO DE HORARIOS DEL METRO	CONSUMOS ENERGÉTICOS INSTANTÁNEOS	TÉCNICAS DE SIMULACIÓN	USO DE CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SUPERCAPACITOR	ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA CARGA	COMPROBACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO EN SERIE Y PARALELO	PERFIL DE POTENCIA	PERFIL DE ENERGÍA	
1	2007	Ultracapacitors application for energy saving in subway transportation systems	Conferencia	\cite{Brenna2007}	-	45		☒	☒	☒			☒	☒	☒	☒				☒						☒	☒				
2	2012	A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy	Q1	\cite{Liu2019}	-	299		☒					☒		☒		☒			☒			☒					☒	☒		
3	2017	Determination of Potential Regenerative Braking Energy in Railway Systems: A Case Study for Istanbul M1A Light Metro Line	Q4	\cite{Sengor2017}	-	4	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒					☒						☒			

ITEM	DATOS						TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA											
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REVISTA Cuartil (Q1,Q2,Q3,Q4), Scielo, Conferencia	Cita en formato para ShareLatex desde Mendeley	Patentes	CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	FRENADO REGENERATIVO	OPERACIÓN DEL METRO	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	SUPERCAPACITORES	PRINCIPIOS DE LA RECUPERACIÓN ENERGÍA	PERFIL ENERGÉTICO DE CONSUMO Y RECUPERACIÓN	ARREGLOS DE SUPERCAPACITORES E HÍBRIDOS	ESTRUCTURA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL METRO	ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO DEL METRO Y CARACTERÍSTICAS	LIMITES DE OPERACIÓN	ACELERACIÓN, DESACELERACIÓN, VELOCIDAD	CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO	REVISIÓN DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO ESPECÍFICAS	CIRCUITO EQUIVALENTE	OPTIMIZACIÓN	COLOCACIÓN DE ELEMENTOS EN SERIE Y PARALELO	PRONÓSTICOS Y MANEJO DE HORARIOS DEL METRO	CONSUMOS ENERGÉTICOS INSTANTÁNEOS	TÉCNICAS DE SIMULACIÓN	USO DE CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SUPERCAPACITOR	ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA CARGA	COMPROBACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO EN SERIE	PERFIL DE POTENCIA	PERFIL DE ENERGÍA
4	2016	Saving energy and improving service quality: Bicriteria train scheduling in urban rail transit systems	Q1	\cite{Huang2016}	-	79	☒	☒			☒	☒		☒		☒	☒			☒		☒	☒					☒	☒	
5	2019	Analysis of the Effectiveness of Regenerative Braking on Subway Trains	Conferencia	\cite{Shabanova2019}	-	2	☒	☒			☒		☒		☒		☒				☒		☒							
6	2018	Energy-efficient train timetable optimization in the subway system with energy storage devices	Q1	\cite{Liu2018}	-	35		☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒		☒				☒				
7	2015	A Cooperative Train Control Model for Energy Saving	Q1	\cite{Su2015}	-	119		☒	☒			☒	☒			☒	☒			☒		☒		☒			☒	☒	☒	
8	2010	Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway	Q1	\cite{Allegre2010}	-	196		☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒				☒		☒		☒	☒	☒	☒			☒
9	2014	An overview on braking energy regeneration technologies in Chinese urban railway transportation	Conferencia	\cite{Yang2014}	-	6	☒	☒			☒		☒		☒				☒	☒		☒		☒	☒	☒				☒
10	2016	EMR-Based Simulation Tool of a Multi-Train Subway System	Conferencia	\cite{Mayet2016}	-	2		☒					☒						☒	☒		☒								

