

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/354785481>

2021 Desarrollo e innovacion en ingenieria Vol. I. Tecnologías y enfoques para el aprovechamiento de la energía regenerativa en el transporte ferroviario: Una revisión sistemática

Chapter · September 2021

CITATIONS

0

READS

189

4 authors:



Jesús Harmodio Araúz Sarmiento
Universidad Tecnológica de Panamá

4 PUBLICATIONS 8 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Felix Henriquez
Universidad Tecnológica de Panamá

3 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Juan de Dios Sanz Bobi
Universidad Politécnica de Madrid

45 PUBLICATIONS 73 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Aranzazu Berbey-Alvarez
Universidad Tecnológica de Panamá

136 PUBLICATIONS 138 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Enhancing QUALity Management and Recognition in Latin American universities to underpin the Latin American Higher Education Space (EQUAM-LA) [View project](#)



Proyecto: Metro de Panamá: Estimación y aprovechamiento alternativo de la energía de frenado regenerativo (Cod. # GPAF4086921); [View project](#)

Tecnologías y enfoques para el aprovechamiento de la energía regenerativa en el transporte ferroviario: Una revisión sistemática

Jesús Arauz Sarmiento¹

Félix Henríquez²

Juan de Dios Sanz Bobi³

Aránzazu Berbey-Álvarez⁴

Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá

En este capítulo se presenta una revisión sistemática sobre las tecnologías de sistemas de almacenamiento de energía y sobre los enfoques para un mejor aprovechamiento. La revisión se divide en dos vías: tendencias más desarrolladas (horarios de operación de los trenes, almacenamiento de energía y subestaciones reversibles) y los enfoques de investigación sobre el aprovechamiento del frenado regenerativo en los sistemas de transporte ferroviario (sistemas híbridos, algoritmos de optimización y técnicas de control, e integración de la generación distribuida).

¹ Contacto: Jesus.arauz@utp.ac.pa

² Contacto: Felix.henriquez@utp.ac.pa

³ Contacto: Juandedios.sanz@upm.es

⁴ Contacto: Aranzazu.berbey@utp.ac.pa

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años ha sido del interés de innumerables grupos de investigación alrededor del mundo el estudio de la tecnología del ferrocarril debido a su gran participación en el consumo energético, generación de dióxido de carbono y contribución al desplazamiento humano dentro y fuera de las ciudades [1]. Consecuente a dicho interés, se ha profundizado el estudio enfocado en la eficiencia de los sistemas de transporte ferroviarios, desde el material rodante, considerando las características eléctricas y mecánicas, hasta el sistema de electrificación y todo lo subyacente a éste [2].

Por lo tanto, la eficiencia energética en el ferrocarril es un campo bastante estudiado y con una gran cantidad de estudios compilatorios en donde se procura mostrar todos los avances a lo largo del tiempo, distinguiendo las tecnologías y enfoques esenciales para su realización y los resultados de la implementación de nuevos sistemas en sistemas ferroviarios existentes a lo largo del mundo.

Sin embargo, no todas las investigaciones ni las revisiones bibliográficas han procurado destacar la situación energética ferroviaria con el mismo alcance. Muchas han dedicado sus esfuerzos por determinar en un espectro general, aspectos como:

- La naturaleza del suministro eléctrico del ferrocarril [3].
- La interoperabilidad a través del Internet de las Cosas (IoT) y Redes Inteligentes (Smart Grid) [4-6].
- El avance de la electrónica de potencia y su rol decisivo en el mejoramiento de la operación y optimización de sistemas [7, 8].
- El estudio del frenado regenerativo para su óptimo aprovechamiento, a través de tecnologías de almacenamiento o sistemas reversibles, con miras a la reducción de consumo energético y aumento de la estabilidad y calidad del sistema de electrificación ferroviario en corriente continua o alterna [9-15].

En [3] se destaca la importancia del desarrollo de los sistemas de suministro de potencia en los sistemas ferroviarios, relacionando directamente la necesidad en el aumento de la capacidad de éste ante la evolución de la demanda sin imposibilitar la rentabilidad económica. Estos autores clasifican los sistemas de alimentación en dos grandes grupos (estaciones transformadoras y convertidoras) y comparan las características técnicas y las exigencias económicas.

En [5] los autores analizan las últimas investigaciones referentes a mantenimiento predictivo, estructuras inteligentes, monitoreo y evaluación de parámetros avanzados, sistemas de video de vigilancia, operaciones de transporte de carga y pasajeros, sistemas de control, ciber seguridad, eficiencia energética, sistemas de señalización, etc. El objetivo general del artículo es proveer un estado del arte detallado de las nuevas tecnologías y servicios de la industria del ferrocarril.

En [15] se simula la línea 8 del Metro de Madrid con fin de simular el comportamiento energético respecto a la circulación y a la demanda de pasajeros, en función a estimar la cantidad de energía regenerada aprovechada en el frenado y seleccionar supercapacitores capaces de almacenar esta energía y usarla en los sistemas auxiliares de las estaciones. Este estudio se hace simulando la dinámica de los trenes y estableciendo como referencia el consumo actual de las estaciones del Metro de Madrid.

Además, se realiza una revisión profunda del concepto de Redes Inteligentes y Micro Redes Inteligentes aplicadas al entorno ferroviario, en el cual se destacan proyectos como Sócrates [16], Sistema Inverfer [17], Merlin [18], E-Lobster [19], Ferrosmartgrid, Osiris [20] y Ferrolinera [21]. El proyecto Sócrates tiene como objetivo desarrollar un prototipo que supervise la calidad de la energía intercambiada entre la red de transmisión y la catenaria de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona. El Sistema Inverfer consiste en un inversor conectado en paralelo a una subestación rectificadora de tracción de la línea entre Málaga Fuengirola. El Proyecto Merlin fue una iniciativa interinstitucional cuyos partícipes fueron Alstom, Siemens, CAF, etc. que tenía como objetivo reducir el consumo energético en un 10% anual, mediante el desarrollo de un sistema de gestión que permitiese la optimización del ferrocarril europeo. El proyecto E-Lobster pretende diseñar un sistema avanzado de interconexión ferrocarril-red, que reduzca las pérdidas en ambas

infraestructuras reflejándose en un ahorro del 20% del consumo energético. Ferrosmartgrid consistió en la elaboración de redes inteligentes para la gestión de la energía eléctrica del sector ferroviario. El proyecto Osiris es un esfuerzo conjunto por 17 socios (universidades, fabricantes, operadores, etc.) que ha proporcionado herramientas de cálculo eléctrico y térmico, un sistema de ciclo de trabajo modular e innovaciones técnicas y operativas, como un convertidor auxiliar para trenes de metro (Alstom), un sistema de almacenamiento abordo basado en baterías de ion-litio CAF y un sistema de enfriamiento que utiliza el agua subterránea (Ansaldo STS). La Ferrolinera de Adif aprovecha el frenado regenerativo de los trenes para servir de suministro a vehículos eléctricos a través de estaciones de carga diseñadas con supercapacitores.

Relacionado a la simulación del último autor citado hay muchas investigaciones realizadas, como se mostró con anterioridad. Esto es debido al gran potencial de la recuperación de la energía del frenado regenerativo, que de acuerdo con distintos autores puede variar del 30% al 40% dependiendo de las tecnologías aplicadas y de la calidad del diseño del material rodante [22, 23].

Consecuente a dicha realidad, el objetivo de esta recopilación es ilustrar algunos de los enfoques más recientes relacionados al aprovechamiento del frenado regenerativo, partiendo de las bases establecidas y ya comentadas en otras publicaciones y así aportar una guía a apropiada para incursionar en nuevas tendencias y áreas de investigación dentro de la tecnología del ferrocarril, que demanda la aplicación de competencias transversales como Machine Learning, técnicas de control, técnicas de inteligencia artificial (lógica difusa, redes neuronales, algoritmos genéticos), generación distribuida, modelado y optimización de sistemas híbridos de almacenamiento.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Tendencias más desarrolladas

En esta sección se resalta el resultado de otras investigaciones, señalando el enfoque investigativo seleccionado, esquematización del procedimiento, conclusiones y líneas de futuras de trabajo. Como no es parte de los objetivos realizar una recopilación de tecnologías de frenado regenerativo, solamente se mencionará lo necesario de dichos trabajos para contextualizar y crear un punto de inicio suficiente para profundizar en los enfoques investigativos contemporáneos.

2.1.1 Horario de operación

Uno de los enfoques de aprovechamiento del frenado regenerativo está en la coordinación de los tiempos de operación de los trenes basados en el principio intrínseco del frenado regenerativo, en donde si una máquina eléctrica de tracción opera en sentido contrario al movimiento actual, se comporta como un generador; por lo tanto inyecta energía al sistema de electrificación y otros trenes en aceleración pudieran usar dicha energía en vez que requerir energía de una red exterior [14]. De acuerdo con el método implementado, se puede obtener ahorros energéticos del 4% [24] al 38.6%[25].

Usualmente, se presentan dos objetivos a optimizar: reducción de la potencia demandada pico y maximización del aprovechamiento del frenado. Dichos objetivos pueden alcanzarse desplazando la aceleración a momento sin pico de demanda, acelerando trenes sin simultaneidad, variando el tiempo de espera en las estaciones, etc. En [14] se presenta una recopilación de diversos métodos de optimización orientados al tiempo en las estaciones: algoritmo genético [26], modelo dinámico de programación [27], modelos heurísticos [28], optimización del consumo en subestaciones [25] y mucho más.

2.1.2 Almacenamiento de energía

Cuando no es posible sincronizar la operación de los trenes, sea por poca cantidad de trenes circulantes o una demanda de movilización de pasajeros muy basta, es aceptable considerar almacenar la energía para luego gestionarla en beneficio de la calidad del sistema. La implementación de estos sistemas de almacenamiento puede estar dirigidos a ahorrar energía [29, 30], operación sin catenaria [31], minimizar fluctuaciones de tensión [32, 33] y reducción de picos de consumo [10, 34].

Los dispositivos más ampliamente usados para sistemas de almacenamiento son las baterías, los supercapacitores y los volantes de inercia. De acuerdo con [2, 11, 12, 35], para control de tensión son más apropiados los supercapacitores y volantes de inercia por su rápida respuesta y su alta densidad de potencia, pero para recuperación de energía y sistemas de energía son más apropiadas las baterías debido a la alta densidad de energía y a la poca corriente de auto-descarga que poseen.

La misma tendencia de selección de dichos equipos de acuerdo con sus capacidades técnicas establece la tendencia en otras soluciones tecnológicas como los vehículos eléctricos híbridos y autónomos. Éstos constan de sistema de alimentación formado por baterías y supercapacitores, en donde las primeras desarrollan el rol principal de suministrar la energía demandada por el motor para realizar el trabajo en cuestión, mientras que los últimos manejan las altas exigencias de potencia que puedan ocurrir. En [36] se comenta sobre este modo de operación previamente comentado, en donde es importante conseguir un intercambio óptimo de potencia, por el cual se implementan convertidores DC-DC para lograr el acople controlado al bus de continua. El uso de supercondensador en las potencias pico aumenta la vida útil de la batería y reduce el costo total de la instalación.

En [37-39] se caracterizan los dispositivos previamente mencionados junto a variantes de éstos de acuerdo con la densidad de potencia y energía, eficiencia de ciclo, auto-descarga diaria, ciclos de vida y tiempo promedio de almacenamiento. En [11] se presenta los datos técnicos de dichas características, en donde se puede señalar la superioridad de las baterías en cuanto densidad energética al oscilar en valores entre 30 Wh/Kg y 250 Wh/Kg dependiendo si son Ni-Cd, Ni-MH, NaS, Li-ion y Lead-Acid. Asimismo, se aprecia que la densidad de potencia de los volantes de inercia y de los supercapacitores puede ser hasta 100 veces superior.

