

**RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE FRENADO
REGENERATIVO EN SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO MASIVO
TIPO METRO BASADO EN PROCESOS DE SIMULACIÓN**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE FRENADO
REGENERATIVO EN SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO MASIVO
TIPO METRO BASADO EN PROCESOS DE SIMULACIÓN**

**AUTOR:
HENRY GERMÁN PADILLA VILLALVA**

**TUTOR:
IVÁN PATRICIO MONTALVO GALÁRRAGA**

Quito, febrero 2020

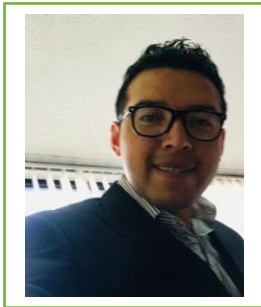
Henry Germán Padilla Villalva

**RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE FRENADO
REGENERATIVO EN SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO MASIVO
TIPO METRO BASADO EN PROCESOS DE SIMULACIÓN**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Henry Germán Padilla Villalva (Y'1987 – J'10 DD 29).

Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito. Áreas de interés: diseño de sistemas eléctricos de distribución, energías renovables, redes inteligentes, transformadores eléctricos de potencia.

hpadillav@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Iván Patricio Galárraga Montalvo (Y'1987 –SM06). Se graduó en Ingeniería Electrónica en la Universidad San Francisco de Quito y de Master en ciencia en Ingeniería de Distribución de Energía. Área de interés: diseño, sistemas de redes de distribución. Actualmente es miembro del Girei (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group).

imontalvo@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

©2020 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Msc Iván Patricio Montalvo Galárraga declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE FRENADO REGENERATIVO EN SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO MASIVO TIPO METRO BASADO EN PROCESOS DE SIMULACIÓN ” realizado por Henry Germán Padilla Villalva, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, D.M., febrero de 2020


.....
Iván Patricio Montalvo Galárraga

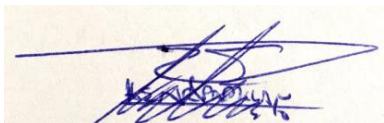
C.C.: 1716480916

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Henry Germán Padilla Villalva, con documento de identificación N° 171636157-9, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de grado/titulación intitulado: *“RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE FRENADO REGENERATIVO EN SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO MASIVO TIPO METRO BASADO EN PROCESOS DE SIMULACIÓN”*, 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, D.M., de febrero de 2020



.....
Henry Germán Padilla Villalva
C.C.: 171636157-9

1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Recuperación de la energía por frenado regenerativo.....	4
3	Metodología y planteamiento del problema.....	6
3.1	Planteamiento matemático	6
3.2	Metodología de simulación	7
4	Análisis de resultados.....	8
5	Conclusiones	14
6	Trabajos futuros	15
7	Referencias.....	15
7.1	Matriz de Estado del Arte	19
7.2	Resumen de Indicadores	23
8	Anexos	25

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Recuperación de la energía eléctrica mediante sistemas de transporte masivo tipo metro	5
Figura 2: Recorrido sistema de transporte masivo tipo Metro de Quito	9
Figura 3: Detalle de operación: a) Aceleración, b) Velocidad, c) Distancia en frenado..	10
Figura 4: Perfiles variables físicas caso 1	10
Figura 5: Perfiles variables físicas caso 2:	10
Figura 6: Perfiles variables físicas caso 3	11
Figura 7: Perfiles variables físicas caso 4	11
Figura 8: Comparativa de aceleración en función de la velocidad	11
Figura 9: Comparativa de Perfiles de velocidad por escenario	12
Figura 10: Comparativa de energía recuperada con variación de masa por caso	12
Figura 12: Variación de la energía recuperada en función de la desaceleración y la capacidad de ocupación.....	13
Figura 13: Variación de la energía recuperada en función de la desaceleración y la velocidad máxima	13
Figura 14: Variación de la energía recuperada en función de la velocidad máxima y la capacidad de ocupación.....	13
Figura 15: Energía recuperada y gastada por caso y por trayecto durante ruta	14
Figura 16. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte	23
Figura 17. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	24
Figura 18. Indicador de solución - Estado del arte	24
Figura 19: Detalle de trazado metro de Quito.....	25

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de línea 1 del metro de Quito	9
Tabla 2: Variables y constantes a considerar para la obtención de tasa de regeneración ..	9
Tabla 3. Matriz de estado del arte	19

RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE FRENADO REGENERATIVO EN SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO MASIVO TIPO METRO BASADO EN PROCESOS DE SIMULACIÓN

Resumen

El presente documento propone la revisión de los resultados obtenidos por medio de micro simulación con el software SUMO que permiten conocer el funcionamiento de sistemas de transporte masivos eléctricos tipo metro considerando la variación de magnitudes físicas que influyen directamente en el perfil energético del medio de transporte. Se abordan estrategias que determinan la cantidad de energía, así como la aplicación que se ha dado a los frenos eléctricos regeneradores o la forma en la que se planifica el uso de tales frenos. También se revisa el principio de funcionamiento del frenado regenerativo, sus ventajas y desventajas. La estrategia de simulación consiste en la colocación del escenario georreferenciado en SUMO para obtener las variables físicas simuladas que son datos de entrada para el procedimiento de modelado. Luego, se establece el modelado matemático de las variables y constantes con el fin de obtener la energía que se recupera en cada trayecto de la ruta del metro de Quito. Los resultados planteados permiten entender la influencia de la velocidad, capacidad de ocupación, desaceleración máxima y otras que se encuentran en análisis. En última instancia se obtiene la tasa de recuperación de energía para cada escenario planteado, estableciendo de los casos planteados el que mayor cantidad de energía recupera.

Palabras Clave: Recuperación de energía, frenado regenerativo, perfil energético, sistema de transporte eléctrico

Abstract

This paper proposes the review of the results gathered by microsimulation using SUMO Software. The simulation allows to know the operation of massive electrical transportation services. The analysis considers the changes of physics variables that directly affects the energy profile of the transport media. This paper describes strategies to calculate the amount of energy that could be extracted with regenerative brakes. It also takes account of executed applications and the planification of the performance of regenerative braking. Then, the basic principles and their pros and cons of electrical regenerative brakes are explained. The simulation strategy consists of implementing a georeferenced data on SUMO. The data is employed to get the simulated variable data as an input for the modeling procedure. The math modeling is presented with all the relevant variables explained, here the proposed formulas to get the amount of energy that is regenerated are presented. In the someway, the recovered energy is calculated for every braking period of the Metro de Quito route. The expected results allow to understand the influence of each variable, also the recovery energy rate that was possible to achieve in each case. Finally, the results also expect to find out the case that allows to get the greater amount of regenerated energy.

Keywords: Energy recuperation, regenerative braking, energy profile, electrical transport system

1 Introducción

El uso de sistemas de transporte eléctrico masivo tipo metro se incrementa rápidamente en todo el mundo debido a sus grandes ventajas incluyendo su gran capacidad, alta velocidad, seguridad y la puntualidad que posibilitan brindar a los usuarios. El ahorro de energía es un asunto crítico para las siguientes décadas, especialmente para las industrias que tienen un alto consumo de energía eléctrica, incluyendo la del transporte, por ello en la actualidad se busca que los medios de transportación masiva sean sustentables y a la vez permitan una reducción de los costos operativos. En este contexto los sistemas de transportación más limpios tienen que ser desarrollados con el objetivo de incrementar la movilidad mientras los impactos medioambientales son limitados. La transportación masiva involucra trenes, metros y tranvías usados en zonas urbanas con alta densidad de población [1]–[5].

Otro aspecto a considerar es el aumento de la demanda de transporte masivo conforme la variación de la población. Para cubrir la demanda de pasajeros y mejorar la eficiencia, las compañías de transporte suelen reducir el espacio entre trenes incrementando la frecuencia de operación, esto genera un aumento significativo del consumo total de energía eléctrica, suponiendo un desafío tanto económico como técnico [1], [3].

Dentro de los esfuerzos para aumentar el ahorro de la energía se encuentra el aprovechamiento de la energía que se genera en los vehículos en fase de frenado, sin embargo debido al tipo de subsistema de suministro de la energía de un solo sentido de flujo y las limitaciones de tensión; los sistemas de frenos regenerativo son limitados y no recuperan toda la energía disponible [6]–[8].

Para permitir un mejor aprovechamiento de la energía que se produce durante el frenado se han planteado alrededor del mundo diversas soluciones, incluyendo la colocación de sistemas de almacenamiento de la energía tanto en los vehículos como junto a las vías del medio de transporte; los sistemas de almacenamiento clásicos son las baterías. Otra solución es el uso de subestaciones de tipo reversible encargadas de entregar la potencia necesaria para la tracción. Es importante destacar que estas soluciones involucran costos complementarios y la efectividad de tales sistemas tiene que ser evaluada [2], [9], [10].

Parte de las soluciones temporales para el aumento del consumo de la energía implica realizar una eficiente programación de los tiempos de salida de los trenes que componen el sistema, esto es una tabla de tiempos. Este es un punto clave a tomar en cuenta para un mejor aprovechamiento de la energía que se produce en los eventos de frenado, ya que tal energía podría ser aprovechada por otros trenes que se encuentren en etapas de aceleración, es decir un proceso de uso instantáneo de la energía; esto a lo largo implica una reducción del consumo total de energía [1], [11], [12].

Las soluciones tienen que ser puestas a prueba, en este sentido se requieren de herramientas como las simulaciones computacionales, simulaciones numéricas y otros que son útiles para entender el comportamiento de todo el sistema de transportación masivo. Estas utilidades pueden emplear diversos modelos en función de los objetivos planteados por la investigación, por ejemplo se pueden usar simuladores de transporte que sean capaces de incorporar varios trenes al mismo tiempo, otros que son capaces de simular la recuperación de la energía en el frenado y otras variables que son importantes de considerar para obtener

resultados cercanos a la realidad, aunque una simulación de este tipo no siempre es fácil de conseguir por las variables complejas que están involucradas, por ello se recurren a simplificaciones y suposiciones necesarias para simular el comportamiento de un sistema complejo como el que requiere un sistema de tipo metro para funcionar [2].

En la actualidad los sistemas de recuperación de energía disipan la energía que no se puede usar por medio de resistencias o es intercambiada con otros trenes que se encuentran en la misma línea; sin embargo, esta tarea requiere una buena exactitud para que el tren cercano absorba toda la energía que se genera [13]–[17].