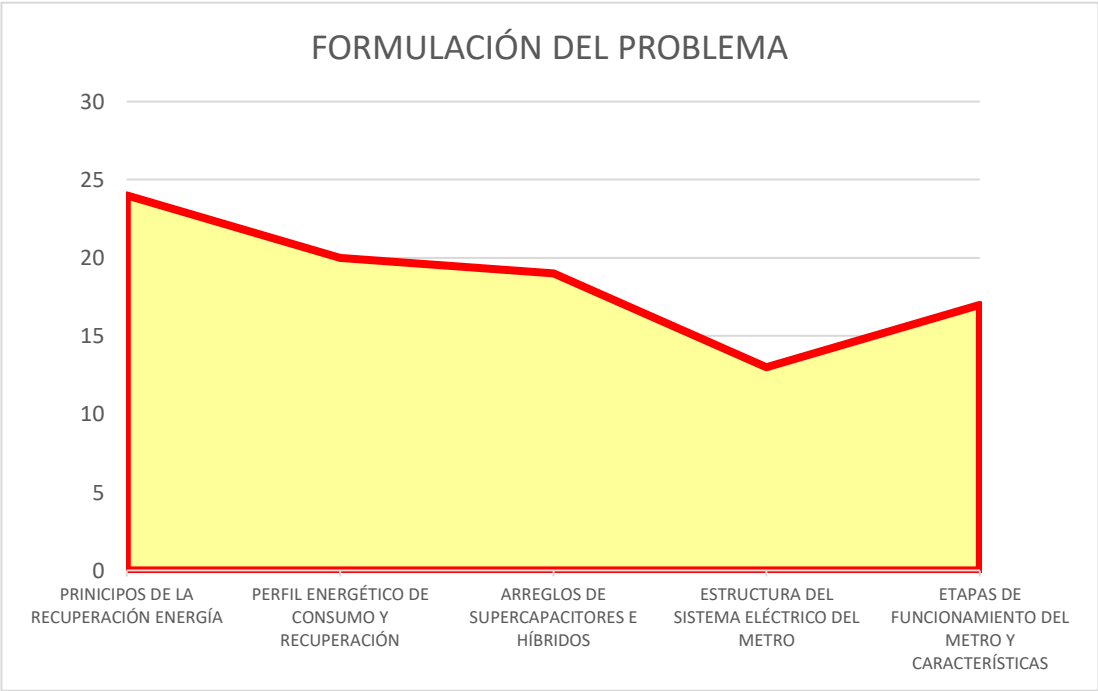
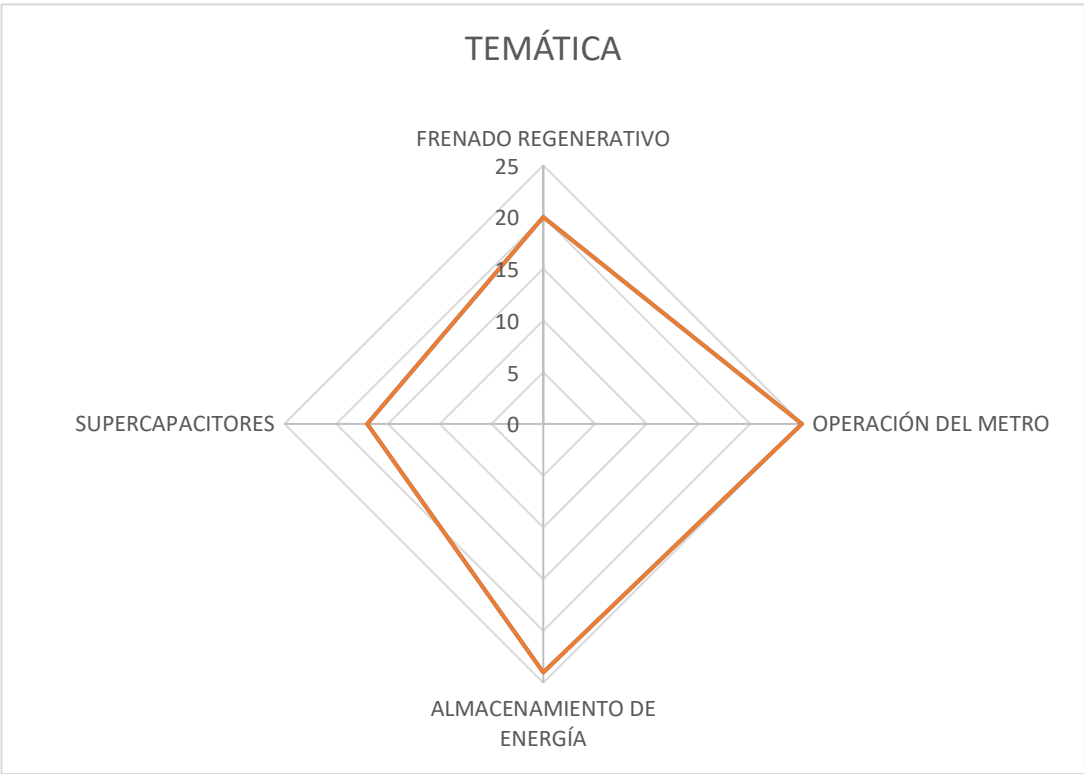
ITEM	DATOS						TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA								
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REVISTA Cuartil (Q1,Q2,Q3,Q4), Scielo, Conferencia	Cita en formato para ShareLatex desde Mendeley	Patentes	CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	FRENADO REGENERATIVO	OPERACIÓN DEL METRO	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	SUPERCAPACITORES	PRINCIPIOS DE LA RECUPERACIÓN ENERGÍA	PERFIL ENERGÉTICO DE CONSUMO Y RECUPERACIÓN	ARREGLOS DE SUPERCAPACITORES E HÍBRIDOS	ESTRUCTURA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL METRO	ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO DEL METRO Y CARACTERÍSTICAS	LIMITES DE OPERACIÓN	ACELERACIÓN, DESACELERACIÓN, VELOCIDAD	CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO	REVISIÓN DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO ESPECÍFICAS	CIRCUITO EQUIVALENTE	OPTIMIZACIÓN	COLOCACIÓN DE ELEMENTOS EN SERIE Y PARALELO	PRONÓSTICOS Y MANEJO DE HORARIOS DEL METRO	CONSUMOS ENERGÉTICOS INSTANTÁNEOS	TÉCNICAS DE SIMULACIÓN	USO DE CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SUPERCAPACITOR	ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA CARGA	COMPROBACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO EN SERIE Y PERFIL DE POTENCIA	PERFIL DE ENERGÍA	
11	2019	Modeling and Simulation of DC Electric Rail Transit Systems With Wayside Energy Storage	Q1	\cite{Khodaparastan2019}	-	35		☒	☒		☒	☒	☒	☒		☒		☒									☒		☒	
12	2019	Timetable Optimization for Regenerative Energy Utilization in Subway Systems	Q1	\cite{Liu2019}	-	52	☒	☒		☒	☒			☒			☒			☒		☒								
13	2012	Stationary supercapacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line	Q1	\cite{Teymourfar2012}	-	126		☒	☒	☒	☒	☒		☒			☒			☒	☒		☒				☒	☒		☒
14	2016	Design and simulation of hybrid electrical energy storage (HEES) for Esfahan urban railway to store regenerative braking energy	Q1	\cite{Moghbeli2016}	-	14	☒	☒	☒			☒	☒	☒			☒	☒		☒	☒	☒	☒				☒	☒		☒
15	2018	Improved control strategy of energy storage system considering train operation state	Q1	\cite{Yang2018}	-	3		☒	☒		☒	☒		☒	☒		☒			☒	☒				☒	☒		☒		☒
16	2008	Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network	Conferencia	\cite{Barrero2008}	-	141		☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒			☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒

ITEM	DATOS						TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA									
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REVISTA Cuartil (Q1,Q2,Q3,Q4), Scielo, Conferencia	Cita en formato para ShareLatex desde Mendeley	Patentes	CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	FRENADO REGENERATIVO	OPERACIÓN DEL METRO	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	SUPERCAPACITORES	PRINCIPIOS DE LA RECUPERACIÓN ENERGÍA	PERFIL ENERGÉTICO DE CONSUMO Y RECUPERACIÓN	ARREGLOS DE SUPERCAPACITORES E HÍBRIDOS.	ESTRUCTURA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL METRO.	ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO DEL METRO Y CARACTERÍSTICAS	LIMITES DE OPERACIÓN	ACELERACIÓN, DESACELERACIÓN, VELOCIDAD	CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO	REVISIÓN DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO ESPECÍFICAS	CIRCUITO EQUIVALENTE	OPTIMIZACIÓN	COLOCACIÓN DE ELEMENTOS EN SERIE Y PARALELO	PRONÓSTICOS Y MANEJO DE HORARIOS DEL METRO.	CONSUMOS ENERGÉTICOS INSTANTÁNEOS	TÉCNICAS DE SIMULACIÓN	USO DE CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SUPERCAPACITOR	ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA CARGA	COMPROBACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO EN SERIE Y	PERFIL DE POTENCIA	PERFIL DE ENERGÍA	
17	2014	Optimization of sizing and battery cycle life in battery/ultracapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicle applications	Q1	\cite{Shen2014}	-	223	☒	☒	☒		☒	☒			☒	☒				☒	☒			☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
18	2019	Energy Storage System based on Supercapacitors for a 750 v DC railway power supply	Conferencia	\cite{Castaings2019}	-	3	☒	☒	☒		☒	☒		☒		☒	☒		☒		☒				☒	☒	☒	☒	☒	☒	
19	2018	Modelling and Simulation of Supercapacitor for Energy Storage Applications	Q4	\cite{Popoola2018}	-	5		☒	☒	☒		☒			☒		☒		☒		☒		☒	☒	☒					☒	
20	2007	Energy storage system with Ultracaps on board of railway vehicles	Conferencia	\cite{Steiner2007}	-	332	☒	☒	☒	☒		☒		☒	☒		☒				☒			☒		☒	☒	☒	☒		
21	2015	A Comparative Analysis of Optimal Sizing of Battery-Only, Ultracapacitor-Only, and Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for a City Bus	Q1	\cite{Ostadi2015}	-	136		☒	☒		☒	☒			☒		☒			☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒	☒		
22	2011	Influence of the drive cycles on the sizing of hybrid storage system battery-supercapacitor supplying an electric vehicle	Conferencia	\cite{Sadoun2011}	-	33	☒	☒	☒	☒	☒	☒				☒		☒		☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	