Atendiendo a la ubicación de dichos dispositivos, pueden clasificarse en soluciones a bordo o soluciones estacionarias. Las primeras suelen colocarse en techo o el suelo de los trenes, con más frecuencia en techo debido a que no hay un espacio en el suelo del tren establecido para estos, por lo que es necesario una adaptación [14]. La eficiencia de estos sistemas depende fuertemente de las características del vehículo en el cual está instalados. Según [40] los sistemas a bordo pueden poseer prestaciones superiores a otros sistemas próximamente mencionado respecto al costo de infraestructura, mantenimiento y a la independencia de la operación de la catenaria. En cuanto disponibilidad, seguridad, recuperación de la energía y eficiencia de la transmisión de esta posee aptitudes iguales a los demás sistemas.

Las soluciones a bordo han sido ampliamente estudiadas e implementadas a lo largo del mundo [2]. En los ferrocarriles de Bruselas y Madrid se han obtenido ahorros de energía desde 18.6% hasta 35.8% [41, 42]. En [14] se resume una serie de investigaciones distintas en donde se han implementado baterías (Ni-MH, Li-ion), supercapacitores y volantes de inercia por distintos propósitos [43].

La tecnología de supercapacitores a bordo de la empresa Bombardier, MITRAC Energy Saver, que ha sido instalado en el tren ligero de Mannheim en Alemania representando ahorros energéticos del 30% [44] además de reducir los picos de demanda en un 50%, proporcionando una reducción en los huecos de tensión del sistema; el sistema ACR de CAF basado en supercapacitores instalados en el tranvía de Sevilla [45].

Por parte de la empresa Alstom hay supercapacitores a bordo STEEM instalados en el tranvía de París [45] en donde se consiguió reducción del consumo energético del 10% al 18% y operación sin catenaria en tramos entre estaciones de 300 m [46], baterías a bordo de Ni-MH Salft en el tranvía de Niza [45] y volantes de inercia en el techo del tranvía de Rotterdam [47, 48] para lograr la nivelación de la carga y la operación sin catenaria; y la empresa Siemens tiene sistemas basados en supercapacitores como Sitras MES, que ha sido instalado en el tranvía de Innsbruck (Austria) [45], y sistemas híbridos de supercapacitores con baterías Ni-MH como el Sitras HES instalado en el tren ligero de Lisboa [49].

Por otro lado, están las soluciones estacionarias. El concepto general es que una instalación a un lado de la vía absorba la energía del frenado y la regrese a la catenaria cuando sea requerida, mediante el control de una unidad de potencia. Usualmente son utilizadas para estabilización del voltaje en catenaria, ahorrar energía y reducir picos de potencia demandada. De acuerdo con la tecnología implementada y al fabricante,

se han registrado ahorros de consumo energético del 20% al 30% [14]. Entre las aplicaciones previamente mencionadas, se puede destacar que, pese a la diferencia de las prestaciones entre baterías, volantes de inercia y supercapacitores, todos pueden usarse para lograr los mismos objetivos con más o menos ahorros.

El producto Sitras SES de Siemens, que consiste en supercapacitores, ha sido instalado en los Metros de Madrid, Cologne, Toronto y Beijing con la principal intención de ahorrar energía y estabilizar el voltaje [50]; los supercapacitores Capapost de Meiden, instalados en Hong Kong [51]; la solución de supercapacitores del proveedor Envitech Energy (parte del grupo ABB) Envistore, instalada el metro de Varsovia Philadelphia [51]; en distintas localidades de Japón se instalaron B-CHOP de Hitachi que son baterías de Li-ion, éstas se controlaban directamente por la red y operadas remotamente para regular el voltaje [52]; y en Londres, Nueva York, Los Ángeles y Lyon se han instalado volantes de inercia de Vycon, Kinetic Traction Systems, GTR system y Regen system [14, 51, 53].

2.1.3 Subestaciones reversibles

Finalmente, existen las subestaciones reversibles. Este concepto puede ser comparado a las soluciones estacionarias puesto que se ubican de manera similar y están dispuestos para permitir el flujo de potencia de la catenaria hacia afuera de esta, cuando normalmente no es así. La topología habitual de estos sistemas consisten en poner en paralelo a la etapa de rectificación con diodos que alimenta a la catenaria un inversor o un convertidor DC-DC y un inversor, depende de la instalación [37]. En el mercado existe varios modelos:

- Subestaciones reversibles con un solo convertidor rectificador/inversor HESOP avanzado de Alstom [54].
- Subestaciones reversibles con rectificadores basados en tiristores e inversores en PWM (Harmonic and Energy Saving Optimizer, *HESOP* por Alstom) [55].
- Subestaciones reversibles con rectificadores reversibles basados en tiristores controlados (Enviline TCR por ABB) [56].
- Inversores basados en IGBT conectados en antiparalelo con la subestación rectificadora de diodos (Enviline Energy Recuperation System, ERS de ABB) [2].
- Subestaciones reversibles con rectificadores de diodos e inversores PWM (Sitras por Siemens e INGEER por INGETEAM Traction Company) [56].
- Subestaciones reversibles con rectificadores de diodos e inversores basados en tiristores controlados (Sitras TCI por Siemens) [57].

Ajeno al tipo de configuración implementada, estos sistemas [2, 54-57] tienen la función de permitir el intercambio natural de la energía del frenado entre trenes como prioridad, minimizando el nivel de armónicos para asegurar una buena calidad de suministro de energía en el lado AC y DC [58, 59].

2.1 Enfoques investigativos contemporáneos

Como se presentó en la sección anterior, los avances tecnológicos referentes al aprovechamiento del frenado regenerativo llevan al menos una década alrededor del mundo. Por lo tanto, la investigación del impacto de éstos en los sistemas está bastante desarrollada y ya hay cientos de casos reales de aplicación en sistemas ferroviarios. Sin embargo, es notable que la factibilidad de los dispositivos ha sido evaluada en la mayoría de los casos sin considerar la interoperabilidad entre éstos y sin aplicar técnicas modernas de control ni algoritmos de aprendizaje. Debido a esto, los próximos estudios intentan demostrar algunas de las nuevas tendencias y los nuevos enfoques de estudio sobre el aprovechamiento del frenado regenerativo que exige al investigador poseer más competencias de distintas áreas del conocimiento.

1.2.1 Sistemas de almacenamiento híbrido, algoritmos de optimización y control

En [34] se plantea optimizar el frenado regenerativo de un camión volquete que, debido a su naturaleza de aplicación, tiene transitorios extremadamente bruscos e inesperados. Los autores consideraron otras

investigaciones aplicadas a líneas ferroviarias, en las cuales se sugería la alteración de las conexiones de un conjunto de supercapacitores, serie y paralelo, para lograr el control óptimo en amplios rangos de voltajes [60]; otro estudio en donde un diseño modular híbrido de motor de combustión con motor eléctrico se alternaban de acuerdo con lo requerido, multifuncionalmente, para reforzar torque [61] y un sistema híbrido batería con supercapacitor en donde éstos se alternan en los procesos de absorción y liberación de energía [62], pero ninguno se acopló a los requerimientos de cambios repentinos de energía.

Por lo tanto, se propuso una combinación en dos etapas de supercapacitor y batería a través de un convertidor DC/DC bidireccional en el cual el supercapacitor opera cuando se frena súbita y tendidamente, así como cuando se acelera para absorber rápidamente la energía, extendiendo el tiempo de vida útil y reduciendo los tiempos de carga/descarga, mientras la batería entra en operación estable para reducir el pequeño rizado de la corriente mientras se carga.

En la Figura 1 se demuestra cómo mediante cuatro IGBT y tres contactores se logra proporcionar etapas absorción y liberación de energía, en el cual el convertidor actúa como BOOST cuando se libera la energía al supercapacitor o de éste al sistema, pero opera como BUCK cuando la batería está absorbiendo el rizado de la corriente demandada por el bus DC en estado estable.

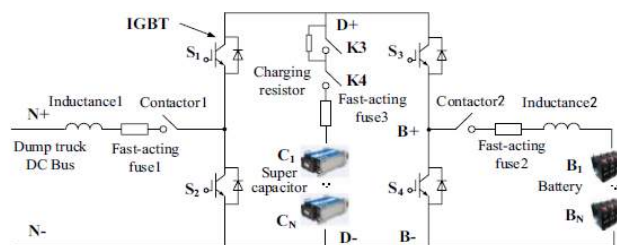


Figura 1. Topología del sistema híbrido [34]

Esta topología propuesta fue experimentada mediante modelos dinámicos en un laboratorio, usando todos los dispositivos mostrados en el esquema junto a osciloscopios, fuentes de poder, y en un vehículo real de aproximadamente 5 toneladas en las minas de carbón de Anjialing. La prueba en campo proporcionó una eficiencia máxima de la recuperación del frenado del 59.46% con un promedio de 53.5%, y una reducción del consumo de combustible máximo de 14.17% con un promedio de 10.29%.

En [35] se propone un análisis de las pérdidas energéticas en un sistema híbrido a través de un análisis de sensibilidad de primer orden de Sobol, en el cual los índices de éste representan la influencia del sistema. El análisis de sensibilidad requiere puntos obtenidos del algoritmo quasi-Monte Carlo para evaluar los índices; es ampliamente usado para determinar la influencia de parámetros sobre una función no-lineal dada [63].

Esta investigación pretende aportar en el estudio del impacto de la carga en los sistemas de almacenamiento, debido a que la mayoría se centra en el impacto de éstos al sistema o basan el comportamiento de éstos en las características del vehículo.

En [64] se comenta la utilidad de un sistema de control optimizado para un sistema híbrido compuesto por baterías y supercapacitores, en donde la eficiencia se evalúa basada en la resistencia equivalente y en la corriente pulsante de la carga; [65] también estudia las pérdidas en vehículos eléctricos a través del enfoque a la resistencia equivalente y la corriente pulsante de la carga, pero minimiza las pérdidas implementando la relación de las resistencias internas de la batería y del supercapacitor; [66] sugiere un control en tiempo real de un sistema híbrido de almacenamiento optimizando las fluctuaciones de corriente y estimando el estado de carga de la batería y del supercapacitor en un vehículo eléctrico en el cual se considera su dinámica para implementar los ciclos de carga-descarga, variaciones de temperatura y comportamiento general de los almacenadores en el modelo.

La Figura 2 muestra el modelo implementado al cual se le realiza el análisis de pérdidas. Éste consiste en una carga (tren) que es alimentado, en paralelo, por la subestación de tracción, un conjunto de baterías y

un conjunto de capacitores. Estos últimos están conectados mediante convertidores DC-DC que consisten en inductores serie, IGBTs y diodos en antiparalelo. El estudio solamente considera el flujo de energía hacia los almacenadores, por lo que el convertidor solamente opera en modo BUCK. La agrupación de baterías se modela como una fuente de tensión controlada por el estado de carga de ésta en serie con una resistencia también dependiente del estado de carga; la agrupación de supercapacitores se describe como una fuente de tensión en serie con una resistencia, en donde la primera representa su voltaje a circuito abierto y la segunda la resistencia interna.

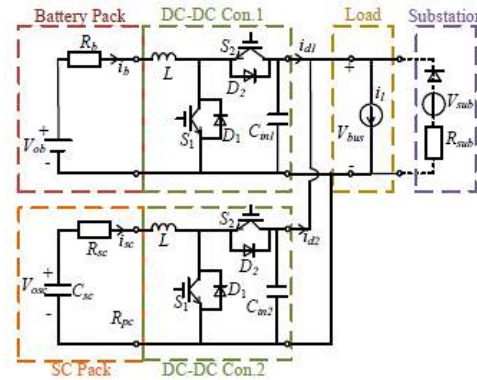


Figura 1. Topología del sistema híbrido de almacenamiento estudiado [35]

El análisis de sensibilidad se desarrolla considerando que la potencia de la carga, representada en el diagrama anterior, depende total de la potencia regenerada que será absorbida por los almacenadores. Dicha potencia está en función de la curva operativa del tren y, en el caso de las respectivas potencias de la batería y del supercapacitor, de la tensión el bus DC que se aproximará a valores constantes. Además, se establece que la potencia de carga del sistema híbrido es casi constante, junto a otros límites operativos considerados como el rango de sensibilidad de las variables (potencias, estado de carga y tensión).