El trabajo de [18] consiste en llevar a cabo un estudio para hallar la solución que explote la máxima cantidad de energía disponible, para ello considera el uso de nuevas tecnologías como los super capacitores. El método empleado consiste en determinar la cantidad de energía que no se aprovecha en una línea de metro considerando factores como la tensión y el número de subestaciones que contiene el sistema. Luego, se dimensiona el dispositivo de almacenamiento de energía en función de la cantidad de energía que se desperdicia, esto se hace para dos condiciones de operación: emergencia y operación normal. Los autores también mencionan que el sistema de almacenamiento debe ser capaz de cargarse con rapidez, así como poder entregar la potencia almacenada en tiempos cortos, este es el comportamiento típico de los súper capacitores, estos elementos tienen una alta densidad de potencia y pueden ser cargados con rapidez si se emplean altas corriente, además permiten un número ilimitado de ciclos de descarga sin necesidad de mantenimiento y con bajas pérdidas.

La investigación de [19] establece ciertas condiciones que afectan el manejo de la

energía que debe estar disponible para mover los trenes, en este caso se pretende obviar la necesidad de colocar subestaciones que suplan la energía de tracción en todos los puntos de la línea del metro. Los factores a considerar incluyen la masa total del tren con diversos niveles de carga de pasajeros, la velocidad del viento y el diseño del trazado especialmente las subidas. La energía para el caso de esta propuesta es suministrada por medio de super capacitores, el elemento de almacenamiento de la energía se recarga por medio de la energía del freno regenerativo y en ciertas estaciones, se considera también la existencia de cuatro máquinas motrices. Los autores modelan cada uno de los elementos de los subsistemas, incluyendo el subsistema de control para luego simular todas las condiciones y analizar la factibilidad de este tipo de sistema bajo ciertas condiciones previstas.

La investigación presentada en [20], realiza una optimización de la programación de salidas de los sistemas de transporte, es usada como un método de operación energéticamente eficiente de sistemas de transporte masivo, permitiendo la reducción del consumo total de energía. Consiste en un cuidadoso estudio que conduce a la sincronización de las acciones en cada una de las unidades de transporte, maximizando la utilización del frenado regenerativo basado en el análisis de los procesos de aceleración y frenado en función del perfil de velocidad durante todo el recorrido. Esto también contribuye a la reducción de la energía que consume el sistema de tracción, lo que se conoce como manejo eficiente de la energía.

La metodología conocida como tabla de tiempos, que coordina los tiempos en los que ocurre las aceleraciones y frenados por cada turno de la unidad, también se manifiesta en el trabajo de [21] donde se realiza una optimización multiobjetivo

considerando tanto la maximización de la utilización del frenado regenerativo, así como una mejora de la satisfacción de los clientes del sistema de transportación masiva, tales objetivos dependen directamente de la cantidad de estaciones que existen, tiempos de aceleración y frenado, así como la cantidad de pasajeros. Se consideran como funciones el tiempo sobrepuesto entre trenes y el tiempo del usuario. De esta forma basado en simulación se produce la optimización de la tabla de tiempos.

Una parte del trabajo de [22] propone la maximización del intercambio directo de la energía entre trenes, esto se conoce como receptividad de la red y es dependiente del trazado y de la cantidad de paradas. El factor será único para cada sistema, es por ello que la forma para mejorar la receptividad es el aumento de la cantidad de trenes que frenan y aceleran al mismo tiempo, reconociendo que la energía se transporta entre trenes por medio del sistema de suministro de energía. Se evidencia la necesidad de una tabla de tiempos que se conjuga con la implementación de sistema de control y operación en tiempo real, donde se pueda recalcular con facilidad los tiempos de partida de las unidades de transporte con eficacia [23], [24].

Luego de realizar un análisis de las propuestas de otros autores, se ha podido establecer que en el presente trabajo se realizará un análisis de varios casos de estudio que corresponden a la variación de variables físicas como son la aceleración y desaceleración, la velocidad máxima, la capacidad de pasajeros, así como la masa de las unidades de transporte, buscando la tasa de recuperación de la energía en cada uno de los casos, estableciendo mediciones comparativas para encontrar el caso que ofrece la mayor recuperación de la energía, y las variables que más peso tienen en el rendimiento de la recuperación

de energía, para ello se hará uso de la herramienta Traci4Matlab para el control y variación de las variables a considerar [25], [26].

El presente trabajo se divide de la siguiente forma: sección 1 introducción, en la sección 2 se profundiza en la tecnología correspondiente al frenado regenerativo para los sistemas de transportación masiva y los métodos que permiten la utilización de la energía recuperada. La sección 3 plantea la metodología empleada para obtener la simulación de las condiciones de trazado y del perfil de aceleración y de velocidad que seguirá el medio de transporte masivo que se encuentra en estudio, así como las variables que se emplean para poder determinar la energía disponible a partir del uso de frenos regenerativos. La sección 4 presenta los resultados obtenidos y su respectivo análisis considerando las variaciones de las variables físicas que se han identificado como aquellas que modifican la obtención de la energía eléctrica a partir de frenos regenerativos. La sección 5 establece las conclusiones obtenidas, así como el planteamiento de trabajos futuros a realizar a partir de la presente investigación.

2 Recuperación de la energía por frenado regenerativo.

El freno regenerativo consiste de una tecnología de control de DC que reduce la velocidad de los trenes convirtiendo parte de la energía cinética en corriente directa, sustituyendo la disipación de la energía mediante calor en forma similar a lo que se observa en la figura 1, normalmente se lleva a cabo mediante frenos de reóstato. El motor opera como generador durante el frenado y la potencia de salida se aprovecha; si no existen otros trenes que consuman la energía generada, el voltaje

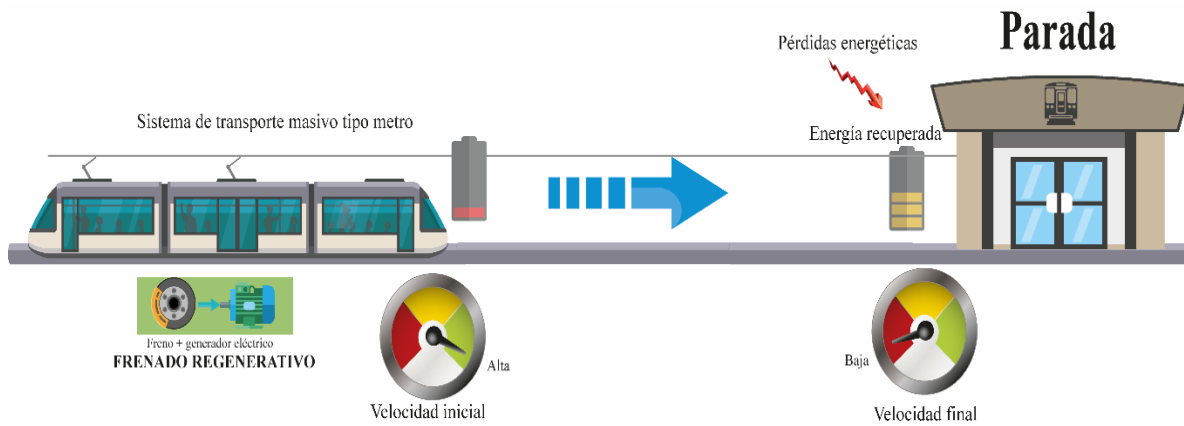


Figura 1: Recuperación de la energía eléctrica mediante sistemas de transporte masivo tipo metro

de la red se incrementa y las protecciones se podrían disparar dejando a toda la red inhabilitada. Por ello, se limita la cantidad de energía que se recupera y la que se disipa mediante resistencias eléctricas, de tal forma de evitar sobrecargas de la red del sistema de transporte [6], [27], [28].

El dimensionamiento adecuado del sistema de recuperación de energía involucra un conocimiento profundo de todo el sistema de transporte masivo, esto incluye perfil de potencia de los trenes y de los motores del sistema tipo metro, las características del trazado, velocidad promedio, perfiles de aceleración y desaceleración, lo que permitirá determinar la cantidad de energía que se encuentra disponible debido a los frenos regenerativos en cada uno de los trayectos que cumple en la ruta el sistema de transporte masivo [29]–[31].

Según [32] la energía que se recupere mediante frenado regenerativo podría no ser la suficiente para lograr que el sistema de transporte pare completamente debido a las limitaciones de disipación que podrían existir, así como que la gran cantidad de potencia disponible podría no ser adecuada para el sistema de generación, de ello surge la necesidad de colocar un sistema de frenado por fricción que coexista con el freno regenerativo. Tales sistemas se deben diseñar para cumplir con dos premisas: permitir la acción de frenado en

tiempos adecuados en condiciones normales y de emergencia, así como poder capturar y recuperar tanta energía como sea posible. La investigación de [33], expresa que aspectos tales como la velocidad y la aceleración modifican significativamente el rendimiento de la regeneración de energía, por ejemplo una conducción que implica frenados más bruscos o con poca distancia pueden provocar que la energía que se recupere sea menor, además de que la energía necesaria no puede ser completamente abastecida por los componentes de generación eléctrica del freno. Por otro lado, el trabajo de [34] expone que más del 50% de la energía que requiere un sistema de transporte tipo metro corresponde al sistema de tracción, mientras que la iluminación corresponde al 20%, mientras que ascensores y servicios generales conforman la necesidad de energía restante de los sistemas de electricidad. Se establece la necesidad de dividir las formas de operación del sistema de tracción, esto es aceleración, mantenimiento y frenado o desaceleración. Esta división es adecuada para poder determinar la energía que está inmersa en cada proceso y las pérdidas inherentes según sea el caso. La utilización de la energía recuperada por frenado regenerativo se puede realizar de tres formas diferentes, el más común es la optimización de la programación de

aceleración y desaceleración de cada una de las unidades, conocida como tabla de tiempos. En este método, la energía que genera un tren en etapa de frenado es consumido al mismo tiempo por una unidad que está acelerando. El segundo método consiste en almacenar lo recuperado utilizando sistema de acumulación de energía. Lo regenerado es posteriormente utilizado por los trenes que aceleran. La última forma de realizar el aprovechamiento de la energía es por medio de subestaciones que sean bidireccionales en el sentido del flujo de la energía, devolviendo directamente lo recuperado al sistema de transmisión del transporte tipo metro [35], [36].