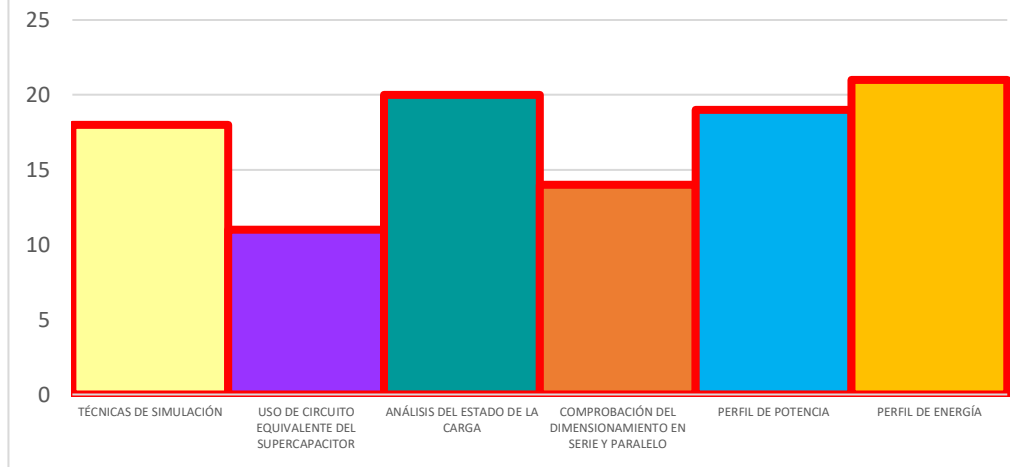
ITEM	DATOS						TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA										
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REVISTA Cuartil (Q1,Q2,Q3,Q4), Scielo, Conferencia	Cita en formato para ShareLatex desde Mendeley	Patentes	CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	FRENADO REGENERATIVO	OPERACIÓN DEL METRO	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	SUPERCAPACITORES	PRINCIPIOS DE LA RECUPERACIÓN ENERGÍA	PERFIL ENERGÉTICO DE CONSUMO Y RECUPERACIÓN	ARREGLOS DE SUPERCAPACITORES E HIBRIDOS	ESTRUCTURA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL METRO	ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO DEL METRO Y CARACTERÍSTICAS	LIMITES DE OPERACIÓN	ACELERACIÓN, DESACELERACIÓN, VELOCIDAD	CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO	REVISIÓN DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO ESPECÍFICAS	CIRCUITO EQUIVALENTE	OPTIMIZACIÓN	COLOCACIÓN DE ELEMENTOS EN SERIE Y PARALELO	PRONÓSTICOS Y MANEJO DE HORARIOS DEL METRO	CONSUMOS ENERGÉTICOS INSTANTÁNEOS	TÉCNICAS DE SIMULACIÓN	USO DE CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SUPERCAPACITOR	ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA CARGA	COMPROBACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO EN SERIE Y PARALELO	PERFIL DE POTENCIA	PERFIL DE ENERGÍA
23	2012	Sizing of ultracapacitors and batteries for a high performance electric vehicle	Conferencia	\cite{Martinez2012}	-	23	☒	☒	☒	☒	☒				☒					☒	☒			☒		☒				☒
24	2018	Hybrid battery-supercapacitor mathematical modeling for PV application using Matlab/Simulink	Conferencia	\cite{Argyrou2018}	-	14			☒			☒					☒			☒				☒	☒	☒	☒	☒		
25	2015	Development of brake system and regenerative braking cooperative control algorithm for automatic-transmission-based hybrid electric vehicles	Q1	\cite{Ko2015}	-	146	☒	☒	☒	☒						☒	☒			☒			☒	☒						
26	2016	Study on regenerative braking system, considerations of design, safety and associated effects	Conferencia	\cite{Patel2016}	-	7	☒				☒					☒							☒					☒		
27	2017	Efficient Utilisation of Regenerative Braking in Railway Operations	Q3	\cite{Singh2017}	-	4	☒	☒			☒		☒			☒	☒				☒									☒
28	2018	An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems	Q1	\cite{Yang2015}	-	128	☒	☒			☒		☒	☒	☒			☒			☒							☒	☒	

ITEM	DATOS					TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA														
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REVISTA Cuartil (Q1,Q2,Q3,Q4), Scielo, Conferencia	Cita en formato para ShareLatex desde Mendeley	Patentes	CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	FRENADO REGENERATIVO	OPERACIÓN DEL METRO	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	SUPERCAPACITORES	PRINCIPIOS DE LA RECUPERACIÓN ENERGÍA	PERFIL ENERGÉTICO DE CONSUMO Y RECUPERACIÓN	ARREGLOS DE SUPERCAPACITORES E HIBRIDOS	ESTRUCTURA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL METRO.	ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO DEL METRO Y CARACTERÍSTICAS	LIMITES DE OPERACIÓN	ACCELERACIÓN, DESACELERACIÓN, VELOCIDAD.	CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO.	REVISIÓN DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO ESPECÍFICAS	CIRCUITO EQUIVALENTE	OPTIMIZACIÓN	COLOCACIÓN DE ELEMENTOS EN SERIE Y PARALELO	PRONÓSTICOS Y MANEJO DE HORARIOS DEL METRO.	CONSUMOS ENERGÉTICOS INSTANTÁNEOS	TÉCNICAS DE SIMULACIÓN	USO DE CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SUPERCAPACITOR	ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA CARGA	COMPROBACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO EN SERIE Y	PERFIL DE POTENCIA	PERFIL DE ENERGÍA		
29	2017	Finding optimal deceleration with serial regenerative braking of electric vehicle using a multi-objective genetic algorithm	Conferencia	\cite{Chakraborty2017}	-	9	☒			☒	☒					☒				☒							☒	☒				
30	2021	A research on regenerative braking energy recovery: A case of Addis Ababa light rail transit	Q1	\cite{BelayKebede2021}	-	0	☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒	☒		☒				☒	☒				☒	☒			☒	
31	2021	A little bit flexibility on headway distribution is enough: Data-driven optimization of subway regenerative energy	Q1	\cite{Li2021}	-	1	☒	☒		☒	☒				☒	☒				☒	☒			☒								
32	2019	Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids	Q1	\cite{Meishner2019}	-	17	☒	☒	☒	☒		☒	☒				☒					☒					☒	☒				
33	2019	Electrical Simulation of Traction Subway System for Energy Recovery and Energy Saving Studies	Conferencia	\cite{Pimenta2019}	-	1	☒	☒	☒	☒	☒						☒		☒	☒				☒	☒			☒	☒			☒
34	2019	Optimal design of automatic train operation information with the consideration of regenerative braking	Conferencia	\cite{Pu2019}	-	1	☒	☒		☒	☒					☒	☒				☒	☒										