La Figura 3 ilustra los resultados del análisis de sensibilidad de primer orden de Sobol, en donde se aprecia que las pérdidas del sistema de almacenamiento dependen mayormente de la potencia de la carga, así como el supercapacitor. Sin embargo, las pérdidas en la batería dependen de su potencia y estado de carga inicial. En todos los casos se puede desprestigiar la influencia de la tensión en el bus DC, por lo que es apropiado estudiar nuevamente el sistema considerando la tensión constante. Como resultado de la última optimización, se obtiene que las pérdidas en la batería son más dependientes del estado de carga a potencias nominales menores, comportamiento que también posee el convertidor DC-DC menos acusado.

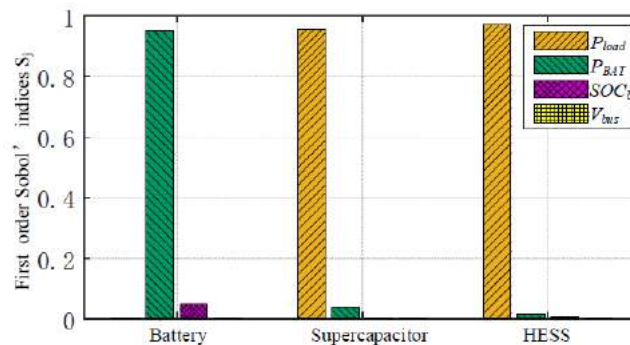


Figura 2. Resultados del análisis de sensibilidad [35]

En [67] se presenta un control novedoso para los sistemas de almacenamiento híbrido en busca de aprovechar las ventajas de cada una de las tecnologías sin que se interpongan unas en el desempeño de las otras. Se comenta sobre el modo de controlar un supercapacitor y una batería para minimizar el flujo de energía hacia la red durante el frenado de un tren debido a que en el control jerárquico la rápida velocidad del supercapacitor limitaría la participación de la batería, lo que implica que el supercapacitor es el que aporta más energía y participa en los ciclos de carga/descarga, siendo este más costoso y volviendo la solución insostenible económicamente.

Se pretende establecer un control cooperativo en donde las respuestas de baja frecuencia son atendidas por la batería y las de alta por el supercapacitor. La batería recibe la consigna de potencia por parte de la red, establece una rampa de respuesta de acuerdo con su potencia, la referencia de potencia del supercapacitor se calcula considerando la consigna de potencia de la batería y la rampa de respuesta, y, en situaciones de operación estable, la batería controla el estado de carga del supercapacitor.

De acuerdo con la variación de la potencia de la batería, se calculan las consignas de potencia y de estado de carga del supercapacitor, aplicando en todo momento la variación de potencia de la red y actualizando el resultado en el algoritmo hasta que la referencia de potencia por aportar del sistema híbrido sea nula. En la Figura 4 se muestran los flujos de potencia resultante, en donde la batería participa mayormente en el intercambio de energía para suplir la demanda y el supercapacitor interviene cuando la variación de potencia es muy brusca. La curva azul ilustra el prácticamente nulo intercambio de potencia por parte de la red, que presenta un leve rizado.

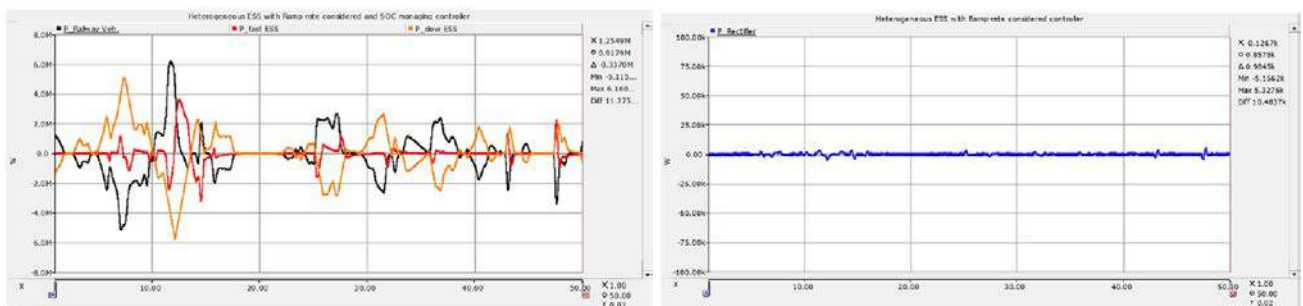


Figura 3. Flujos de potencia del tren, de la batería y del supercapacitor, y potencia a través de la red ante la intervención del control cooperativo [67]

1.2.2 Enfocados en técnicas de optimización

En [68] se estudia la operación de un sistema de almacenamiento estacionario de supercapacitores basado en redes neuronales. Los autores proponen este dispositivo por su buena relación calidad-precio y por el gran desempeño que se ha visto en distintas instalaciones, como en el Metro de Varsovia en donde se logra ahorrar más de 2 MWh en una semana [69] y en el Metro de Washington se logra duplicar el ahorro energético al colocar los supercapacitores entre dos estaciones [70].

Se propone la solución a un algoritmo de redes neuronales que determine el estado de carga (SOC) mínimo del sistema de almacenamiento para su óptima operación. En la actualidad, pocos estudios consideran el voltaje mínimo de operación de los paquetes de supercondensadores y optan por establecer valores constantes que rondan en 25% y 50% [71]. Para determinar el SOC mínimo primero se determinan las pérdidas del supercapacitor [72] y por separado las del convertidor DC-DC; dicho cálculo de pérdidas permite estimar la corriente del supercapacitor en función de la eficiencia del convertidor y obtener una relación que describa la variación de la tensión en las terminales del supercapacitor. Asimismo, para determinar la dirección del flujo de potencia, se utiliza algoritmos del grupo *rule-based determined strategies*. Luego de tener todo relacionado, se aprecia en los resultados la gran influencia del SOC en las pérdidas, en lo cual se nota doble pérdidas para un SOC del 40% respecto a uno de 60%.

Luego se procedió a realizar simulaciones similares a SOC constante, pero variando el SOC de 20% a 70% para relacionar la potencia de salida y, de entrada, en donde aquel SOC que posibilita la máxima potencia de salida es considerado el máximo. Para efectos de comparación, se realizó otra simulación en donde el SOC cambiaba cada 20 min durante 24 h.

Dicho resultado se presenta del artículo, aquí se presenta que los valores mínimos para la óptima operación rondan entre 30% y 90% (Figura 5) dependiendo de la carga instantánea. Con estos resultados, se entrenó una red neuronal con 1200 entradas, una capa escondida y 61 salidas activadas con la función de Sigmoid. Dicha red se entrenó con otros perfiles de carga supuestos y se logró a un porcentaje de precisión del 23%. Los resultados señalan que operar manteniendo el óptimo SOC proporcionaría un incremento del 10% en el aprovechamiento del frenado.

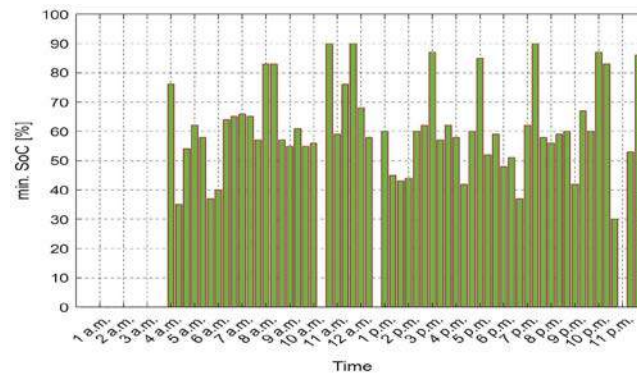


Figura 4. SOC mínimos a los distintos tiempos de operación [68]

En [23] se desarrolla un entorno de optimización de dos etapas para determinar las combinaciones óptimas entre distintas tecnologías de almacenamiento (baterías, supercapacitores y volantes de inercia) considerando parámetros como ahorro de energía, regulación de voltaje, reducción de pico de demanda, período de retorno de la inversión y la resiliencia del sistema.

La primera etapa consiste en el modelo matemático de cada uno de los dispositivos operando solo o en combinación con los demás. Se consiguen las expresiones que representa el SOC, la energía total, el tiempo de descarga mediante la ecuación de Peukert [73] y el voltaje respectivo. Cada una de las naturalezas de los dispositivos es descrita detalladamente. Seguido, se consideran las restricciones lineales y no lineales de las ecuaciones desarrolladas para guiar el proceso de optimización no lineal (algoritmo genético).

La segunda etapa consiste en el modelo de simulación que utiliza los resultados de la etapa de optimización. Esta etapa modela la subestación como dos etapas en paralelo de un transformador y un rectificador basado en diodos; un transformador posee una configuración estrella-delta y el otro delta-delta para evitar el error de fase. La catenaria y su carril de retorno se modelan como dos resistencias variables: una que procura representar el movimiento del tren entre las estaciones y otra que representa la resistencia del riel por unidad de longitud. El tren se simula con las ecuaciones de Newton para relacionar las fuerzas resistentes y el par generador por el motor [73].

Luego de completar las dos etapas, se simula todo el sistema para lograr recuperación de la energía del frenado del 15%, 25%, 35% y 45%. En la simulación al 15% se obtiene que la solución más cara y la más barata son baterías y supercapacitores, respectivamente, así como la combinación de baterías con supercapacitores es más barata que con volante de inercia. Los resultados frente a otros porcentajes de ahorro de energía proporcionan resultados similares, pero el comportamiento de cada uno de éstos en un perfil de potencia de 24 h sí permite sugerir una guía de aplicación:

- Recuperación del frenado menor al 25%
 - Control de carga: supercapacitores.
 - Resiliencia: ninguno
 - Solo ahorro energético: supercapacitores.
- Recuperación del frenado mayor al 30%
 - Control de carga: volantes de inercia.
 - Resiliencia: baterías con supercapacitores.
- Recuperación del frenado entre 25% y 45%
 - Solo ahorro energético: baterías con supercapacitores.
- Recuperación del frenado mayor a 45%
 - Solo ahorro energético: baterías.

De esta manera, se observa que la aplicación de sistemas híbridos solamente es viable para valores mayor al 30% de la recuperación del frenado regenerativo. En [74] se propone resolver el problema del dimensionamiento óptimo de los sistemas de almacenamiento a bordo mediante la aplicación de algoritmos de programación lineal de enteros mixtos, basado en la ley de la conservación de la energía y en

flujo de potencias. Solamente se consideran supercapacitores, volantes de inercia y baterías de ión-litio, comparándolos con la aplicación real de éstos en casos reales de la línea Chang-ping Beijing. Previamente, ya se ha investigado modelos de optimización integrados dirigidos al aumento tasas de ahorro energético con el estudio de los perfiles de velocidad y el tiempo en estaciones de los trenes [75], así como se ha estudiado el dimensionamiento de dispositivos de almacenamiento de energía estacionarios y abordó sin restricciones de volumen ni peso, mediante simulaciones [76] y algoritmo genético para minimizar la energía a través de la catenaria y la inversión inicial [77].

Pero la mayoría de los autores aún necesitan un método de optimización que considere las características físicas de los dispositivos de almacenamiento y la operación del material rodante, por lo que este estudio propone una solución en donde se determine el tamaño óptimo de los almacenadores que minimizaría el consumo de energía por parte de la catenaria, implementando los datos reales de operación de la línea Beijing Chang-ping.