3 Metodología y planteamiento del problema

La metodología empleada para la obtención de la tasa de recuperación energética de los sistemas de transporte masivo eléctricos tipo metro por medio de herramientas de procesamiento matemático, así como la estrategia para la ejecución de micro-simulación del sistema de transporte masivo eléctrico en el software SUMO se presenta en lo sucesivo, incluyendo el escenario planteado.

3.1 Planteamiento matemático

Para entender la cantidad de energía que estará disponible a partir del uso del frenado regenerativo, es preciso determinar las fuerzas que están inmersas en los procesos de aceleración y desaceleración, y en general en la tracción de los trenes, lo que depende directamente de la topología de la línea y de las características de los dispositivos. En esencia el movimiento del sistema de transporte depende de la primera ley de movimiento de Newton (1) [35]

$$\sum_{i=1}^n F_i = m * a \quad (1)$$

Donde F_i representa las fuerzas resultantes que tienen efecto en el movimiento del metro, m es la masa total del medio de transporte y a es la aceleración del tren.

Las fuerzas que actúan en el movimiento del sistema de transportación se pueden dividir en dos grandes categorías:

F_{tr} : Fuerzas producidas por los motores de tracción, en el caso de la aceleración son fuerzas positivas y para permitir el frenado son fuerzas negativas las que se involucran.

F_{kr} : Fuerzas que tienen efectos negativos en el movimiento del tren, estas son debidas a la masa del tren, el gradiente de línea y la existencia de curvas. De esta forma la sumatoria de (1) se puede simplificar a:

$$F_{tr} - F_{kr} = m * a \quad (2)$$

Las fuerzas que se contraponen al movimiento se expresan en (3)

$$F_{kr} = F_r + F_{gr} + F_c \quad (3)$$

Las fuerzas que se oponen al movimiento son causadas por el medio de transporte:

F_r su propia resistencia a permitir el movimiento, F_{gr} los gradientes de línea y F_c las curvas del trazado. F_r puede ser modelada según (4)

$$F_r = f_r * m * g * \cos(\alpha) \quad (5)$$

Donde f_r es el coeficiente de resistencia al rodamiento, g es la gravedad y α es el ángulo de inclinación del trazado.

Existen ciertas formas de cálculo de los coeficientes involucrados que son ampliamente difundidas, una de ellas es la fórmula de Davis que expresa de mejor forma las fuerzas que se oponen al movimiento y se expresan en (5)

$$F_r = 6.4 * m + 130 * n + 0.14 * V_t + \beta * [0.046 + 0.00065 * (N - 1)] * \alpha * V_t^2 \quad (5)$$

V_t representa la velocidad del tren, m la masa del tren, n el número de ejes, N el

número de vehículos, mientras que α es la superficie del tren y β es el coeficiente que indica si el sistema de transporte está en un túnel. La siguiente fuerza que se opone al movimiento se expresa en (6)

$$F_c = \frac{1}{2} C_w A * \rho * v^2 \quad (6)$$

Donde C_w es el coeficiente de arrastre, A es el área frontal proyectada del sistema de transporte, ρ es la densidad del aire y v es la velocidad del tren. La fuerza gradiente se expresa en (7)

$$F_{gr} = m * g * \sin(\alpha) \quad (7)$$

Sustituyendo todas las ecuaciones planteadas en (2) y (3) podemos obtener (8)

$$F_{tr} = f_r * m * g * \cos(\alpha) + \frac{1}{2} C_w A * \rho * v^2 + m * g * \sin(\alpha) \quad (8)$$

Resulta también relevante entender que idealmente el torque será equitativamente distribuido entre todos los vagones de la unidad de transporte, sabiendo que cada vagón contará con un determinado número de ejes, el torque en cada rueda y eje puede ser calculado usando (9) y (10)

$$T_a = \frac{F_{tr} * r}{4 * n_c} \quad (9)$$

$$\omega_a = \frac{v}{r} \quad (10)$$

Donde r es el radio de las ruedas del tren, n_c es el número de carros de cada unidad y T_a , ω_a son el torque y la velocidad angular en el eje de cada vagón. Para asegurar contar con alto torque en cada rueda, las unidades de transporte tipo metro cuentan con cajas de cambios desde el eje de los motores de inducción, de esta forma (9) y (10) se modifican por (11) y (12).

$$T_G = \frac{T_a}{\gamma_G} + \frac{T_a(1 - \eta_G)}{\gamma_G} \quad (11)$$

$$\omega_G = \omega_a \cdot \gamma_G \quad (12)$$

En estas ecuaciones están representadas las pérdidas del vehículo, γ_G es la relación de

la caja de cambios y η_G es eficiencia del mismo sistema.

Estas ecuaciones permiten la representación del movimiento del metro, en lo que respecta a la regeneración de la energía en el frenado, es vital conocer cuáles son las magnitudes que influyen en la cantidad de energía que es factible recuperar. Tal energía que se puede regenerar sufre varias pérdidas en los procesos de transporte, conversión, elevación de magnitud que son necesarios para que sea aprovechable. En este sentido la energía en primera instancia es de tipo mecánica, y se calcula mediante (13).

$$P_{mec} = T_G * \omega_G \quad (13)$$

La potencia mecánica también se puede relacionar a los ejes de ruedas de cada vagón, lo que se expresa mediante (14).

$$P_{regen} = E * n_c * \eta_{inv} * \eta_{motor} * P_{mec} \quad (14)$$

Donde E es la cantidad de ejes por vagón, n_c es el número de vagones, η_{inv} es la eficiencia en la inversión, η_{motor} es la eficiencia del motor. Realizando sustituciones de las fuerzas, torque y otros involucrados se obtiene (15), con la cual es factible el cálculo de la potencia regenerada por medio del frenado considerando las fuerzas existentes y las pérdidas de cualquier componente físico.

$$E_{regen} = \eta_{inv} * \eta_{motor} * [(F_r + F_{gr} + F_c + m * a) - \frac{E * n_c * T_a(1 - \eta_G)}{r}] * v \quad (15)$$

3.2 Metodología de simulación

Para obtener un sistema en SUMO que sea funcional del metro de Quito, se debió hacer un análisis de los archivos base que permiten la simulación del metro en otras ciudades. Actualmente se cuenta con una simulación lo más cercana a la real de las 15 paradas y del recorrido en su totalidad de la línea 1 del metro de Quito.

Luego de haberse obtenido un escenario de funcionamiento real de un sistema de transporte masivo tipo metro basado en el trazado en el que transitará el metro de la ciudad de Quito, se puede usar este mismo escenario para comparar los cambios en las variables físicas involucradas en el sistema de transporte incluyendo aceleración, velocidad en función de variables como el peso (tasa de ocupación), la velocidad promedio y otros que pueden variar la cantidad de energía que es necesaria para lograr que el sistema de transporte pueda frenar en cada una de las 15 paradas que componen el trazado de la línea 1 del metro.

En función del modelamiento ya existente de un vehículo del software de micro simulación SUMO, se pueden obtener ciertos parámetros eléctricos propios de un sistema que tiene frenado regenerativo, para el presente caso de estudio se obtiene tasas de recuperación basadas en varios factores simulados, dando como resultado la tasa teórica que se deriva de los procesos de frenado que se caracterizan en una ruta en la cual el vehículo es seguido en todo momento recogiendo los datos que arroja la simulación.

Los datos recogidos en los que se incluye la tasa de recuperación de la energía por frenado regenerativo, luego son procesados en el software de modelamiento para de esta forma presentar los resultados que arroja la simulación respecto a las variables físicas que se encuentran en estudio, en función de los cambios que se realicen en la tasa de ocupación, la velocidad y más que pueden influenciar el comportamiento de las máquinas motrices y de recuperación de la energía, así como las pérdidas energéticas que produce el sistema. El proceso que se sigue para la simulación y posterior análisis se puede notar en el siguiente pseudocódigo.

Simulación y análisis de la recuperación de energía en sistema de transportación masiva

Paso 1 Inicializa t (0:1:ctetiempo)
Entrada v_{max} , $acel_{max}$, $desacel_{max}$, Archivo georeferenciado, constantes **Para Todo** Caso
Inicializa Ruta ida, Ruta vuelta
Salida Vectores Velocidad, Aceleración, Distancia (0:1:ctetiempo)
Paso 2: Para todo Trayecto
Genera No. Pasajeros_i
Paso 3: Para todo Caso
Para n=1 **paso 1 hasta** ctetiempo
Si $acel_n > 0$
Almacena V_{cons} , a_{cons} , d_{cons}
Sino
Si $acel_n = 0$
Almacena V_{mant} , a_{mant} , d_{mant}
Sino
Si $acel_n < 0$
Almacena V_{freno} , a_{freno} , d_{freno}
Fin Si
Fin Si
Fin Si
Fin Para
Paso 4: Para i=1 paso 1 hasta No. Trayectos
Para n=1 **paso 1 hasta** ctetiempo
Encuentra t_{ini} , t_{fin}
Fin Para
Fin Para
Paso 5: Para todo Trayecto
Cálculo

$$F_{rr} = f_r * m * g * \cos(\alpha) + \frac{1}{2} C_w A * \rho * v^2 + m * g * \sin(\alpha)$$

$$E_{regenerativo} = \eta_{inv} * \eta_{motor} * (1 - n_g) * \left(\frac{K1 * a_{freno} + m * a_{freno}^2}{2} \right) * (t_{fin} - t_{ini})^2 + \left(\frac{Kae * d_{freno}^3}{4} \right) * (t_{fin} - t_{ini})^4$$

Paso 6: Para j=1 paso 1 hasta Caso
Sumatoria E_{regen} total caso
Gráfica E_{regen}
Terminar

4 Análisis de resultados.

Para realizar el análisis del potencial que existe en frenado regenerativo en sistemas de transporte eléctrico tipo metro, se plantean 4 escenarios de operación del

sistema, en donde existen variaciones de velocidad, aceleración y desaceleración para poder determinar que ocurre con la distancia y tiempo de frenado, magnitudes claves para el cálculo de energía que es factible recuperar. Los escenarios involucran cambios en la aceleración entre 1 y 1.5 m/s², desaceleración entre 0.5 y 1 m/s² en tanto la velocidad presenta variaciones de 60 km/h a 100 km/h. En la figura 2 se muestra la ruta que siguen los sistemas de transporte eléctrico tipo metro con sus respectivas paradas y cambios en el trazado, aspectos que se consideran en cada uno de los escenarios planteados, una mejor vista de este trazado en formato georreferenciado se puede apreciar en los anexos.