ITEM	DATOS						TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA										
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REVISTA Cuartil (Q1,Q2,Q3,Q4), Scielo, Conferencia	Cita en formato para ShareLatex desde Mendeley	Patentes	CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	FRENADO REGENERATIVO	OPERACIÓN DEL METRO	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	SUPERCAPACITORES	PRINCIPIOS DE LA RECUPERACIÓN ENERGÍA	PERFIL ENERGÉTICO DE CONSUMO Y RECUPERACIÓN	ARREGLOS DE SUPERCAPACITORES E HÍBRIDOS	ESTRUCTURA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL METRO	ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO DEL METRO Y CARACTERÍSTICAS	LÍMITES DE OPERACIÓN	ACELERACIÓN, DESACELERACIÓN, VELOCIDAD	CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO	REVISIÓN DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO ESPECÍFICAS	CIRCUITO EQUIVALENTE	OPTIMIZACIÓN	COLOCACIÓN DE ELEMENTOS EN SERIE Y PARALELO	PRONÓSTICOS Y MANEJO DE HORARIOS DEL METRO	CONSUMOS ENERGÉTICOS INSTANTÁNEOS	TÉCNICAS DE SIMULACIÓN	USO DE CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SUPERCAPACITOR	ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA CARGA	COMPROBACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO EN SERIE Y PARALELO	PERFIL DE POTENCIA	PERFIL DE ENERGÍA	
35	2021	Performance enhancement of a hybrid battery-supercapacitor EV energy storage system	Conferencia	\cite{Sharf2021}	-	0	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗				✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
36	2021	Application and prospect of supercapacitors in Internet of Energy (IOE)	Q1	\cite{Ma2021}	-	0		✗	✗	✗	✗	✗					✗		✗		✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
37	2017	Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation	Conferencia	\cite{Ghaviha2017}	-	101	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗			✗		✗	✗	✗	✗				✗	✗
CANTIDAD:							20	25	24	17	24	20	19	13	17	17	18	20	11	11	21	18	15	19	18	11	20	14	19	2	1