Luego de establecer la función a minimizar, que es la diferencia entre la energía de tracción y la descarga de los dispositivos de almacenamiento, se introducen parámetros como volumen, masa y costo mediante la densidad energética y el costo por kWh mostrados en la tabla 2 del artículo. Los resultados indican que, sin restricciones, como las antes mencionadas, el supercapacitor posee las mejores relaciones de ahorro energético por capacidad, costo y volumen, estableciendo una relación del 18.2% y 0.5% respecto del volante de inercia de la batería, respectivamente, en relación con su energía almacenada. Sin embargo, los tres dispositivos (volante de inercia, supercapacitor y baterías) logran reducir el consumo de la catenaria en 23.7%, 23.6% y 22.9%, respectivamente. Si se aplican restricciones de costo y de volumen, el supercapacitor y el volante de inercia son las mejores opciones (Figura 6). La batería resulta totalmente impráctica ante las restricciones de \$10 000.00 y 0.25m³, en donde exige el mayor consumo por parte de la catenaria y un mínimo aporte de energía en su descarga.

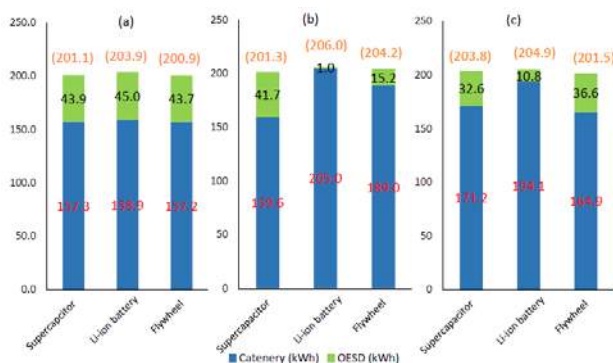


Figura 5. Resultado de la optimización del mínimo consumo de energía por parte de la catenaria: a) sin restricciones, b) restricción de costo máximo de \$10000.00, y c) restricción de volumen máximo = 0.25m³ [74]

[78] también enfoca su estudio en el óptimo dimensionamiento de los sistemas de almacenamiento de energía, pero se enfoca únicamente en líneas en DC y en dispositivos a un lado de ésta. Se aplica optimización por nube de partículas, dirigida a maximizar los beneficios económicos a través de maximizar el valor presente neto de la inversión y minimizar el periodo de retorno. Dicho método de optimización ha sido ampliamente usado: [79] optimiza el tamaño del dispositivo de almacenamiento minimizando su costo, sin encontrar la mejor ubicación; [80] determina la mejor posición y tamaño para un supercapacitor, estableciendo como objetivo a minimizar la energía demandada de la red; [81] también propone optimizar mediante la minimización del costo anual de la energía para establecer la óptima posición y el óptimo tamaño, haciendo una aproximación económica-técnica, pero considerando otros parámetros distintos de los de [78].

La novedad de este artículo está en centrarse en desarrollar una metodología apta para estimar los óptimos dimensionamientos de los dispositivos de almacenamiento al centrarse en maximizar los beneficios económicos en vez de reducir el consumo de energía. Esto se realiza en un simulador dinámico desarrollado por los autores en donde se consideran las pendientes, curvas, túneles, límites de velocidad, características aerodinámicas y motrices del vehículo, puntos kilométricos de las subestaciones, tipo de rectificadores,

características de la catenaria, frecuencia de trenes, etc. Para obtener los flujos de carga por aportar de las subestaciones y fluyentes en la catenaria, así como la variación de voltaje y las pérdidas en la línea. Los resultados finales de energía se traducen en flujos de caja a través de la representación de la potencia instalada, energía aportada y energía recargada por parte del medio de almacenamiento, para representar el valor presente neto y el periodo de retorno. Luego se maximiza el valor presente neto de acuerdo con la potencia nominal, energía aportada y la posición del dispositivo considerando límites técnicos como intensidad, tensión, estado de carga y otros.

Al considerar una línea de 72 km con seis subestaciones eléctricas de 5.4 MW de potencia nominal, ubicadas cada 15 km, en la cual un tren de 500 toneladas, 360 km/h de velocidad máxima y eficiencia del motor de 85% desarrolla un ciclo de 16 horas con 3 picos de demanda, se encuentra que el tamaño óptimo del almacenador de energía es 0.4 MWh, ubicado en el kilómetro 55 (entre la estación 4 y 5 de la Figura 7) con un retorno de 2 años, 9 meses con un costo de 0.015 euros/kWh.

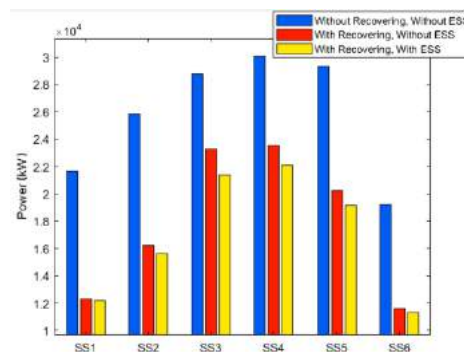


Figura 6. Resultados de la potencia suministrada por la red de la optimización con un almacenador de energía [78]

En [82] se propone un nuevo método basado en la implementación de un estabilizador activo a bordo del tren que atienda la dinámica de la tensión de continua en el bus DC de los sistemas de tracción. Los niveles bajos de tensión pueden provocar la inestabilidad del sistema y, asimismo, fallas en los dispositivos, reducción de la vida útil e incumplimiento del servicio de transporte masivo a la ciudadanía; dicha problemática puede ocasionarse por huecos de tensión en la red de distribución, caídas de tensión en los alimentadores de la red y por la naturaleza de carga constante de los convertidores. [83] optimiza el tamaño de un banco de capacitores y la gestión de la energía a través de algoritmo genético, así logra mitigar considerablemente las variaciones en la tensión; [84] resuelve los problemas de fluctuaciones de tensión de un estación de tracción débil instalando una estación de supercapacitores al final de la línea; [85] propone un sistema de optimización enfocado en reducir las pérdidas generales del sistema en pro de asegurar eficiencia y estabilidad. Se plantea encontrar las características necesarias de una subestación de almacenamiento basada en supercapacitores para una línea de tracción DC.

Este sistema consiste es un supercapacitor (Figura 8) conectado a través de un convertidor DC-DC operando en modo BOOST que desarrolla dos algoritmos por separado, atendiendo a la naturaleza de carga constante de los convertidores.

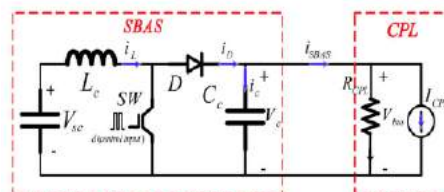


Figura 7. Circuito representativo del Supercapacitor Based Active Stabilizer [82]

El primer algoritmo (Figura 9) pretende desarrollar un control efectivo del valor de la capacitancia equivalente del bus DC, mediante el control de la corriente de estabilizador, que se regula a través de un control predictivo. Luego de que la estabilidad está asegurada, el segundo algoritmo establece las desviaciones necesarias para controlar el voltaje del bus, esto se realiza variando el voltaje de salida del

estabilizador. La lógica del primer algoritmo está fundamentada en [86] donde, aunque cada convertidor (lado de red y lado de carga) están operando en estabilidad, la estabilidad del sistema en cascada puede eliminarse si la impedancia de salida del convertidor del lado de red coincide con la impedancia de entrada del convertidor del lado de la carga. Debido a esto, el primer algoritmo solamente actúa cuando no se está cumpliendo la capacitancia mínima del bus. Usualmente, se selecciona el valor de la capacitancia considerando la peor situación de tensión, por lo que se instalaría un valor bastante alto, pero esto reduciría la eficiencia y la respuesta del sistema.

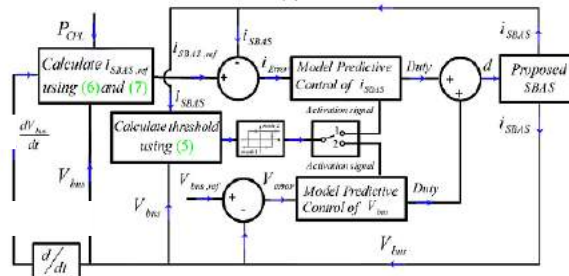


Figura 8. Sistema de control de dos modos de estrategia de control predictivo orientadas al cálculo de la capacitancia y a la tensión en el bus [82]

Los resultados proporcionaron estabilidad y una caída de tensión máxima del 2% frente a ambos escenarios planteados: un ciclo de trabajo en donde se acelera a 80 km/h, se mantiene y luego se frena, en 30 s y 80s, respectivamente; y un hueco de tensión en el lado hace del 50% de la tensión nominal.

[32] se enfoca en mejorar la eficiencia energética de un tren en frenado mediante la integración de un inversor en paralelo con la estación rectificadora de potencia. La línea en estudio contempla tres estaciones rectificadoras de 12 pulsos en una línea de 1750 V en DC. En la estación central se instala un inversor trifásico, con un rango de potencia de 1MW a 2.25MW, que pretende recuperar la mayor cantidad de energía del frenado e inyectarla a la red, mantener la tensión de la catenaria en el punto de conexión a la estación y no permitir el flujo de potencia de la red hacia la catenaria en condiciones normales de operación.

El estudio propone dos metodologías de control distintas para el inversor (Figura 10). La primera es el control de la caída de tensión: éste funciona considerando un coeficiente de caída que se determina como el cociente de la diferencia de la tensión máxima con la tensión deseada en catenaria, con la corriente máxima proporcionada por el inversor. Al haber diferencias de tensión, la corriente suministrada por el inversor a la red sigue una característica proporcional al anterior coeficiente para compensar dicha desviación. Este método fue implementado por [87] y logró recuperar el 22.5% de la potencia de frenado, limitado por las características del control y por la estrategia de frenado del tren.

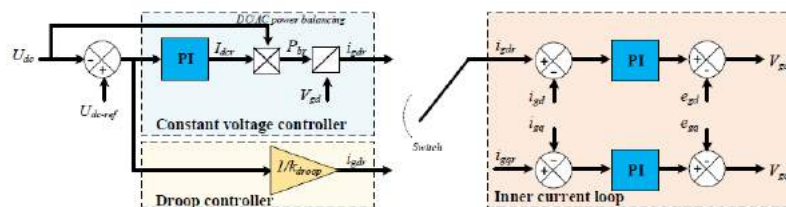


Figura 9. Esquema de control sugerido por los autores [32]

Debido a dicho límite, se propone la segunda metodología a tensión constante, que usualmente se usa en micro-grid en continua [88] y en generación distribuida con energía renovable [89]. Consiste principalmente en un regulador proporcional integral que anula la diferencia entre la tensión en catenaria existente y la deseada. La salida del regulador proporciona, a través de relaciones proporcionales debido a la naturaleza eléctrica del sistema, la corriente de referencia de la red en coordenadas dq ubicadas en la red. La corriente de la red de referencia se compara con la corriente real y se introduce a otro regulador proporcional integral que considera las ecuaciones de tensión de red en coordenadas dq de la red. Posterior al recorrido de la señal, se realizan las transformadas inversas de Park (implementando un PLL para conseguir el ángulo de referencia) y de Clarke y crear los pulsos que debe proporcionar el inversor.

Para validar el control sugerido, un tren realiza una trayectoria de 5.825 km a largo de las tres estaciones en un periodo de 175 s alcanzando la velocidad crucero de 120 km/h al segundo 70 hasta el 120. Con el control basado en la caída se consigue una desviación máxima de 175 V en el tren y 75 V en la estación, y con el control basado en tensión constante se consigue una desviación máxima de 100 V en el tren y -50V en la estación. Además, se consigue mejorar la tasa de recuperación de energía de frenado al 32.89% y al 54.45% con el control basado en caída y en tensión constante, respectivamente.