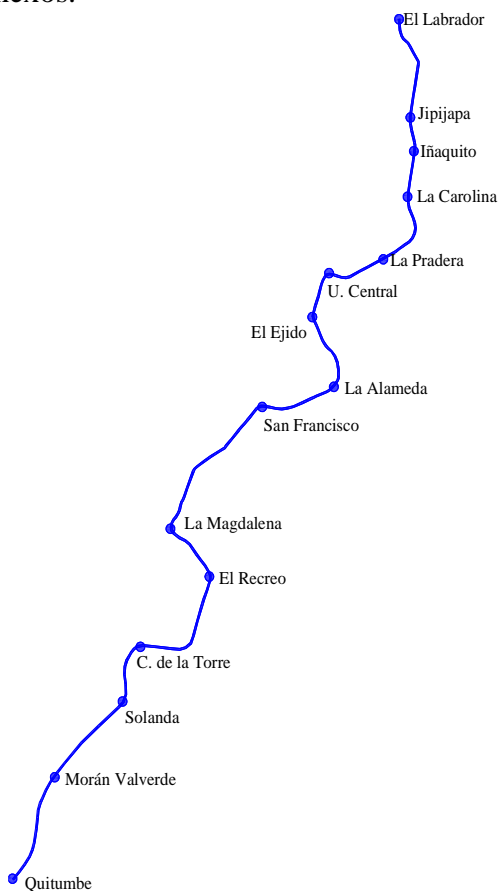


Figura 2: Recorrido sistema de transporte masivo tipo Metro de Quito

Se analiza la importancia de magnitudes como la variación de la capacidad de ocupación estableciendo lo que ocurre

cuando se encuentra con poca cantidad de pasajeros y con capacidad máxima. Se producen cambios en la velocidad y la aceleración pudiendo determinarse las condiciones donde se recupera más energía y aquellas que tienen poca relevancia en la obtención de energía por medio de frenado regenerativo. Las características de los 18 trenes que van a operar dentro de esta ruta en sentidos de ida y vuelta se muestran en la tabla 1 realizada por los autores.

Tabla 1: Características de Línea 1 del metro de Quito

PROPIEDAD	VALOR
DISTANCIA	22 km
NO. DE PARADAS	15
DISTANCIA	22 km
ANCHO DE VÍA	1435 mm
MARCA DE TREN	CAF INNEO
NO DE TRENES	18
NO DE VAGONES POR TREN	6
NIVEL DE VOLTAJE	1500 Vdc
TIPO DE ALIMENTACIÓN	Tercer riel
TIEMPO DE VIAJE	34 minutos (estim.)
NÚMERO DE PASAJEROS DIARIOS	377000 (estim.)
CAPACIDAD PASAJEROS	1259 (6 por m ²) 144 asientos
LONGITUD DEL TREN	109.104 m
VELOCIDAD MÁXIMA	100 km/h

En lo que respecta a los parámetros físicos que influyen y afectan el rendimiento de la regeneración de energía tanto la reducción por ámbitos de orden físico como limitaciones de elementos como motores, inversores, cajas de cambio, así las constantes empleadas y sus valores se resumen en la tabla 2 de [36].

Tabla 2: Variables y constantes a considerar para la obtención de tasa de regeneración

PARÁMETRO	VALOR
ÁREA FRONTAL (A)	9 m ²
COEF. ARRASTRE (C _w)	0.5
MASA (M)	27 ton + peso de pasajeros
DENSIDAD AIRE ρ	1.225 kg/m ³
COEF ROZAMIENTO (F _R)	0.002
GRAVEDAD (G)	9.81 m/s ²
ÁNGULO α	0°
REND. CAJA η _G	96 %
REND. INVERSOR η _{inv}	90 %
REND. MOTORES η _{mot}	90 %
MASA DE PASAJERO (PROM)	68 kg

El funcionamiento del sistema durante los primeros segundos de operación del metro se puede notar en la primera parte de la figura 3, es evidente que se producen los procesos anteriormente nombrados del sistema de tracción, esto es aceleración, mantenimiento y desaceleración o frenado. Se puede también notar que en función de la distancia que se recorre se mantiene un tiempo mayor una aceleración cercana a 0. La velocidad se muestra en la segunda parte de la figura, donde existen periodos de aumento de velocidad, otros donde se mantiene y aquellos donde se reduce la velocidad. La distancia recorrida en etapa de frenado se observa en la parte c de la figura, se nota que en el primer trayecto la distancia es apenas perceptible, aumentando para los siguientes trayectos.

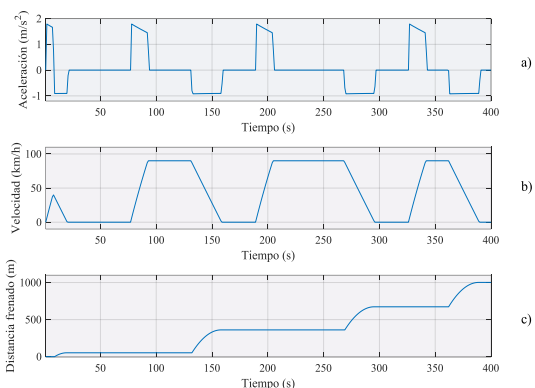


Figura 3: Detalle de operación: a) Aceleración, b) Velocidad, c) Distancia en frenado

El escenario 1 plantea cambios suaves en la velocidad hasta alcanzar sus mínimos y máximos, en función de las distancias de cada tramo de aceleración de 1.5 m/s^2 , desaceleración de 1 m/s^2 y velocidad de 90 km/h . Hay puntos donde la velocidad máxima se mantiene dependiendo de la distancia con aceleración igual a 0, teniendo luego una rampa suave de bajada. En este caso, se puede reconocer que la distancia de frenado se mantiene, esto se aprecia en la figura 4.

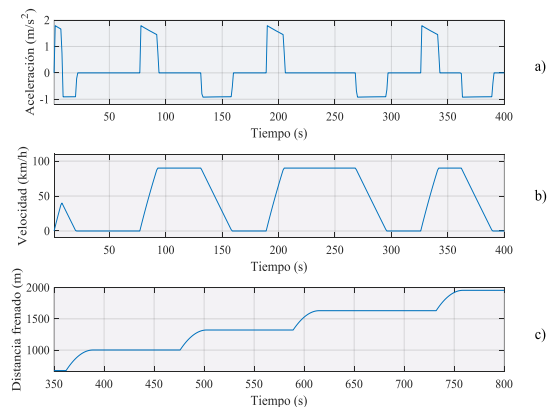


Figura 5: Perfiles variables físicas caso 1

El caso 2 plantea la reducción de la desaceleración a 0.5 m/s^2 , y la aceleración a 1.5 m/s^2 . La figura 5 da nota de ello, la velocidad máxima de 100 km/h apenas se alcanza en cada recorrido y la cantidad de tiempo que implican los procesos de frenado aumenta, notando que la velocidad máxima se alcanza durante un periodo mayor en el cuarto trayecto del periodo de análisis mostrado, la cantidad de distancia recorrida no se modifica significativamente.

El escenario 3 muestra una situación en la que el metro debe ir a una velocidad muy por debajo de su operación máxima, esto es

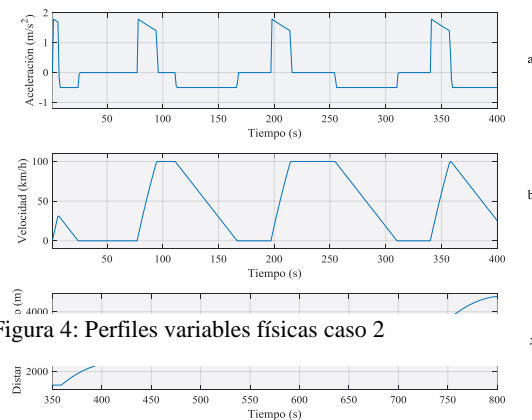


Figura 4: Perfiles variables físicas caso 2

60 km/h , con aceleración y desaceleración de 1 m/s^2 . La cantidad de tiempo en que la aceleración es nula, es muy amplia, con lo cual las rampas de aceleración y

desaceleración en contraste son cortas y pronunciadas.

Así mismo, la cantidad de distancia a recorrer para producirse en frenado en las paradas del sistema tipo metro es recorrida en corto tiempo y con un menor esfuerzo. Otro aspecto a destacar es que se ha mantenido el tiempo de análisis de la operación. En este lapso de tiempo, el metro no ha podido completar con su recorrido a la velocidad planteada lo que también podría provocar problemas incluyendo que otros trenes lo alcancen si no existe una adecuada planificación de la operación, esto es observado en la figura 6.

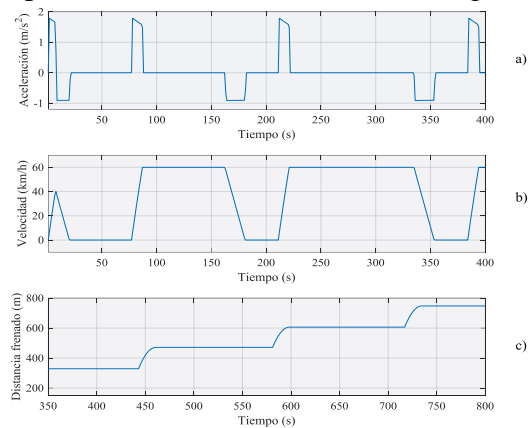


Figura 6: Perfiles variables físicas caso 3

El caso 4 expone la modificación de la desaceleración en este caso es de 0.75 m/s^2 , mientras que la velocidad máxima es de 100 km/h y la aceleración se mantiene en 1.5 m/s^2 .

Estableciendo una comparativa al escenario 2, la principal diferencia está en la rampa más ligera que tiene la desaceleración y el contraste de una rampa más pronunciada en los procesos de aceleración en varios casos.