SOLUCIÓN DADA MEDIANTE



9. Anexos

ANEXO A

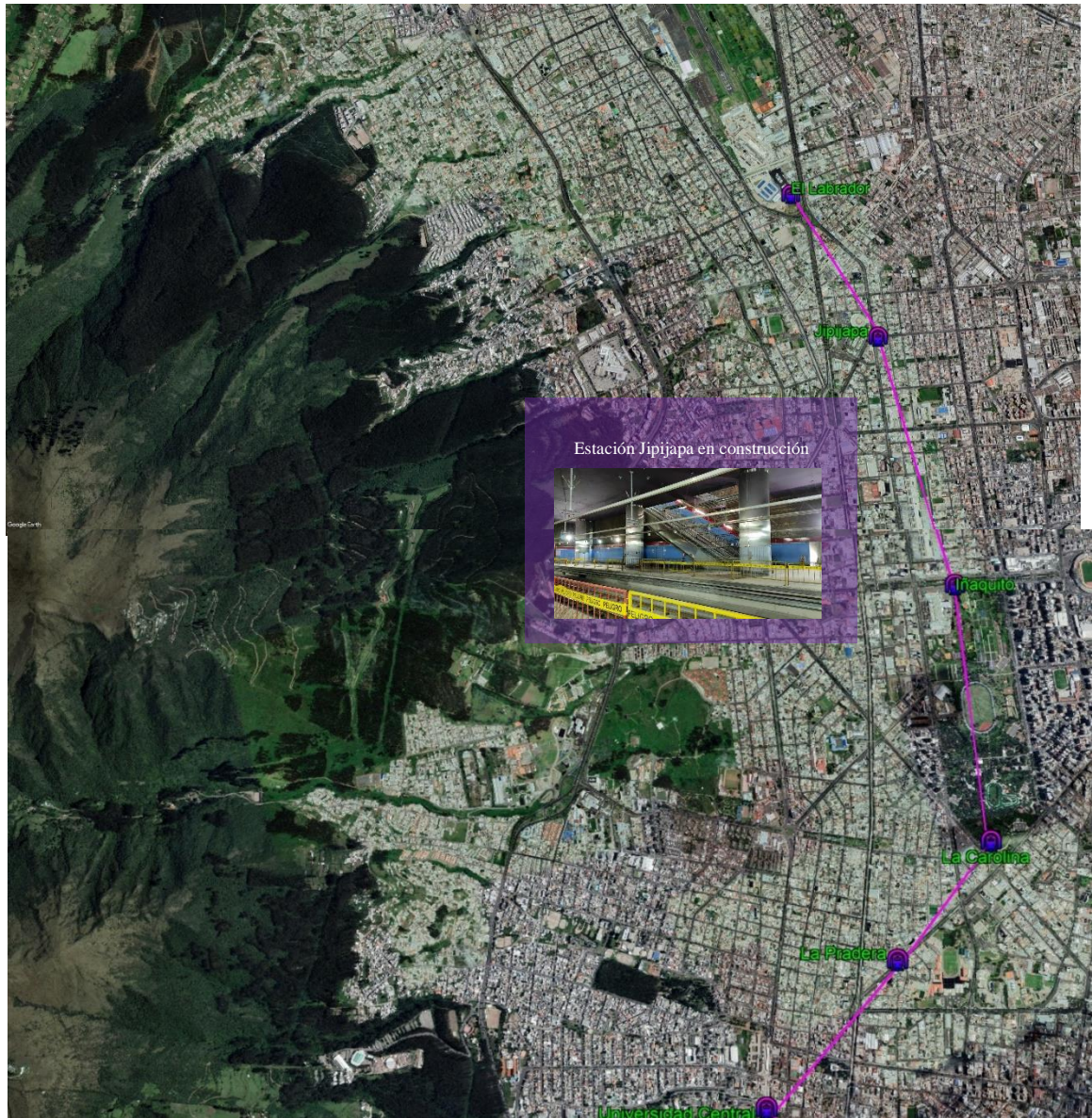


Figura 21: Detalle de las estaciones Norte Metro de Quito
[Autor]