1.2.3 Integración de la generación distribuida

En [90] se atiende el problema del control de la calidad de suministro en los sistemas de alimentación de los ferrocarriles mediante la integración de generación renovable y un control Tensión-Potencia Reactiva. La generación considerada es la fotovoltaica, que es integrada al suministro ferroviario mediante un *inversor inteligente* y un medio de almacenamiento. El estudio implica un análisis de sensibilidad para obtener la cantidad de reactiva por inyectar, un método de reserva de energía adaptativo para conducir los excesos de generación y almacenarnos en el dispositivo de almacenamiento escogido y se formula el problema del decremento de las pérdidas del sistema y establecimiento de un buen perfil de tensión mediante una optimización multi objetivo.

Se toma de referencia la previa utilización de la generación distribuida para la regulación de tensión en líneas de distribución de [91], donde también se utiliza análisis de sensibilidad con algoritmos de optimización por enjambre partículas, pero sin considerar las pérdidas; y [92], donde se emplea un control óptimo de un inversor mediante la potencia reactiva para mitigar las fluctuaciones de tensión debido a la alta penetración de energía fotovoltaica, considerando una sola unidad generadora. Basado en los enfoques de ambos, se propone una estrategia multi-agente (Figura 11) compuesta por agentes definidos por centros de bases de datos, un implementador del algoritmo y un controlador; conjunto batería y paneles solares para la acumulación de energía; y un inversor inteligente como el actuador de la gestión de la energía.



Figura 10. Diagrama de topología propuesta [90]

La solución final del control es la determinación de la optimización global del problema planteado, realizando inicialmente un análisis de sensibilidad económico Tensión-Potencia Reactiva para estimar la inyección ideal de reactiva que cada unidad de generación distribuida ha de aportar. Además, la energía de la instalación fotovoltaica es apropiadamente transformada mediante la etapa de control adaptativo para las reservas. La optimización global pretende conseguir la potencia ideal para mantener el perfil de voltaje dentro del rango considerado aceptable. Luego se comprueba la efectividad del método en una red de 6 nudos: tres subestaciones de tracción (Nudos carga), dos generadoras fotovoltaicas y una acometida de la red. En los resultados se aprecia el ascenso de la tensión de 0.96 pu a 1.00 pu en el mismo nudo inspeccionada ante la misma demanda por parte del ferrocarril.

[93] y [94] estudiaron la óptima planeación de generación fotovoltaica a lo largo de una línea de alta velocidad. [94] propone un método cuantitativo que estudia las características espaciales de la generación fotovoltaica y la demanda eléctrica del tren de alta velocidad, que integra un análisis matemático *costo beneficio* para evaluar la rentabilidad del acople de la generación distribuida con sistemas de almacenamiento mientras que consigue la óptima planificación y gestión de la energía. Los resultados proporcionan la capacidad de suplir el 32.5% de la demanda de los trenes y un ahorro de 40 mil dólares

anuales. Ambos autores consideran un sistema similar al de la Figura 12, en donde la energía puede almacenarse, inyectarse a la catenaria o a la red, considerando que al inyectarse a la red también puede redirigirse a otra sección de la catenaria.

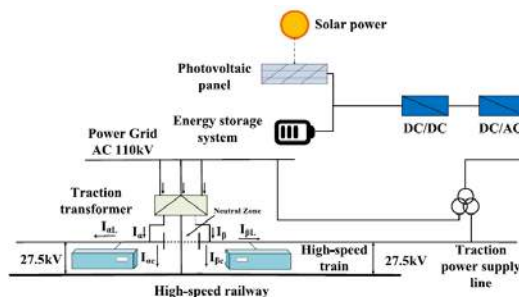


Figura 11. Esquema de conexión propuesto por [94]

[93] parte del modelo general propuesto por [94], pero profundiza en los criterios de evaluación para ubicar las instalaciones fotovoltaicas a lo largo de la línea de alta velocidad. Dentro del modelo multi-objetivo se consideran la irradiancia global, la temperatura promedio, la topografía de los posibles sitios de instalación, la distancia de la red de transmisión o distribución, la demanda periódica de los trenes de alta velocidad, la posible afección a la red por la segura fluctuación de generación, la posible afección a las subestaciones de tracción que se reflejará en alteraciones de tensiones en la catenaria y otros factores sociales y políticos. Ambos autores se enfocan en la integración de la energía solar debido a su costo en constante decremento, bajos costos de O&M y con el propósito de mejorar las finanzas de las líneas de alta velocidad chinas que están en constante expansión, mientras se consigue reducir las emisiones de dióxido de carbono.

[95] propone la utilización de micro redes para abastecer la demanda de las estaciones de los ferrocarriles, en vez de enfocarse en suministrar energía para la tracción. A diferencia de algunos autores que también han propuesto implementar micro redes para el abastecimiento de la energía en estaciones [96], éste se enfoca en las características de la demanda eléctrica de la estación y propone un control efectivo, comprobando su efectividad con simulaciones, para cuatro modos de operación distintos en donde se categoriza la carga, se gestiona la generación y el exceso de esta. El sistema estudiado es como el de la Figura 13, en donde se aprecia la utilización de una batería conectada al mismo enlace de continua que la generación solar para aportar estabilidad; ambos conectados a la red de baja tensión de la subestación mediante un inversor y un transformador.

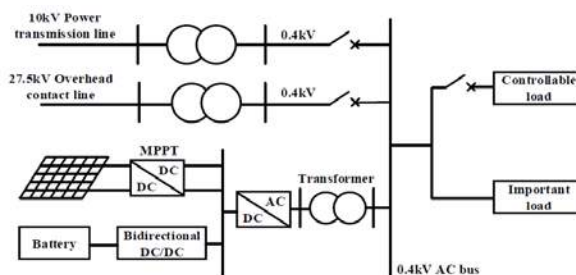


Figura 12. Estructura del sistema de potencia de una estación ferroviaria basada en micro redes [95]

También es apreciable la representación de interruptores para desligar la línea de suministro externo, el hilo de contacto de la catenaria y carga prescindible de la estación. Dichos elementos definen los modos de operación:

- Modo 1: se prioriza la generación solar para abastecer la demanda y si hay energía sobrante se reserva en la batería, que está en modo de recarga trabajando cerca al punto de máxima potencia.
- Modo 2: se prioriza la generación solar para abastecer la demanda y si hay energía sobrante, pero la batería ya está cerca de saturarse, se reduce la producción de energía para solo satisfacer la carga y mantener el balance en la red. Cuando el estado de carga de la batería reduzca por debajo del 90% se regresa al modo 1.

- Modo 3: la cantidad de energía fotovoltaica no es suficiente para suplir la demanda, por lo que la batería apoya al abastecimiento de la carga hasta que el estado de carga sea inferior al 20%, en donde cambia al modo 4.
- Modo 4: La generación fotovoltaica ni la batería pueden seguir la carga, por lo tanto, la red externa suplir la energía mientras que la batería se carga aisladamente con la generación fotovoltaica. Una vez sobrepasado en 20% del estado de carga, se procede al modo 3.

El control también considera la posibilidad de operar en modo isla cuando la red externa tiene algún fallo y debe desconectarse. El control usado para la generación del PWM del inversor controlado por corriente es *Deadbeat*, por su carencia de retardo en estado estable, buena respuesta dinámica y posibilidad de seguimiento de corriente. De acuerdo con los resultados, la micro red es capaz de suplir los requerimientos de la estación ferroviaria rápidamente, tanto en condiciones de falla como en los modos de operación descritos.

[97] examina la aplicación de *energy routers* para el acople de la generación renovable al suministro de una línea en corriente alterna. La Figura 14 presenta la integración de generación fotovoltaica y micro hidroeléctrica mediante el *energy routers*. Este consiste en varias etapas de convertidores con 2 enlaces de continua y acoplados mediante transformadores de alta frecuencia. La generación solar se conecta directamente en un enlace de continua mientras que la microhidroeléctrica al enlace de baja tensión AC. Dichos enrutadores son considerados como la mejor opción para acoplar generación renovable a un sistema con usuarios y no usuarios de la subestación de tracción por la reducción de los problemas de calidad de energía, además del óptimo control de los flujos de potencia.

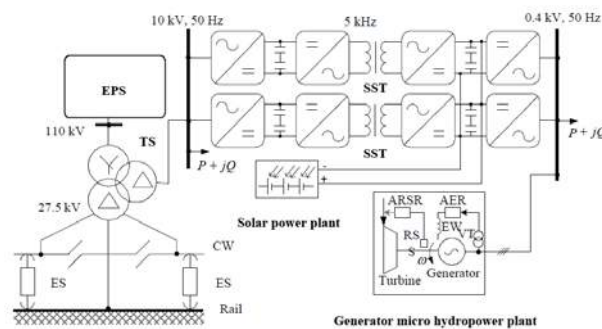


Figura 13. Utilización de un energy router en un sistema de potencia [97]

El sistema en cuestión fue probado con el paquete de Simulink SimPowerSystems, en donde la generación solar posee una capacidad de 215 kW, la hidroeléctrica 250 kW, la demanda es de 4.66 MVA y los dos enrutadores de energía, SST, de 3 MVA cada uno. Los resultados muestran poca distorsión en la tensión del bus de 0.4 kV y, además, se sometió ante cortocircuitos monofásicos, bifásicos y trifásicos y se compararon los resultados de las corrientes de falla del sistema propuesto respecto a un transformador tradicional y se logró reducir la magnitud de la falla en un promedio de 14%.

[98] estudia la arquitectura del control debido para lograr la resiliencia de micro redes, en el cual se busca balancear los intercambios de energía entre la aceleración y frenada del tren, la unidad de almacenamiento, la generación distribuida y el aporte de la red. La Figura 15 es el esquema, en donde se distingue el bloque MGCC que es en donde se generan las consignas de potencia que deben suministrar la generación eólica y solar. Las ordenes hacia los convertidores están basadas en encontrar el punto de menos costo de operación, en donde se considera la posibilidad de inyectar energía a la red o suministrarla directamente a la carga, así usando los *breakers* del esquema.

Aunque en el modelo no esté el medio de almacenamiento, el estudio contempla la utilización de un volante de inercia debido a su razonable densidad de energía y potencia, y respuesta dinámica, pero que solo se acoplaría dependiendo del escenario de costos iniciales y costos de la energía de la red. El control, además de velar por el intercambio a menos costo de energía, procura proveer un perfil de voltaje aceptable, por lo que implementa una estrategia de control de dos fases en el inversor de la generación solar. Los resultados

presentan tiempos de retorno de 4.47 y 2.146 años para los paneles solares y la turbina eólica, respectivamente, respecto a las finanzas, y confirman la capacidad del control en seguir prudentemente la demanda de los trenes con la generación renovable, confirmando la efectividad del control.

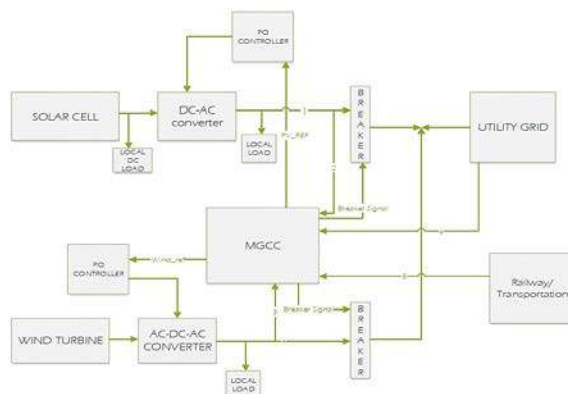


Figura 14. Arquitectura de la micro red [98]

[99] contempla la posibilidad de usar subestaciones de tracción totalmente energizadas por generadores eólicos y estabilizadas por dispositivos de almacenamiento. En este caso se contempla alimentar una catenaria de 25 kV en alterna de 300 km de extensión con circulación de trenes de mercancía y pasajeros. La Figura 16 ilustra distintos flujos de potencia posibles en la catenaria para completar la demanda de los trenes E. De acuerdo con las direcciones de las flechas, se distinguen cinco regímenes de operación:

- En ausencia de trenes y generación eólica, carga directa del almacenador.
- En ausencia de trenes y carencia de generación eólica, carga por parte de la red y del generador eólico al almacenador.
- En presencia de trenes frenando y que no se logre la coordinación de otros acelerando, carga del almacenador mediante el frenado regenerativo.
- En presencia de trenes, abastecimiento por parte del generador eólico.
- En presencia de trenes y excediendo la potencia eólica disponible, abastecimiento por parte del generador eólico y la batería.