En función de la distancia que tiene cada trayecto, la velocidad máxima se mantiene durante más tiempo en el tercer trayecto revisado, mientras que existe una menor porción en etapa de mantenimiento en el segundo trayecto observado. En lo que se refiere a la desaceleración no se nota

grandes variaciones para cada trayecto, esto se observa en la figura 7.

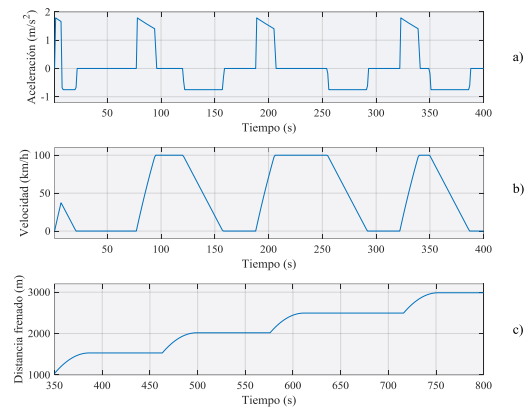


Figura 7: Perfiles variables físicas caso 4

La figura 8 muestra la diferencia que existe en la magnitud de aceleración y desaceleración que se presenta en el recorrido del metro, considerando las magnitudes en m/s^2 que competen a los casos anteriormente planteados. Se puede notar que la aceleración y desaceleración se presenta en cada caso en diferentes puntos de partida, de igual forma, existen tiempos en que la aceleración es cero en varios tramos de recorrido, tanto cuando se encuentra con una velocidad constante, así como cuando el sistema de transporte masivo realiza cada una de las paradas en su recorrido. También se debe notar que existen largos periodos donde la desaceleración se mantiene en su máximo valor, esto se nota más en el caso 2.

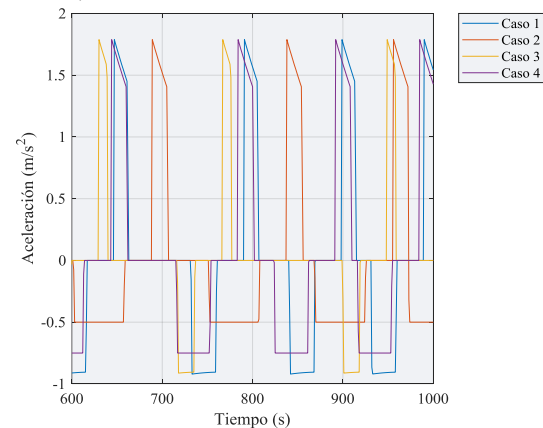


Figura 8: Comparativa de aceleración en función de la velocidad

La figura 9 plantea una comparativa del perfil de velocidad por cada escenario planteado. Se puede notar que la cantidad de tiempo que se puede mantener la velocidad máxima planteada es diferente, sin embargo, ello no quiere decir que la operación a velocidad lenta o media permite realizar el recorrido de mejor forma, esto se podrá determinar con análisis posteriores, sabiendo que el objetivo de la presente investigación es determinar la tasa de recuperación de la energía bajo diversas condiciones. También se puede notar que, aunque el caso 2 y caso 4 tienen la misma velocidad máxima, la aceleración hace que el perfil de cada caso sea diferente, modificando aspectos como la rampa de decrecimiento de la velocidad de máxima a cero.

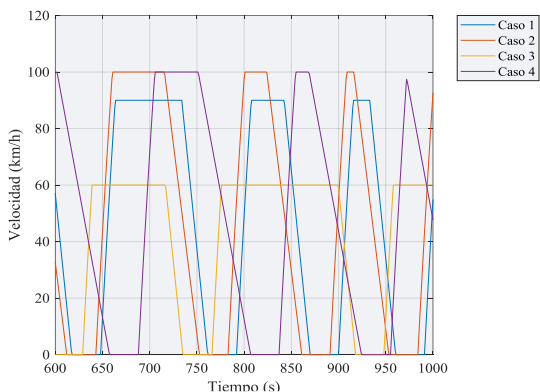


Figura 9: Comparativa de Perfiles de velocidad por escenario

Una vez que se analizan las variables físicas que se han simulado considerando todos los aspectos relevantes a un transporte eléctrico masivo tipo metro, es necesario revisar en conjunto con las variables de (15) en donde la variable masa total es la más relevante. La figura 10 muestra la variación de la energía recuperada en cada caso planteado, cuando la cantidad de pasajeros y por tanto la masa total del sistema varía en cada uno los tramos en estudio. Se puede notar que en cada caso se mantiene una tendencia por cada trayecto, siendo el segundo caso donde más energía se recupera y el tercer

caso con menos recuperación, existiendo gran diferencia entre los casos.

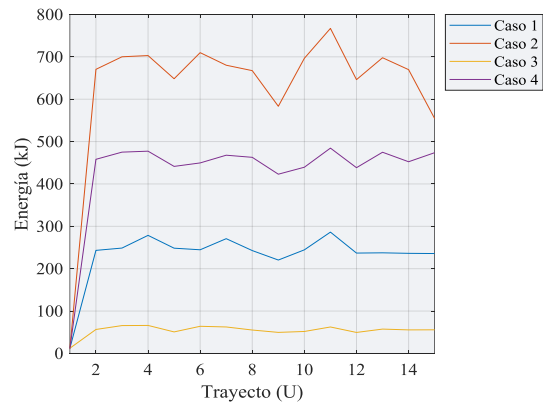


Figura 10: Comparativa de energía recuperada con variación de masa por caso

La figura 11 presenta la cantidad de energía que es recuperable en función de la variación porcentual del número de pasajeros en la unidad y por cada caso planteado. Se debe notar la gran diferencia existente de la cantidad de energía recuperable en función del caso planteado, siendo el caso 3 el que menos posibilidad de obtener energía recuperada presenta, mientras que es el caso 2 el que manifiesta la mejor cantidad de energía recuperada. Es importante notar que también existe una pendiente diferente por cada caso planteado, con pocas variaciones en función de la variación de la capacidad de ocupación, esto muestra que esta no es una variable significativa en la recuperación de energía.

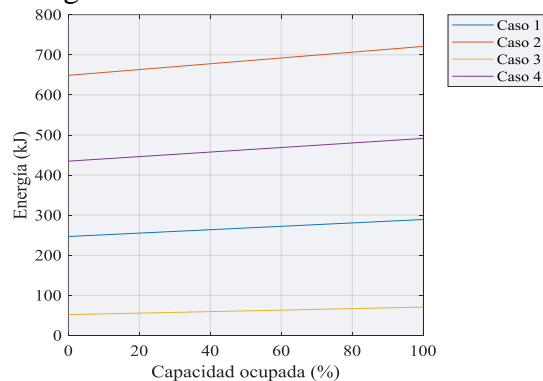


Figura 11: Tasa de recuperación de energía en función de la Capacidad de pasajeros por caso

La figura 12 muestra la variación de la energía recuperada en función de la

desaceleración que presenta el medio de transporte tipo metro y también considerando la variación que existe cuando la capacidad de pasajeros se modifica teniendo presente un 25%, 50%, 75% y 100% de la capacidad ocupada.

En la gráfica se nota con que la energía recuperada es mayor cuando la magnitud de la desaceleración es menor y que tiene tendencia a estabilizarse cuando la rampa de desaceleración tiene una pendiente menos pronunciada es decir en los valores mayores. Así mismo se puede identificar que tal como se notó en la figura 10, una mayor capacidad de ocupación hace que la energía recuperada sea mayor.

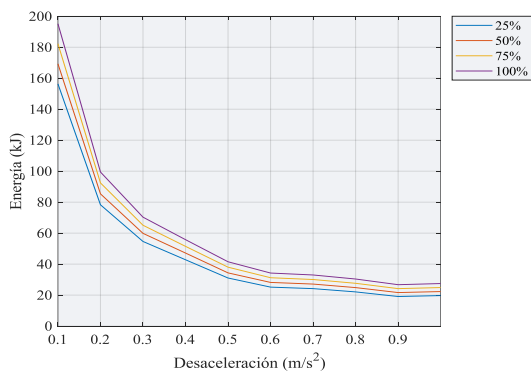


Figura 112: Variación de la Energía recuperada en función de la desaceleración y la capacidad de ocupación

La figura 13 muestra la energía recuperada en kJ en función de la desaceleración. La variación se da desde 0.1 a 1 m/s², notando que mientras menor sea la desaceleración, se obtiene mayor cantidad de energía regenerada en el período de análisis. La figura 13 muestra 3 variaciones de la velocidad máxima alcanzada, esto es a 35 km/h, a 45 km/h y a 55 km/h. Como se puede observar una variación de 10 km/h genera grandes variaciones de la energía que se recupera por procesos de frenado. Se debe indicar que la velocidad de 45 km/h que es el caso intermedio, es la velocidad promedio máxima a la que debe viajar el metro para cumplir con el tiempo establecido de 34 minutos por viaje. Cuando la magnitud de

la desaceleración tiene sus valores mayores, se puede observar que el valor se estabiliza.

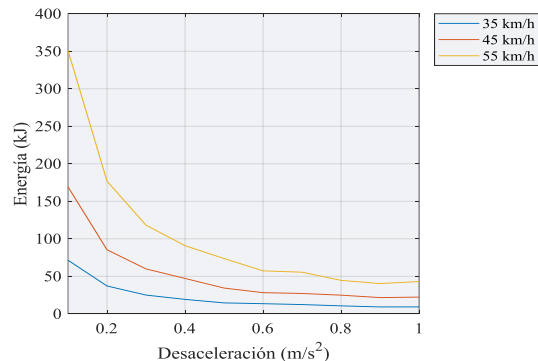


Figura 12: Variación de la Energía recuperada en función de la desaceleración y la velocidad máxima

La figura 14 muestra la variación de la desaceleración según el cambio de la velocidad, con velocidad desde 10 km/h a 100 km/h lo que genera una tendencia que va en aumento exponencial de la cantidad de energía recuperada en kJ, llegando a su valor máximo cuando la velocidad también es la máxima posible para el medio de transporte masivo eléctrico tipo metro. También se observan que los cambios en la capacidad de ocupación producen cambios insignificantes de la magnitud de la energía recuperada, ya que no hay aumentos de la energía recuperada importantes con una ocupación de pasajeros del 100%.