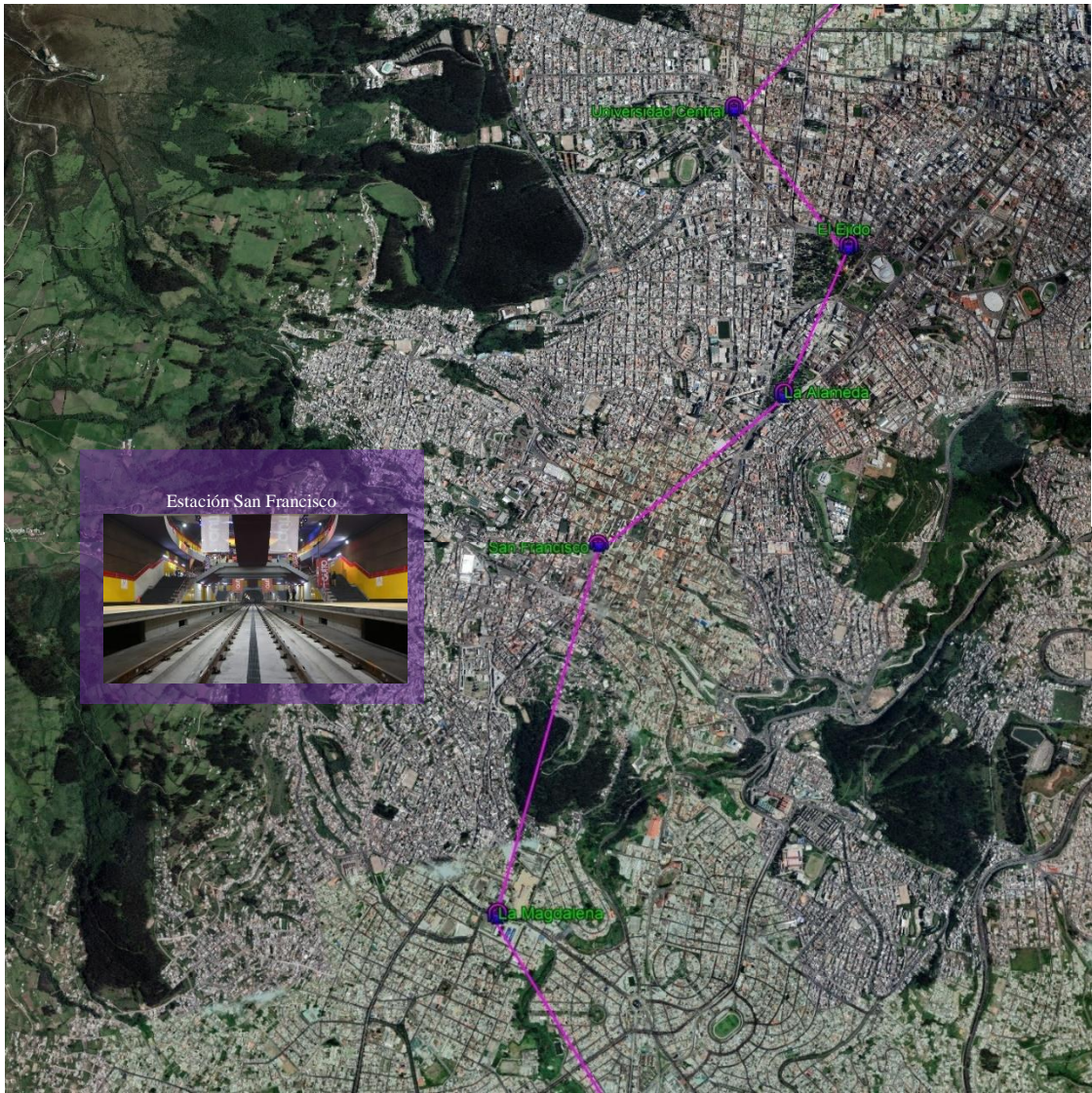


Figura 22: Detalle de las estaciones Centro-Sur Quito
[Autor]

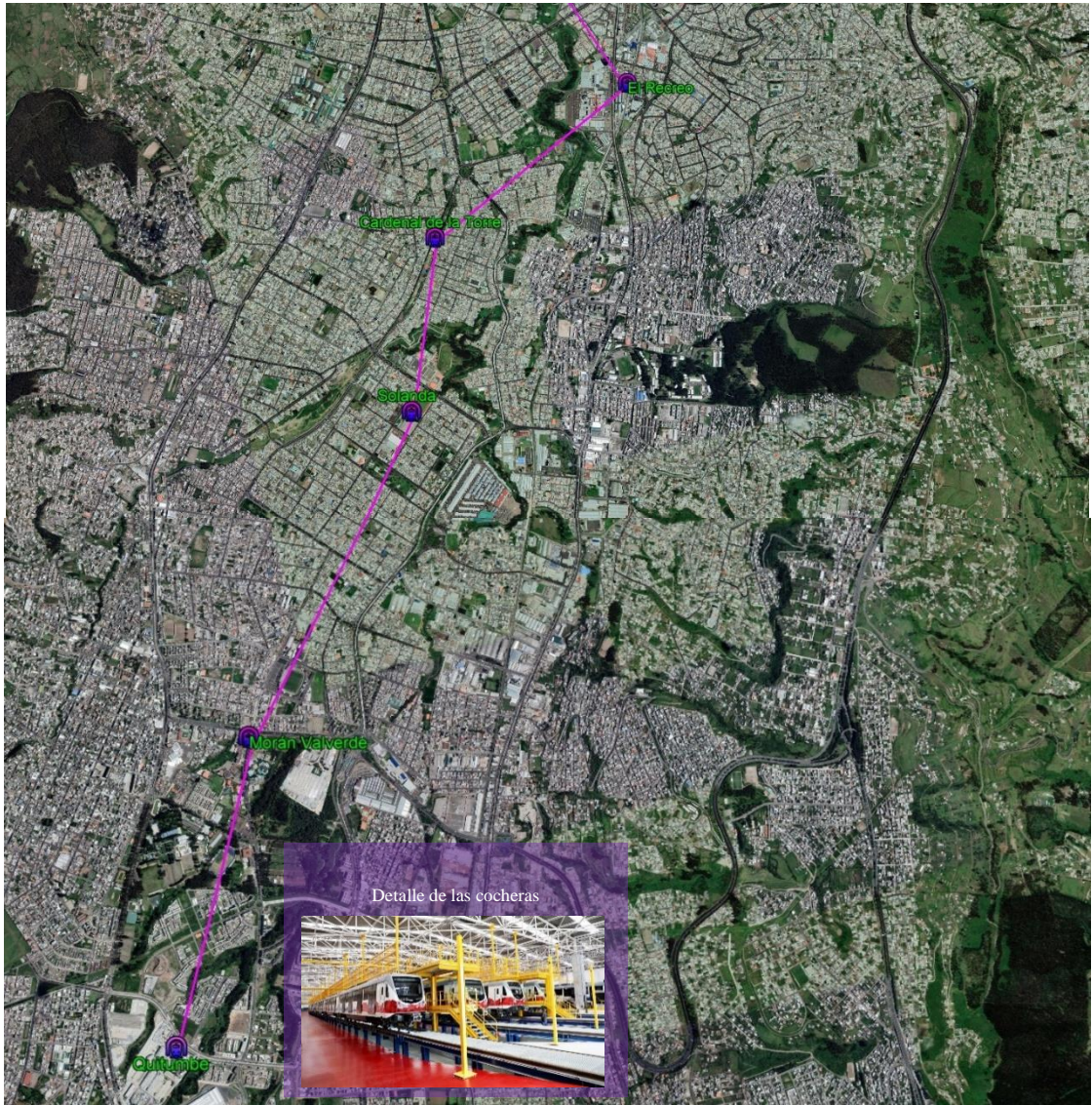


Figura 23: Detalle de las Estaciones del Sur del metro de Quito
[Autor]