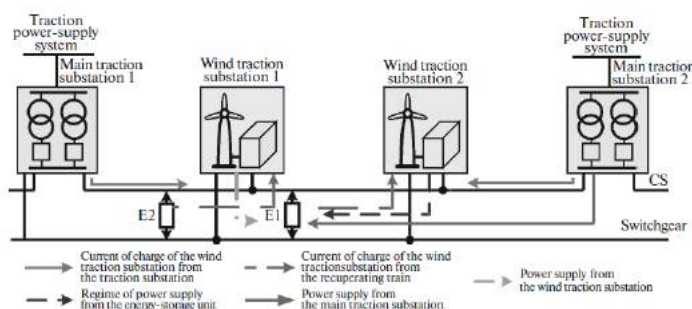


Figura 15. Catenaria con subestaciones de tracción convencionales y eólicas [99]

La estimación del tamaño de las subestaciones eólicas, su disponibilidad y los regímenes de operación contemplan una distribución de la velocidad del viento en el emplazamiento, así como el aumento de las pérdidas en la catenaria al cargar el almacenador con la red externa. La subestación eólica está compuesta por un generador eólico que emplea un generador asíncrono, un rectificador unidireccional, un convertidor DC-DC acoplado entre el enlace de continua y el almacenador, un convertidor bidireccional DC-AC y un transformador para conectarse a la catenaria. Los resultados finales sugieren el empleo de 4 a 6 subestaciones eólicas y 2 subestaciones convencionales en las esquinas del trayecto, en las cuales cada subestación eólica posee 3 unidades de 2300 MW, bajo la suposición de vientos de 7 a 9 m/s. Los tamaños de los generadores podrían no considerarse generación distribuida, pero es notable la gran extensión del trayecto y los modos de funcionamiento en donde se espera suplir la mayor cantidad de la demanda con las subestaciones eólicas.

[100] recopila las topologías para ferrocarriles en corriente continua y alterna de acuerdo con las características técnicas de éstos y cómo delimitarían el alcance de la implementación de micro redes.

Las micro redes en baja tensión de corriente continua pueden estructurarse mediante la conexión directa a la catenaria o con una derivación de la subestación de tracción. Estos sistemas poseen enlaces de continua a los mismos niveles de tensión que la catenaria (1500V-3000V) en donde, mediante convertidores DC-DC y DC-AC se conectaría generación renovable, dispositivos de almacenamiento y otras extensiones para cargas particulares. Debido a la propia composición de la electrificación, la energía del frenado regenerativo puede ser aprovechada por cualquier otro tren a lo largo de la línea o regresarse en las subestaciones a la red, alimentar auxiliares de las estaciones o almacenarse; para realizar las dos primeras alternativas es necesario adaptar las subestaciones unidireccionales o bidireccionales con la instalación de otro dispositivo en paralelo o modificando todo el sistema.

La limitación de suministro y demanda de potencia por parte de la micro red está condicionada por los niveles de tensión, que establece los máximos flujos extras admisibles para no comprometer la operación del ferrocarril. Por lo tanto, en sistemas baja tensión en corriente continua se sugiere la conexión de generadores y cargas de baja o mediana potencia (hasta 150 kW). Para permitir mayor explotación en las micro redes en corriente continua, se prefieren sistemas de 7.5 kV a 24 kV, en donde todo lo mencionado se acoplaría igual, pero dando oportunidad a mayores flujos de potencia (mayor generación y demanda) y a la interconexión con otros sistemas ferroviarios en menor tensión.

En la corriente alterna, explotada en mayores niveles de tensión debido a la necesidad de redes de transporte más extensas y con mayores requerimientos de potencia, es más fácil implementar generación distribuida de alta potencia. Sin embargo, al no haber conexión entre todas las zonas de la catenaria debido a las distintas fases de la red que la alimentan, el aprovechamiento del frenado regenerativo junto a la generación distribuida y la implementación de estaciones de carga super rápidas se reduce. Para esto, se puede implementar convertidores como interfaz entre la catenaria y un enlace de media tensión en corriente continua, que además ayuda a reducir el contenido de armónicos en la red; la topología de micro redes que acoplen líneas en continua y en alterna se denomina híbrida.

Aún con dicha implementación, la separación de zonas mediante zonas neutras restringe el aprovechamiento del frenado regenerativo y la generación distribuida en toda la línea; para esto se conectan las dos zonas de la catenaria en alterna mediante convertidores AC-DC aislados, en cuyo enlace de continua se conectaría la generación distribuida, dispositivos de almacenamiento y cargas especiales. Dicha solución resuelve el problema de la interconexión, pero reduce la inyección de potencia por las características intrínsecas de los tiristores de los convertidores. Para solventar esa restricción, es posible desarrollar varios niveles de tensión con la conexión de varias etapas de convertidores en paralelo, que mediante acoplamiento magnético definirían un mismo enlace de tensión en donde se conectaría la generación distribuida y demás elementos considerados.

Todas las topologías de micro redes comentadas son aguas debajo de la subestación de tracción, pero en los sistemas de corriente alterna también se podría instalar un transformador de tracción de tres devanados para acoplar los convertidores de interfaz entre el secundario y terciario del transformador, mientras forman un enlace de continua donde se conectaría la generación distribuida, medios de almacenamiento, suministro a cargas específicas o auxiliares, etc.

La Figura 17 contiene un resumen detallado de las topologías comentadas, en donde se distingue la capacidad de flujo de potencia, calidad de suministro, utilización del frenado regenerativo, estabilidad del sistema, cantidad de zonas neutras y ubicación de la conexión del sistema, a lo largo de la línea o solamente en subestaciones de tracción.

| Supply Type | MG Type | Power Flow Capability | Power Quality Problem | RBE Utilization | | | | System Stability | Number of Neutral Section (NS) | Along With Line Implementation | Substation Implementation |
|-------------|-------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|---------------|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| | | | | Supply Adjacent Section | Fed Back to the Grid | Saved in ESSs | Supply Internal Loads of Substation | | | | |
| DC | LV DRMG | Low | Low | ✓ | * | ✓ | ✓ | High | No NS | ✓ | ✓ |
| | MV DRMG | High | Low | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | High | No NS | ✓ | ✓ |
| | ARMG | Medium | High | — | ✓ | ✓ | ** | Low | Full | ✓ | ✓ |
| AC | IFC | High | Medium | — | ✓ | ✓ | ** | Medium | Full | — | ✓ |
| | Hybrid ARMG | Low | Low | ✓ | ✓ | ✓ | ** | High | Full | — | ✓ |
| | Cophase | Low | Low | ✓ | ✓ | ✓ | ** | High | Half | — | ✓ |

* It is possible when using reversible substation.
 ** If the regenerative train is far from the substation, it is not reasonable to supply internal loads due to the high amount of power loss along the line.

Figura 16. Resumen de implementación de micro redes [100]

3. MÉTODO

La Metodología de este artículo de investigación corresponde a la primera fase del proyecto de fin de master titulado: Metro de Panamá: Estimación y aprovechamiento alternativo de la energía de frenado regenerativo [101]. Este TFM es fruto de la colaboración entre la Universidad Tecnológica de Panamá y la Universidad Politécnica de Madrid (España).

| Fases | Materiales y programas | Actividades |
|---------------------------|--|--|
| Fase 1 Estado del Arte | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Archivo Digital UPM ▪ Artículos científicos conseguidos (Science Direct, Elsevier, IEEE, etc) ▪ Mendeley ▪ Google scholar ▪ Researchgate | <ul style="list-style-type: none"> a) Recopilación de artículos científicos a través de motores de búsqueda (Google Scholar), el archivo digital de la universidad y otras bases de datos. b) Análisis Bibliométrico. c) Compilación de avances logrados y nuevas tendencias. d) Revisión y análisis reflexivo del marco conceptual. |

4. RESULTADOS

La Tabla 1 corresponde a un resumen tabular de la revisión de la literatura científica y una clasificación de acuerdo con el tipo de técnica, algoritmo, método, enfoque que ha sido desarrollo en el documento citado. Es una tabla de naturaleza comparativa, que permite tener una síntesis reflexiva sobre la temática tratada.

Tabla 1. Resumen tabular del Estado del arte

| 1: Dimensionamiento y posicionamiento 2: Revisiones bibliográficas (reviews), estudios de casos 3: Sistemas de almacenamiento (capacitores, baterías, volantes de inercia); 4: Convertidores; 5: Optimización y control; 6: Generación Distribuida 7: Sistemas híbridos | | | | | | | | Instituciones | |
|---|------|---|---|---|---|---|---|---------------|--|
| Autor | Año | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| Popescu et al., [2] | 2019 | x | | | | | | | University of Craiova |
| Serrano et al.,[3] | 2017 | x | | | | x | | | Universidad Carlos III de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, Luleå Tekniska Universitet, (SUECIA) |
| Train et al.,[4] | 2017 | x | | | | | | | CRRC Zhuzhou Institute Company, Ltd |
| Fraga-lamas et al., [5] | 2017 | x | | | | | | | Universidade da Coruña |
| Ballesteros et al., [6] | 2020 | | | x | x | | | | Universidad Politécnica de Madrid |
| Villalba et al., [7] | 2019 | x | | | | x | | | Universidad Politécnica de Valencia |
| Hayashiya et al., [8] | 2020 | x | | | | | | | Railway System Technical Research Institute, Advanced Collab. Research Organization for Smart Society (ACROSS), Waseda University,Japan |
| Mousavi et al., [9] | 2017 | x | x | x | | | | | Iran University of Science and Technology, Tehran Regional Electric Company (TREC), Tehran, Iran, Islamic Azad University, Tehran, Iran, École de Technologie Supérieure, Canada |
| Berrueta et al., [10] | 2019 | x | x | | | | | | Universidad de Navarra, Belfast Academy |
| Liu et al., [11] | 2020 | x | x | | | | | | University of Leeds |
| Zhang et al., [12] | 2020 | x | x | | | | | | Beijing Mass Transit Railway Operation Corporation LTD, Beijing Subway Operation Technology Centre, Beijing Jiaotong University Yangtze River De Ita Research Institute |
| Lu et al., [13] | 2017 | | | x | | | | | Beijing Metro Operation Co. Ltd, Beijing |
| Khodaparastan et al.,[14] | 2019 | x | x | x | | | | | City University of New York, USA |
| Martin et al., [15] | 2020 | | | x | x | | | | Universidad Politécnica de Madrid |
| Dutta et al., [23] | 2020 | x | x | | | x | x | | The City University of New York, |
| Albrecht [24] | 2004 | | | | | x | | | Minia University,Egypt |