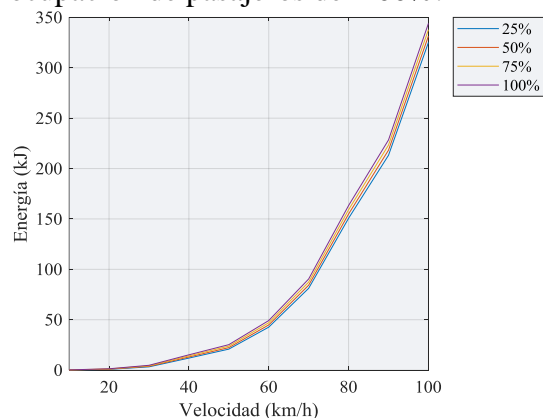


Figura 13: Variación de la Energía recuperada en función de la velocidad máxima y la capacidad de ocupación

La figura 15 muestra la energía que se puede recuperar en forma acumulativa por cada caso, se puede notar que el escenario

2 es el que mejores posibilidades de acumulación de la energía muestra.

Se nota una pendiente a lo largo de todo el trayecto, sabiendo que el tren alcanza su velocidad máxima en cada aceleración-mantenimiento-frenado que constituyen las acciones que ejecuta en cada tramo el medio de transporte. Existen grandes diferencias entre lo que se obtiene en el mejor caso y el peor caso al final de la ruta manejada, siendo mayor a 10 veces la diferencia de la energía entre el caso 2 y el caso 3, así mismo se puede notar la

diferencia en pendiente, mejorando la cantidad de energía que se recupera cada vez más en el caso 2.

Realizando comparativa a la cantidad de energía que es necesaria para la movilidad del sistema de transporte eléctrico se nota que la mayor recuperación es de más del 34% de la energía por medio de frenado regenerativo, mientras que es menos del 5% la energía recuperada por frenado respecto al consumo, en el caso que menos energía se está regenerando, debido al cambio de variables físicas.

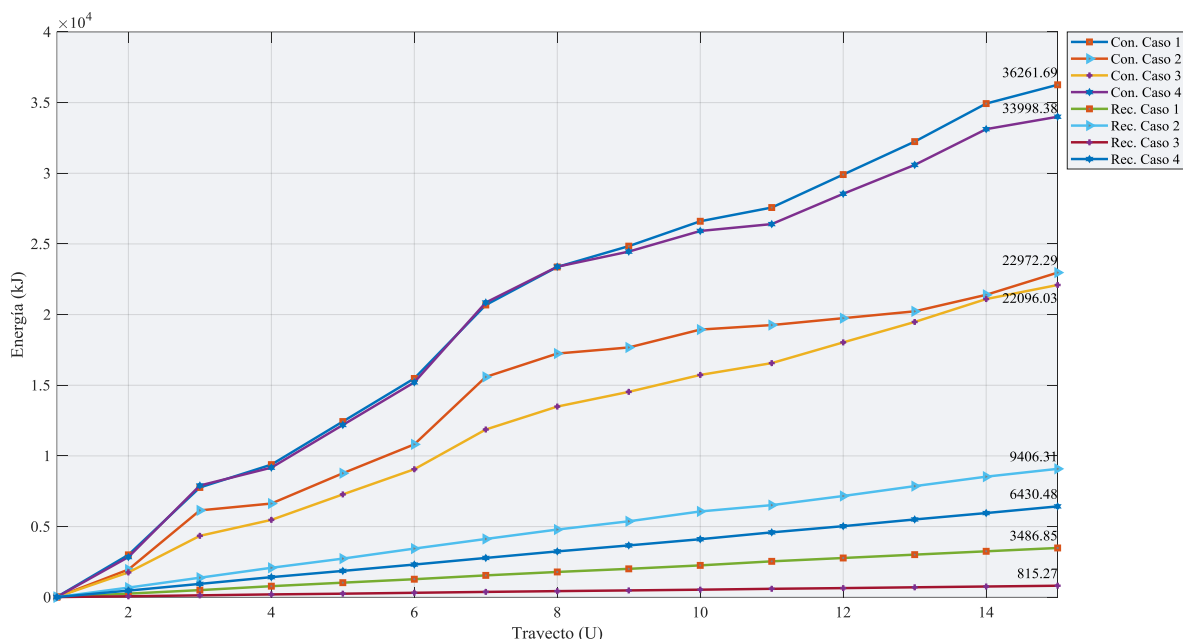


Figura 14: Energía recuperada y gastada por caso y por trayecto durante ruta

5 Conclusiones

Los sistemas de transporte masivo eléctricos tipo metro son medios que tienen un alto potencial para permitir la recuperación de la energía por medio de frenos regenerativos, siendo la magnitud de la velocidad máxima y la desaceleración planteadas para su funcionamiento las magnitudes más relevantes para obtener mayor cantidad de energía que se recupera, tal como lo demuestran los resultados obtenidos, donde pequeñas variaciones en la velocidad máxima y la desaceleración

manifiestan grandes cambios de la cantidad de la energía recuperada, con una diferencia de casi el 1000% o 10 veces más de energía recuperada con una baja desaceleración respecto a la cantidad de energía recuperada con una baja magnitud de desaceleración.

El análisis de la cantidad de energía recuperada involucra tomar en cuenta aspectos técnicos y operativos del funcionamiento típico de un metro que funciona por medio de electricidad. En este caso, se ha planteado un análisis teórico previo a la entrada en funcionamiento del sistema que se

encuentra en análisis, este es el metro de Quito, por medio de herramientas como el modelamiento matemático y la micro simulación de tráfico por software.

La cantidad de energía recuperada en varios casos bordea el 25% promedio por cada recorrido, sin embargo, también puede ser de apenas el 3% si las condiciones de operación varían, por ello es fundamental una adecuada elección de los parámetros operativos y de las variaciones que se podrían plantear si se desea realizar un aprovechamiento de la energía que se obtiene a partir del frenado regenerativo. La energía que se puede recuperar en la operación de frenado, respecto del consumo energético también varía en gran medida en función del caso, cambiando desde apenas un 3% de la energía consumida a más del 34% de la energía que se empleó durante las etapas de aceleración y mantenimiento, que es factible recuperar según los casos planteados.

La simulación realizada permite una comprensión del funcionamiento de los sistemas eléctricos de transporte tipo metro, con características propias como los periodos en los que se realiza consumos de energía para permitir la movilidad con rampas de aumento de velocidad, luego operación con mantenimiento de la velocidad y en la parte final de cada tramo periodos con rampas de reducción de la velocidad cuyo tiempo y distancia varían en función de la máxima desaceleración que puedan alcanzar las unidades, lo que modifica también la cantidad de energía que es factible recobrar obteniéndose tasas de recuperación de hasta el 10% en tramos largos y hasta el 20% en tramos cortos.

6 Trabajos futuros

El presente trabajo puede ser tomado en cuenta para realizar un análisis que considere una base de datos operativa de

los medios de transporte eléctricos tipo metro para reconocer el potencial energético de recuperación de la energía y sus ventajas.

La presente investigación puede ser tomada como base para la ejecución del dimensionamiento de otros medios de almacenaje de energía eléctrica como baterías y supercapacitores, la cual está disponible para ser usada. Estos medios pueden estar instalados en el mismo medio de transporte o en zonas aledañas, pudiendo limitarse las condiciones de operación a la cantidad de energía que las baterías o los sistemas de almacenamiento de la energía son capaces de acumular. De la misma manera, se puede analizar la cantidad de energía que se puede recuperar y ser aprovechada directamente, haciendo también consideración de la energía que se debe consumir para permitir el movimiento del metro.

7 Referencias

[1] 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.

[2] 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.

[3] T. Koseki, S. Watanabe, T. Miura, T. Mizuma, and E. Isobe, "Technical challenges to realize energy-efficient linear metros in Japan," *LDIA 2017 - 11th Int. Symp. Linear Drives Ind. Appl.*, 2017.

[4] 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.

[5] E. M. Garcia Torres, B. D. Benalcazar Lopez, and I. M. Idi Amin,

“Analysis of the Voltage Profile by the Insertion of Electric Vehicles in the Distribution Network Considering Response to Demand,” 2017 Int. Conf. Inf. Syst. Comput. Sci., pp. 7–13, 2017.

[6] 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.

[7] M. Peña-Alcaraz, A. Fernández, A. P. Cucala, A. Ramos, and R. R. Pecharrmán, “Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 226, no. 4, pp. 397–408, 2012.

[8] Y. Bai, Y. Cao, Z. Yu, T. K. Ho, C. Roberts, and B. Mao, “Cooperative Control of Metro Trains to Minimize Net Energy Consumption,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. PP, pp. 1–15, 2019.

[9] J. Liu, Z. Su, and J. Chen, “Comparison of two electric braking methods with regenerative capability of brushless DC machine and their four-quadrant operation,” *Proc. - 2018 33rd Youth Acad. Annu. Conf. Chinese Assoc. Autom. YAC 2018*, pp. 1116–1120, 2018.

[10] D. Villegas et al., “Medium scale prototype of a regenerative braking system and voltage stabilizer,” 2015 IEEE Work. Power Electron. Power Qual. Appl. PEPQA 2015 - Proc., 2015.

[11] X. Yang, X. Li, B. Ning, and T. Tang, “A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, no. 1, pp. 2–13, 2016.

[12] A. Killer, A. Armstorfer, A. E. Díez, and H. Biechl, “Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems,” 2012 IEEE Colomb. Intell. Transp. Syst. Symp. CITSS 2012 - Conf. Proc., pp. 1–6, 2012.

[13] G. Stana and V. Brazis, “Modeling of two-trolleybus motion with braking energy exchange and transmission resistance,” 2018 25th Int. Work. Electr. Drives Optim. Control Electr. Drives, IWED 2018 - Proc., vol. 2018-Janua, pp. 1–6, 2018.

[14] X. Li and X. Yang, “A stochastic timetable optimization model in subway systems,” *Int. J. Uncertainty, Fuzziness Knowledge-Based Syst.*, vol. 21, no. SUPPL.1, pp. 1–15, 2013.

[15] J. A. Castaño, A. E. Díez, and D. P. Giraldo, “Análisis del Consumo Energético de un Sistema de Transporte Público de Pasajeros con Tracción Eléctrica desde una Perspectiva Sistémica,” *Inf. tecnológica*, vol. 29, no. 1, pp. 147–160, Feb. 2018.