ANEXO B

DATASHEET K2 SERIES ULTRACAPACITORS

FEATURES AND BENEFITS*

- Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- High power density
- 650F to 3,000F capacitance range
- Threaded terminals or laser-weldable posts

TYPICAL APPLICATIONS

- Automotive subsystems
- Wind turbine pitch control
- Hybrid vehicles
- Rail
- Heavy industrial equipment
- UPS & telecom systems



PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
Rated Capacitance ¹	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Minimum Capacitance, initial ¹	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Maximum Capacitance, initial ¹	780 F	1,440 F	1,800 F	2,400 F	3,600 F
Maximum ESR _{DC} , initial ¹	0.8 mΩ	0.58 mΩ	0.47 mΩ	0.35 mΩ	0.29 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{DC} ¹	65 A	75 A	100 A	100 A	100 A
Rated Voltage	2.70 V	2.70 V	2.70 V	2.70 V	2.70 V
Absolute Maximum Voltage ²	2.85 V	2.85 V	2.85 V	2.85 V	2.85 V
Absolute Maximum Current	680 A	930 A	1150 A	1500 A	1900 A
Leakage Current at 25°C, maximum ³	1.5 mA	2.7 mA	3.0 mA	4.2 mA	5.2 mA
TEMPERATURE					
Operating temperature (Cell case temperature)					
Minimum	-40°C	-40°C	-40°C	-40°C	-40°C
Maximum	65°C	65°C	65°C	65°C	65°C
Storage temperature (Stored uncharged)					
Minimum	-40°C	-40°C	-40°C	-40°C	-40°C
Maximum	70°C	70°C	70°C	70°C	70°C
PHYSICAL					
Mass, typical	160 g	260 g	280 g	360 g	510 g
Terminals	Threaded or Weldable	Threaded or Weldable	Threaded or Weldable	Threaded or Weldable	Threaded or Weldable
Maximum Terminal Torque (K04)	14 Nm	14 Nm	14 Nm	14 Nm	14 Nm
Vibration Specification	ISO 16750, Table 14	ISO 16750, Table 14	ISO 16750, Table 14	ISO 16750, Table 14	ISO 16750, Table 14
Shock Specification	SAE J2464	SAE J2464	SAE J2464	SAE J2464	SAE J2464

*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details and enclosed information for applicable operating and use requirements.

Page 1 ➤ Document number: 1015370.4 ➤ maxwell.com

Maxwell
TECHNOLOGIES
Enabling Energy's Future®

DATASHEET K2 SERIES ULTRACAPACITORS

PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

POWER & ENERGY	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
Usable Specific Power, P_d^4	6,800 W/kg	5,800 W/kg	6,600 W/kg	6,900 W/kg	5,900 W/kg
Impedance Match Specific Power, P_{max}^5	14,000 W/kg	12,000 W/kg	14,000 W/kg	14,000 W/kg	12,000 W/kg
Specific Energy, E_{max}^6	4.1 Wh/kg	4.7 Wh/kg	5.4 Wh/kg	5.6 Wh/kg	6.0 Wh/kg
Stored Energy, $E_{stored}^{7,11}$	0.66 Wh	1.22 Wh	1.52 Wh	2.03 Wh	3.04 Wh
SAFETY					
Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)	3,400 A	4,700 A	5,700 A	7,700 A	9,300 A
Certifications	UL810a, RoHS	UL810a, RoHS	UL810a, RoHS	UL810a, RoHS	UL810a, RoHS

TYPICAL CHARACTERISTICS

THERMAL CHARACTERISTICS					
Thermal Resistance ($R_{\theta_{ca}}$, Case to Ambient), typical ⁸	6.5°C/W	5.3°C/W	4.5°C/W	3.8°C/W	3.2°C/W
Thermal Capacitance (C_{th}), typical ⁸	190 J/°C	300 J/°C	320 J/°C	410 J/°C	600 J/°C
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 15^\circ C$) ⁹	54 A _{RMS}	70 A _{RMS}	84 A _{RMS}	110 A _{RMS}	130 A _{RMS}
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 40^\circ C$) ⁹	88 A _{RMS}	110 A _{RMS}	140 A _{RMS}	170 A _{RMS}	210 A _{RMS}
LIFE					
DC Life at High Temperature ¹ (held continuously at Rated Voltage and Maximum Operating Temperature)	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%	20%	20%	20%	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%	100%	100%	100%	100%
Projected DC Life at 25°C ¹ (held continuously at Rated Voltage)	10 years	10 years	10 years	10 years	10 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%	20%	20%	20%	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%	100%	100%	100%	100%
Projected Cycle Life at 25°C ^{1, 9, 10}	1,000,000 cycles	1,000,000 cycles	1,000,000 cycles	1,000,000 cycles	1,000,000 cycles
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%	20%	20%	20%	20%

Figura 24: Hoja de datos del supercapacitor BCAP3000