| | | | | | |
|-------------------------------|------|---|---|---|--|
| Tian et al., [25] | 2017 | | | x | University of Birmingham,UK |
| Nasri et al., [26] | 2010 | | | x | Sharif University of Technology, Iran |
| Van Mierlo et al., [27] | 2004 | | | | Vrije Universiteit Brussels, Brussels |
| Fournier et al., [28] | 2015 | | | x | Inria Paris-Rocquencourt, GE Transportation - Equipe Delta |
| Brenna et al., [29] | 2020 | x | | | Politecnico di Milano, Italy; University of Trieste, Italy; University of Rome Sapienza, Italy |
| Minaminosono et al., [30] | 2019 | x | | | China Academy of Railway Sciences Corporation Limited |
| Yang et al., [31] | 2020 | x | x | x | CRRC Zhuzhou Locomotive Co, Beijing Jiaotong University, Beijing Institute of Technology, |
| Krim et al., [32] | 2020 | | | x | University of Monastir, Tunisia Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI), Francia |
| Cui et al., [33] | 2019 | | x | | Hunan University, Guangdong Diankeyuan Energy Technology Co., Ltd, Powerchina Zhongnan Engineering Corporation Lim. |
| Liu et al., [34] | 2020 | | x | x | Wuhan Instit. Technology, China Coal Pingshuo Group Co., Ltd. |
| Liu et al., [35] | 2019 | | x | x | Beijing Jiaotong University |
| Abdelhedi et al., [36] | 2017 | | x | x | INSAT - Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie [Tunis]; MIS - Ampère, Département Méthodes pour l'Ingénierie des Systèmes; MMA - INSAT Tunis; Renewable Energy Research Group |
| Ghaviha et al., c | 2017 | x | x | | Mälardalen University,Suecia, SICS Swedish ICT AB, Suecia |
| Chatzivasileiadi et al., [38] | 2013 | | x | | Cardiff University, UK |
| Chen et al., [39] | 2009 | x | x | | University of Leeds, Chinese Academy of Sciences |
| Arboleya et al., [40] | 2016 | x | x | | University of Oviedo, CAF Turnkey and Engineering, CAF Turnkey and Engineering Company |
| Barrero et al., [41] | 2008 | x | x | | Vrije Universiteit Brussel, Université Libre de Bruxelles |
| Barrero et al., [42] | 2010 | | x | | Vrije Universiteit Brussel |
| Boizumeau et al., [43] | 2011 | x | x | | STIB (Brussels, Belgium), GMPT (Manchester, UK), moBiel (Bielefeld, Germany), RATP (Paris, France) RET (Rotterdam, The Netherlands). |
| Steiner et al., [44] | 2007 | | x | | Bombardier Transportation, Mannheim, Germany Fachhochschule Amberg-weiden, Amberg, Germany |
| González-gil et al., [45] | 2014 | | | x | Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) |
| Moskowitz et al., [46] | 2010 | | x | | Newcastle University |
| González-Gil et al., [47] | 2014 | | | x | Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) |
| Lacôte et al., [48] | 2005 | x | x | | ALSTOM Transport |
| González-gil et al., [51] | 2013 | x | x | | Newcastle University |
| Konishi et al., [52] | 2012 | | x | | Railway Technical Research Institute, West Japan Railway Company, Seibu Railway Co., Ltd. |
| Castro et al., [53] | 2007 | | x | | Alstom Transport, USA |
| Cornic et al., [55] | 2010 | x | x | | Alstom Transport, USA |
| Gelman et al., [56] | 2009 | | | x | VG Controls, Inc. |
| Lu et al., [58] | 2019 | | | x | China University of Mining and Technology, Shenshuo Railway Branch Company of China Shenhua |
| Hao et al., [59] | 2020 | | x | x | Beijing Jiaotong University |
| Li et al., [60] | 2018 | | | x | University of Kaiserslautern, Germany |
| Nasari et al., [61] | 2019 | | | x | University of Michigan |
| Rezaei et al., [62] | 2017 | | | x | Michigan Technological University, Electrical Engineering Department |
| Sobol [63] | 2001 | | | x | Institute for Mathematical Modelling of the Russian Academy of Sciences, |
| Yin et al., [64] | 2014 | | x | x | University of Michigan-Shanghai Jiao Tong University Joint Institute, Shanghai Jiao Tong University |
| Zhao et al., [65] | 2015 | | x | | University of Michigan-Shanghai Jiao Tong University Joint Institute |
| Cao et al., [66] | 2016 | | x | | University of Illinois at Urbana Tesla Motors, USA, University of Illinois at Urbana |
| Lee et al., [67] | 2020 | | x | x | Semyung University Korea Railroad Research Institute |
| Jefimowski et al., [68] | 2020 | | x | x | Warsaw University of Technology |
| Radu et al., [69] | 2019 | | x | X | Warsaw University of Technology |

| | | | | | |
|---------------------------|------|---|---|---|--|
| Barrero et al., [71] | 2008 | | x | x | Vrije Universiteit Brussel Université Libre de Bruxelles |
| Devillers et al., [72] | 2013 | x | x | X | Institut FEMTO-ST |
| Iannuzzi et al., [73] | 2012 | | x | X | University of Naples Federico II University of Birmingham |
| Wu et al., [74] | 2020 | x | x | X | South China University of Technology Xi'an Jiaotong-Liverpool University, University of Liverpool, |
| Wu et al., [75] | 2018 | | x | X | Xi'an Jiaotong-Liverpool University University of Liverpool, Jiangxi University of Science and Technology, |
| Ratniyomchai et al., [76] | 2014 | x | x | x | University of Birmingham |
| Herrera et al., [77] | 2016 | x | x | x | IK4-IKERLAN Technology Research Centre Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles |
| Lamedica et al., [78] | 2020 | x | x | x | Sapienza University of Rome, |
| Yoshida et al., [79] | 2018 | x | x | x | University of South Carolina Columbia University, University of South Carolina |
| Calderaro et al., [80] | 2015 | x | x | x | University of Salerno |
| Graber et al., [81] | 2018 | x | x | x | University of Salerno |
| Naseri et al., [82] | 2020 | | x | x | Shiraz University, Aalborg University, Aalborg, Denmark, Grenoble Electrical Engineering Laboratory (G2ELab) France |
| Xia et al., [83] | 2015 | x | x | x | Beijing Jiaotong University |
| Rufer et al., [84] | 2004 | | x | x | Swiss Federal Institute of Technology, SEMER, Passy, France |
| Iannuzzi et al., [85] | 2012 | | x | x | University of Naples "Federico II" |
| Zhang et al., [86] | 2016 | | x | x | University of Sheffield (UK) |
| Almaksour et al., [87] | 2019 | | x | x | Railenium, SNCF Réseau, SNCF- Direction Innovation & Recherche |
| Cabrane et al., [88] | 2017 | | x | x | x Chungnam National University, Mohammadia School of Engineers |
| Krim et al., [89] | 2018 | | | x | University of Monastir, Tunisia Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI) |
| Pan et al., [90] | 2017 | | x | x | x University of Florida |
| Li et al., [93] | 2020 | | | x | x North China Electric Power University, |
| Zhong et al., [94] | 2020 | | x | x | x North China Electric Power University |
| Xie et al., [95] | 2020 | | x | x | x Lanzhou Jiaotong University China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. |
| Bulatov et al., [97] | 2018 | | x | x | Bangladesh University of Engineering and Technology |
| Gabbar et al., [98] | 2017 | | x | x | x University of Ontario Institute of Technology, Zagazig University, Egypt |
| Kotel'nikov et al., [99] | 2017 | | x | x | Railway Technical Research Institute, (Japan), Meidensha Corporation |
| Brenna et al., [100] | 2020 | x | x | x | Polytechnic University of Milan |

El estado del arte corresponde a un total de 85 publicaciones que corresponde a artículos científicos de temáticas como: dimensionamiento y posicionamiento de los sistemas de almacenamiento de energía con relación a la línea eléctrica, artículos sobre recopilaciones de la literatura científica y estudios de casos, capacitores; sistemas de almacenamiento; convertidores; metodología de optimización y técnicas de control; generación distribuida y sistemas híbridos. Como reflexión inicial, esta revisión documental se cierne en presentar los avances tecnológicos existentes, en dos aristas, primero las tecnologías existentes más desarrolladas y como segundo aspecto, aquellos enfoques de las metodologías de investigación para el modelado, la optimización, el control y su implementación en los sistemas de transporte ferroviarios.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el primero de los aspectos, las tendencias más desarrolladas se presentan: el enfoque de horarios de operación [14, 24-28] almacenamiento de energía [2, 10-12, 14, 29-53] y subestaciones reversibles [2, 37, 54-59]. El enfoque del control de los horarios de los trenes corresponde al aprovechamiento de la energía que se libera con el frenado de los trenes y su aprovechamiento por otro tren que este traccionando u otra entidad eléctrica que requiera ese consumo de energía. De acuerdo con el método implementado, se puede obtener ahorros energéticos del 4% [24] al 38.6% [25]. Bajo el enfoque del control de horarios de las operaciones de los trenes, [14] presentó una recopilación de diversos métodos de optimización en

combinación con técnicas de algoritmo genético [26], modelo dinámico de programación [27], modelos heurísticos [28], optimización del consumo en subestaciones [25], entre otros métodos.

Con respecto a la tendencia tecnológica relacionada con el almacenamiento de energía, se tiene que los dispositivos más ampliamente usados para sistemas de almacenamiento son las baterías, los supercapacitores y los volantes de inercia. Los sistemas o mecanismos de almacenamiento son esenciales para el buen aprovechamiento de la energía sobrante de los sistemas energéticos regenerativos. De acuerdo con [2, 11, 12, 35], para control de tensión son más apropiados los supercapacitores y volantes de inercia por su rápida respuesta y su alta densidad de potencia, pero para recuperación de energía y sistemas de energía son más apropiadas las baterías debido a la alta densidad de energía y a la poca corriente de auto-descarga que poseen estas.

Siguiendo con las tendencias más desarrolladas y la localización de estos dispositivos de almacenamiento de energía, estos se clasifican en soluciones a bordo del tren (techo o suelo) o soluciones estacionarias (al lado de la vía ferroviaria). Por ejemplo, las soluciones a bordo del tren han alcanzado ahorros de energía desde 18.6% hasta 35.8% en los ferrocarriles de Bruselas y Madrid [41, 42]. Otra de las tecnologías a bordo del tren, es decir, los supercapacitores de Bombardier, MITRAC Energy Saver, han representado ahorros energéticos del 30% [44], en el tren ligero de Mannheim en Alemania además de reducir los picos de demanda en un 50%, proporcionando una reducción en los huecos de tensión del sistema; el sistema ACR de CAF basado en supercapacitores instalados en el tranvía de Sevilla [45].

Por parte de la empresa Alstom hay supercapacitores a bordo STEEM instalados en el tranvía de París [45] en donde se consiguió reducción del consumo energético del 10% al 18% y operación sin catenaria en tramos entre estaciones de 300 m [46], baterías a bordo de Ni-MH Salfit en el tranvía de Niza [45] y volantes de inercia en el techo del tranvía de Rotterdam [47, 48] para lograr la nivelación de la carga y la operación sin catenaria; y la empresa Siemens tiene sistemas basados en supercapacitores como Sitras MES, que ha sido instalado en el tranvía de Innsbruck (Austria) [45], y sistemas híbridos de supercapacitores con baterías Ni-MH como el Sitras HES instalado en el tren ligero de Lisboa [49].

Para los casos de las tecnologías estacionarias, dependiendo de la tecnología implementada y del fabricante de esta, se han registrado ahorros de consumo energético del 20% al 30% [14]. Entre las aplicaciones para los sistemas de almacenamiento, se puede destacar que, pese a la diferencia de las prestaciones entre baterías, volantes de inercia y supercapacitores, todos pueden usarse para lograr los mismos objetivos con más o menos ahorros.

Para los casos de tecnologías subestaciones reversibles, independientemente del tipo de configuración implementada, estos sistemas [2, 54-57] tienen la función de permitir el intercambio natural de la energía del frenado entre trenes como prioridad, minimizando el nivel de armónicos para asegurar una buena calidad de suministro de energía en el lado AC y DC [58, 59].

Con respecto a la segunda vía, es decir, los enfoques contemporáneos de líneas de investigación, se presenta: el enfoque basado en sistemas de almacenamiento híbrido [34, 60-67] algoritmos de optimización y control [23, 32, 68-89] e integración de la generación distribuida [90-100]. Por ejemplo, [34, 35, 60-67] y el enfoque relativo a la integración de la generación distribuida [90-100]. En general, se realizan investigaciones sobre la aplicación de técnicas de control, la optimización, técnicas heurísticas, análisis de sensibilidad, simulaciones de vehículos y el cálculo de las pérdidas en sistemas híbridos.