[16] A. E. Díez, P. Alzate, J. V. Restrepo, L. Castrillon, E. Manrique, and M. Figueroa, “DC compensation systems and their implications on the planning of expansions in Metro systems: A case study of Medellin,” *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 195, pp. 281–291, 2015.

[17] M. T. G. Ramakrishnaprabu, “Energy Saving in Metropolitan Railway Substation Using Regenerative Braking,” *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng. (An ISO)*, vol. 3297, no. 5, pp. 4403–4408, 2007.

[18] M. Brenna, F. Foidelli, 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.

[19] S. El-Fassi, E. Chattot, P. Barrade, P. Delarue, A. Bouscayrol, and A.-L. Allegre, “Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4001–4012, 2010.

[20] X. Li and X. I. N. Yang, “A stochastic timetable optimization model in

subway systems,” vol. 21, no. July, pp. 1–15, 2013.

[21] L. Zhao, K. Li, and S. Su, “A multi-objective timetable optimization model for subway systems,” *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 287 LNEE, no. VOL. 1, pp. 557–565, 2014.

[22] A. González-Gil, R. Palacin, and P. Batty, “Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 374–388, 2013.

[23] C. Li, C. He, Y. Yuan, and J. Zhang, “Control , Modeling and Simulation on A Novel Regenerative Brake System of Electric Vehicle,” 2018 IEEE 4th Int. Conf. Control Sci. Syst. Eng., pp. 90–94, 2018.

[24] M. Shafiqhy, S. Khoo, and A. Z. Kouzani, “Modelling and simulation of regeneration in AC traction propulsion system of electrified railway,” *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 5, no. 4, pp. 145–155, 2015.

[25] A. F. Acosta, J. E. Espinosa, and J. Espinosa, “TraCI4Matlab: Enabling the integration of the SUMO road traffic simulator and Matlab® through a software re-engineering process,” *Lect. Notes Control Inf. Sci.*, vol. 13, pp. 155–170, 2015.

[26] L. Galai-Dol, A. De Bernardinis, A. Nassiopoulos, A. Peny, and F. Bourquin, “On the Use of Train Braking Energy Regarding the Electrical Consumption Optimization in Railway Station,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 14, pp. 655–664, 2016.

[27] 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.

[28] V. Singh, “Efficient Utilisation of Regenerative Braking in Railway

Operations,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, pp. 1421–1428, 2017.

[29] 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.

[30] C. Spalvieri, I. Rossetta, R. Lamedica, A. Ruvio, and A. Papalini, “Train braking impact on energy recovery: the case of the 3 kV d.c. railway line Roma-Napoli via Formia,” 2019 AEIT Int. Annu. Conf., pp. 1–6, 2019.

[31] V. G. Kuznetsov, O. I. Sablin, and A. V. Chornaya, “Improvement of the regenerating energy accounting system on the direct current railways,” *Arch. Transp.*, vol. 36, no. 4, pp. 35–42, 2015.

[32] 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.

[33] 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.

[34] 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.

[35] 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.

[36] M. Saleh, O. Dutta, Y. Esa, and A. Mohamed, "Quantitative analysis of regenerative energy in electric rail traction systems," 2017 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. IAS 2017, vol. 2017-Janua, pp. 1–7, 2017.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 3. Matriz de estado del arte

RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE FRENADO REGENERATIVO EN SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO MASIVO TIPO METRO BASADO EN PROCESOS DE SIMULACIÓN																					
ITEM	DATOS	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Importancia transporte eléctrico masivo	Técnicas de aprovechamiento energía regenerada	Mejora del rendimiento energético de metro	Frenado regenerativo y recuperación de energía	Energía de regeneración	Frenos regenerativos y sistemas eléctricos	Rendimiento de dispositivos para la recuperación de energía eléctrica	Energía cinética	Perfil de velocidad	Ocupación de pasajeros	Aceleración y desaceleración	Simulación de trayecto metro	Modelamiento matemático de la energía recuperada	Comparación de casos	Rendimiento energético función de velocidad	Rendimiento energético función de aceleración	Rendimiento energético función de masa	Energía recuperada acumulada
1	2018	Energy-efficient train timetable optimization in the subway system with energy storage devices	13	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	2014	EMR-Based Simulation Tool of a Multi-Train Subway System	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	2016	Technical challenges to realize energy-efficient linear metros in Japan	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	2015	A Cooperative Train Control Model for Energy Saving	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	2017	Analysis of the Voltage Profile by the Insertion of Electric Vehicles in the Distribution Network Considering Response to Demand	16	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	2019	Modeling and Simulation of DC Electric Rail Transit Systems With Wayside Energy Storage	9	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	2012	Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy	125	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	2019	Cooperative Control of Metro Trains to Minimize Net Energy Consumption	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Importancia transporte eléctrico masivo	Técnicas de aprovechamiento energía regenerada	Mejora del rendimiento energético de metro	Frenado regenerativo y recuperación de energía	Energía de regeneración	Frenos regenerativos y sistemas eléctricos	Rendimiento de dispositivos para la recuperación de energía eléctrica	Energía cinética	Perfil de velocidad	Ocupación de pasajeros	Aceleración y desaceleración	Simulación de trayecto metro	Modelamiento matemático de la energía recuperada	Comparación de casos	Rendimiento energético función de velocidad	Rendimiento energético función de aceleración	Rendimiento energético función de masa	Energía recuperada acumulada	
9	2018	Comparison of two electric braking methods with regenerative capability of brushless DC machine and their four-quadrant operation	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	2015	Medium scale prototype of a regenerative braking system and voltage stabilizer	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	2016	A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit	152	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	2012	Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems	18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	2018	Modeling of two-trolleybus motion with braking energy exchange and transmission resistance	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	2015	Comparative study of existing methods for improving the energy efficiency of the system traction of subway	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	2018	Análisis del Consumo Energético de un Sistema de Transporte Público de Pasajeros con Tracción Eléctrica desde una Perspectiva Sistémica	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	2015	DC compensation systems and their implications on the planning of expansions in Metro systems: A case study of Medellín	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	2007	Energy Saving in Metropolitan Railway Substation Using Regenerative Braking	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	2007	Ultracapacitors application for energy saving in subway transportation systems	37	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	2010	Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway	167	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
20	2013	A stochastic timetable optimization model in subway systems	28	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	2014	A Multi-objective Timetable Optimization Model for Subway Systems	12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	2013	Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy	225	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Importancia transporte eléctrico masivo	Técnicas de aprovechamiento energía regenerada	Mejora del rendimiento energético de metro	Frenado regenerativo y recuperación de energía	Energía de regeneración	Frenos regenerativos y sistemas eléctricos	Rendimiento de dispositivos para la recuperación de energía eléctrica	Energía cinética	Perfil de velocidad	Ocupación de pasajeros	Aceleración y desaceleración	Simulación de trayecto metro	Modelamiento matemático de la energía recuperada	Comparación de casos	Rendimiento energético función de velocidad	Rendimiento energético función de aceleración	Rendimiento energético función de masa	Energía recuperada acumulada
23	2018	Control , Modeling and Simulation on A Novel Regenerative Brake System of Electric Vehicle	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
24	2015	Modelling and simulation of regeneration in AC traction propulsion system of electrified railway	6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25	2015	TraCI4Matlab: Enabling the integration of the SUMO road traffic simulator and Matlab® through a software re-engineering process	25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	2016	On the Use of Train Braking Energy Regarding the Electrical Consumption Optimization in Railway Station	6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
27	2019	Optimal design of automatic train operation information with the consideration of regenerative braking	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
28	2017	Efficient Utilisation of Regenerative Braking in Railway Operations	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
29	2015	An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems	84	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
30	2019	Train braking impact on energy recovery: the case of the 3 kV d.c. railway line Roma-Napoli via Formia	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
31	2015	Improvement of the regenerating energy accounting system on the direct current railways	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
32	2016	Study on regenerative braking system, considerations of design, safety and associated effects	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
33	2017	Finding optimal deceleration with serial regenerative braking of electric vehicle using a multi-objective genetic algorithm	5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
34	2019	Analysis of the Effectiveness of Regenerative Braking on Subway Trains	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Importancia transporte eléctrico masivo	Técnicas de aprovechamiento energía regenerada	Mejora del rendimiento energético de metro	Frenado regenerativo y recuperación de energía	Energía de regeneración	Frenos regenerativos y sistemas eléctricos	Rendimiento de dispositivos para la recuperación de energía eléctrica	Energía cinética	Perfil de velocidad	Ocupación de pasajeros	Aceleración y desaceleración	Simulación de trayecto metro	Modelamiento matemático de la energía recuperada	Comparación de casos	Rendimiento energético función de velocidad	Rendimiento energético función de aceleración	Rendimiento energético función de masa	Energía recuperada acumulada
35	2017	Determination of Potential Regenerative Braking Energy in Railway Systems: A Case Study for Istanbul M1A Light Metro Line	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
36	2017	Quantitative analysis of regenerative energy in electric rail traction systems	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				12	16	15	21	12	15	11	16	11	13	13	12	15	14	18	15	19	19

7.2 Resumen de Indicadores

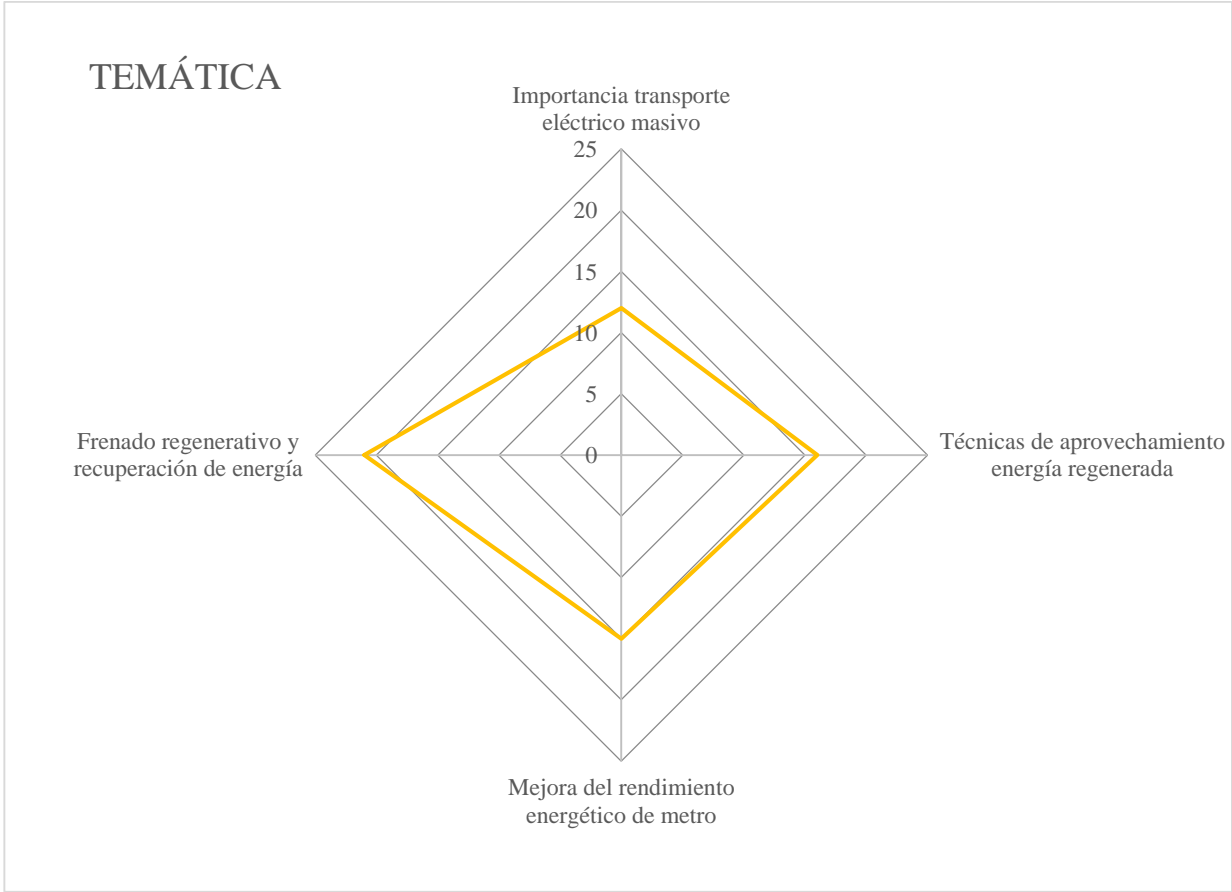


Figura 15. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

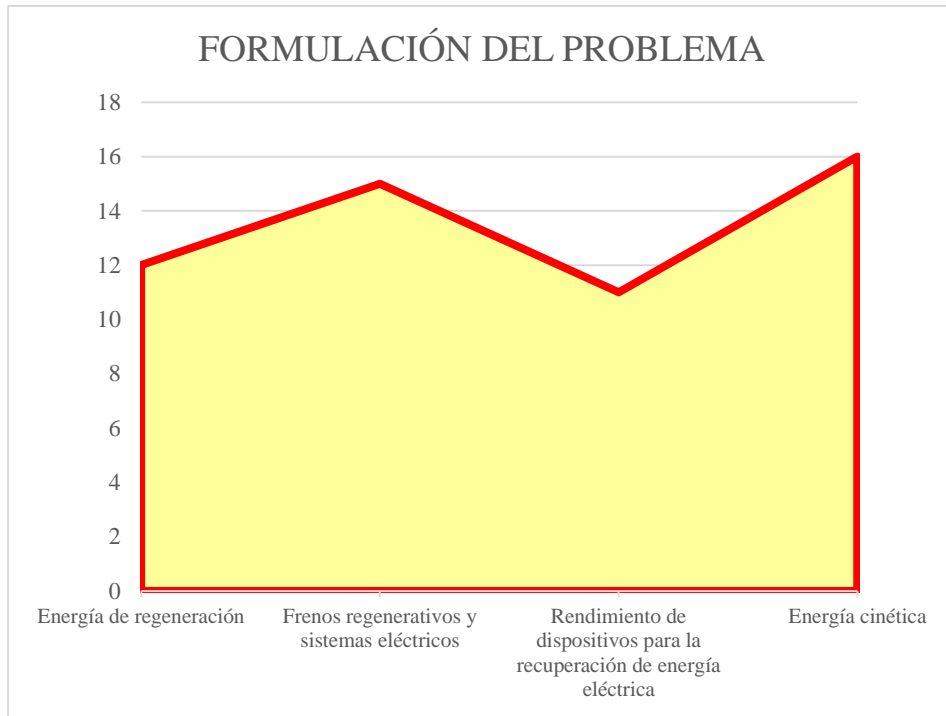


Figura 16. Indicador de formulación del problema - Estado del arte

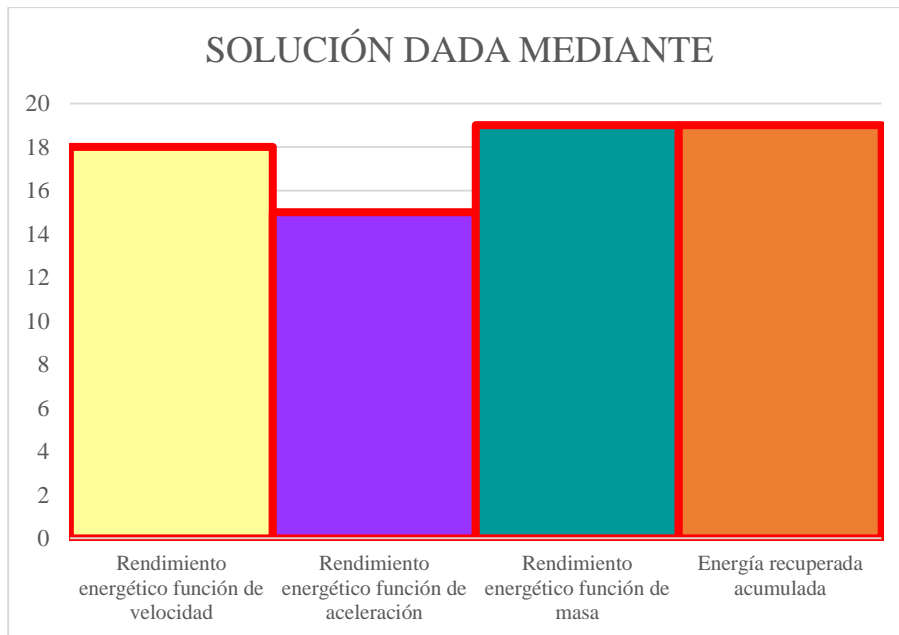


Figura 17. Indicador de solución - Estado del arte

8 Anexos

Distrito Metropolitano de Quito

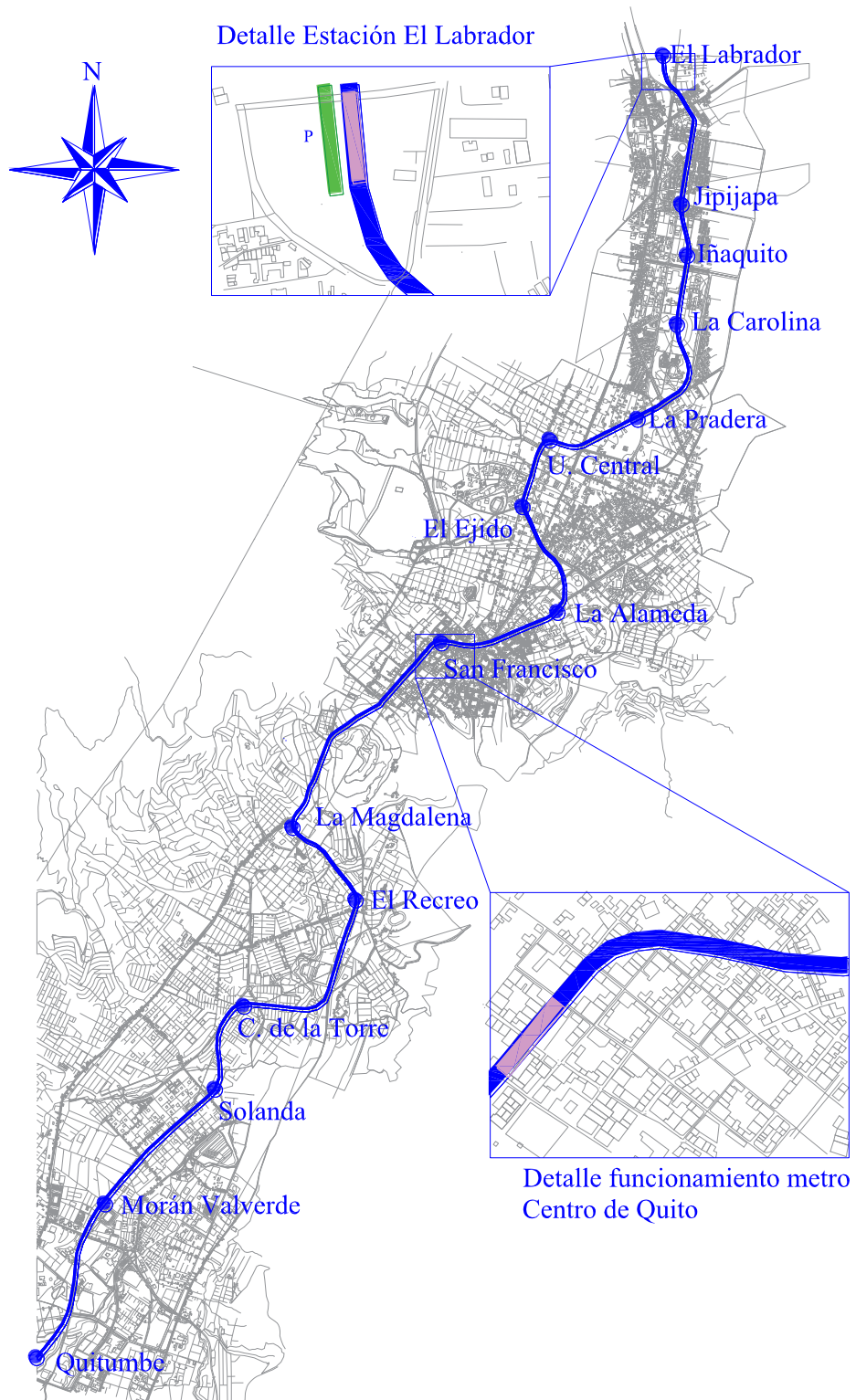


Figura 18: Detalle de trazado Línea 1 metro de Quito