Siguiendo con este primer enfoque, pero más enfocado en las técnicas de optimización se presentó una síntesis de trabajos [23, 32, 68, 69, 71- 89]. Por ejemplo, [89] realiza una combinación de técnicas de control con lógica difusa; [60] presenta un estudio sobre técnicas de control adaptativo; [93] utiliza una función multiobjetivo y [28] presenta un algoritmo heurístico. En el tema de sistemas y vehículos híbridos se recogen las investigaciones de [23, 34-36, 61, 62, 64, 65, 67, 82, 88].

Con respecto al segundo enfoque sobre la integración de la generación distribuida [90- 100] es abordado por autores como [95, 97-100], entre otros.

La recopilación de los casos de éxitos presentados evidencia una relación de compromiso entre las tecnologías disponibles y el enfoque de la aplicación de la investigación dependiendo de los escenarios de generación y el consumo posterior de esa energía de regeneración. Como se ha visto no solo es una combinación de componentes tecnológicos y su aplicación, se añade el análisis de factibilidad económica correspondiente. Esto convierte su puesta en escena en un problema que requiere un análisis multifactorial de naturaleza combinatoria para escoger la solución tecnológica más adecuada tomando muy en cuenta la implementación técnico-económica de esta. A priori pareciera un problema combinatorio, sin embargo, es mas bien de naturaleza permutativa. La diferencia en entre un escenario combinatorio y otro permutativo, es que en la combinación no importa el orden, en la permutación sí. Aquí el orden de la solución importa porque va ligada a restricciones técnico- económica, como se ha podido constatar en esta revisión documental y de allí la necesidad de los análisis de sensibilidad, factibilidad [35, 90, 91, 92].

6. CONCLUSIONES

La recopilación de los casos de éxitos presentados evidencia una relación de compromiso entre las tecnologías disponibles y el enfoque de la aplicación de la investigación dependiendo de los escenarios de generación y el consumo posterior de esa energía de regeneración.

Como se ha visto no solo es una combinación de componentes tecnológicos y su aplicación, se añade el análisis de factibilidad económica correspondiente. Esto convierte su puesta en escena en un problema que requiere un análisis multifactorial de naturaleza permutativa para escoger la solución tecnológica más adecuada tomando muy en cuenta la implementación técnico-económica de esta.

En este sentido, como se ha comentado los análisis de sensibilidad permite la puesta en escena de las simulaciones de los diferentes escenarios tecnológico como mecanismo para encontrar la solución tecnológica más óptima dependiendo del contexto.

En esta síntesis de ideas, la naturaleza permutativa de la solución más optima obedece a su contexto, ya que este tiene restricciones de naturaleza: legal, tecnologías, de absorción de la transferencia tecnológica, económicas, recurso humano, mantenimiento entre otras.

Agradecimientos

Los autores expresan agradecimiento a la Secretaria Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación SENACYT de la República de Panamá por el otorgamiento de una beca al ingeniero Jesús Arauz Sarmiento bajo el programa de Maestría en Áreas específicas de Conocimiento, que le ha permitido realizar el Master en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Madrid. También a la Universidad Tecnológica de Panamá, concretamente al Grupo de investigación Panama Railway Engineering Research Group, al Centro de Investigaciones Eléctricas, mecánicas y de la Industria CINEMI y a la Facultad de Ingeniería Industrial. Lo mismo a la Universidad Politécnica de Madrid.

REFERENCIAS

- [1] Agencia Internacional de Energía (IEA), "Railway Handbook 2017," 2017. [Online]. Recuperado: <https://www.iea.org/reports/railway-handbook-2017>.
- [2] M. Popescu and A. Bitoleanu, "A review of the energy efficiency improvement in DC railway systems," *Energies*, vol. 12, no. 6, 2019.
- [3] D. Serrano-jiménez, L. Abrahamsson, S. Castaño-solís, and J. Sanz-feito, "Electrical Power and Energy Systems Electrical railway power supply systems : Current situation and future trends," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 92, pp. 181–192, 2017.
- [4] J. Feng, J. Xu, W. Liao, and Y. Liu, "Review on the Traction System Sensor Technology of a Rail Transit Train," *Sensors. MDP*, no. Dc, 2017.
- [5] P. Fraga-lamas, T. M. Fernández-caramés, and L. Castedo, "Towards the Internet of Smart Trains : A Review on Industrial IoT-Connected Railways," *Sensors. MDP*, vol. 17, no. 6, 2017.
- [6] S. Ballesteros, J. de D. Sanz Bobi, and Á. Calvo, "Visión de las Smart Grids y las Micro - Smart Grid en el entorno ferroviario." Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, p. 156, 2020.
- [7] P. Martínez-Fernandez, I. Villalba-Sanchis, V. Yepes, and R. Insa-Francno, "A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption," *J. Clean. Prod.*, vol. 222, no. 10, pp. 153–162, 2019.

- [8] H. Hayashiya and K. Kondo, "Recent trends in power electronics applications as solutions in electric railways," *IEEE Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 15, no. 5, pp. 632–645, 2020.
- [9] S. M. G. Mousavi, F. Faraji, A. Majazi, and K. Al-haddad, "A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 477–490, 2017.
- [10] A. Berrueta, A. Ursua, I. S. Martin, A. Eftekhari, and P. Sanchis, "Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50869–50896, 2019.
- [11] X. Liu and K. Li, "Energy storage devices in electrified railway systems: A review," *Transp. Saf. Environ.*, vol. 2, no. 3, pp. 183–201, 2020.
- [12] J. Zhang, Y. Li, H. Xie, and B. Li, "Urban Rail Transit Energy Storage Based on Regenerative Braking Energy Utilization," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1549, no. 4, 2020.
- [13] Y. Lu, Y. Zhao, X. Zhao, G. Li, and C. Zhang, "Status analysis of regenerative braking energy utilization equipments in urban rail transit," *2017 IEEE Transp. Electrification Conf. Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2017*, 2017.
- [14] M. Khodaparastan, A. A. Mohamed, and W. Brandauer, "Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, no. 8, pp. 2831–2847, 2019.
- [15] C. Martin, J. de D. Sanz Bobi, and Á. Calvo, "Modelo de Aprovechamiento de Energía de Sistemas Ferroviarios para Alimentación de Instalaciones Auxiliares." Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, p. 155, 2020.
- [16] Adif, "Pliego de Prescripciones Técnicas: Plataforma Sócrates," 2018. .
- [17] Adif, "Proyecto Inverfer," 2014. .
- [18] P. Merlín, "Proyecto Merlín," 2015. .
- [19] E-lobster, "e-lobster: Results and public reports," 2020. .
- [20] P. Osiris, "Proyecto Osiris: Objetivos," 2020. .
- [21] Adif, "Ferrolinera," 2014. .
- [22] Siemens, "Increasing Energy Efficiency From virtuality to reality," Munich, Alemania, 2011.
- [23] O. Dutta, M. Saleh, M. Khodaparastan, and A. Mohamed, "A dual-stage modeling and optimization framework for wayside energy storage in electric rail transit systems," *Energies*, vol. 13, no. 7, pp. 1–26, 2020.
- [24] T. Albrecht, "Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control," *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 74, p. 10, 2004.
- [25] Z. Tian, P. Weston, N. Zhao, S. Hillmansen, C. Roberts, and L. Chen, "System energy optimisation strategies for metros with regeneration," *Transp. Res. Part C*, vol. 75, pp. 120–135, 2017.
- [26] A. Nasri, M. F. Moghadam, and H. Mokhtari, "Timetable Optimization for Maximum Usage of Regenerative Energy of Braking in Electrical Railway Systems," in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2010, pp. 1218–1221.
- [27] J. Van Mierlo and G. Maggetto, "Innovative Iteration Algorithm for a Vehicle Simulation Program," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 53, no. 2, pp. 401–412, 2004.
- [28] D. Fournier, F. Fages, and D. Mulard, "A Greedy Heuristic for Optimizing Metro Regenerative Energy Usage," in *Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2015, pp. 0–18.
- [29] M. Brenna *et al.*, "A Review on Energy Efficiency in Three Transportation Sectors : Railways , Electrical Vehicles and Marine," *energies MDPI*, vol. 13, no. 9, pp. 1–19, 2020.
- [30] K. Minaminosono, M. Hashimoto, and T. Yoshinaga, "Study of Potential and Utilization of Regenerative Power in Electric Railway," in *8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 2019, pp. 164–168.
- [31] Y. Yang, W. Zhang, S. Wei, and Z. Wang, "Optimal Sizing of On-Board Energy Storage Systems and Stationary Charging Infrastructures for a Catenary-Free Tram," *energies MDPI*, vol. 13, no. 6227, p. 21, 2020.
- [32] Y. Krim *et al.*, "Comparative study of two control techniques of regenerative braking power recovering inverter based DC railway substation," *2020 22nd Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2020 ECCE Eur.*, pp. 1–9, 2020.
- [33] G. Cui *et al.*, "Supercapacitor Integrated Railway Static Power Conditioner for Regenerative Braking Energy Recycling and Power Quality Improvement of High - Speed Railway System," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. PP, no. c, p. 1, 2019.
- [34] J. Liu, Y. Wang, Y. Wu, Y. Li, and X. Wang, "Research and implementation of new-type supercapacitor and battery hybrid energy storage system," *J. Power Electron.*, vol. 20, no. 6, pp. 1395–1404, 2020.
- [35] Y. Liu, Z. Yang, F. Lin, and H. Yang, "Energy loss analysis of the stationary battery-supercapacitor hybrid energy storage system," *2019 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2019 - Proc.*, pp. 1–6, 2019.
- [36] R. Abdelhedi, A. C. Ammari, A. Sari, A. Lahyani, and P. Venet, "Optimal power sharing between batteries and supercapacitors in Electric vehicles," in *2016 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications, SETIT 2016*, 2017, pp. 97–103.
- [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.
- [38] A. Chatzivasileiadi, E. Ampatzi, and I. Knight, "Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 814–830, 2013.

- [39] H. Chen, T. Ngoc, W. Yang, C. Tan, and Y. Li, "Progress in electrical energy storage system : A critical review," *ProNat. Sci.*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, 2009.
- [40] B. P. Arboleya and U. Armendariz, "Energy Is On Board: Energy Storage and Other Alternatives in Modern Light Railways," *IEEE Electrifi.*, vol. 4, no. 3, pp. 30–41, 2016.
- [41] R. Barrero and J. Van Mierlo, "Enhanced Energy Storage Systems for Improved On-Board Light Rail Vehicle Efficiency," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, no. September, pp. 26–36, 2008.
- [42] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, "Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network," 2010.
- [43] J. N E Boizumeau and P. Leguay, "Overview of breaking energy recovery technologies in the public transport field," *Workshop Braking Energy Recovery System*. Ticket Kyoto Project, Kyoto, 2011.
- [44] M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela, "Energy storage system with Ultracaps on board of railway vehicles," 2007.
- [45] A. González-gil, R. Palacin, P. Batty, and J. P. Powel, "Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy," in *Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment*, 2014, pp. 374–388.
- [46] J. P. Moskowitz and J. L. Cohuau, "STEEM: ALSTOM and RATP experience of supercapacitors in tramway operation," in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2010*, 2010, pp. 1–5.
- [47] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, and J. P. Powell, "A systems approach to reduce urban rail energy consumption," *Energy Convers. Manag.*, vol. 80, pp. 509–524, 2014.
- [48] F. Lacôte, "Alstom-Future trends in railway transportation," *Japan Rail. & Transport Review*. Tokyo, pp. 4–9, 2005.
- [49] M. Meinert, "New mobile energy storage system for rolling stock," in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009. Recuperado: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5278736>
- [50] Siemens, "Increasing Energy Efficiency Optimized Traction Power Supply in Mass Transit Systems," Munich, Alemania, 2011.
- [51] 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.
- [52] T. Konishi and M. Tobita, "Fixed Energy Storage Technology Applied for DC Electrified Railway (Traction Power Substation)," in *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2012, p. 6.
- [53] O. Soilis, F. Castro, L. Bukhin, K. Pham, D. Turner, and G. Thompson, "Saving money every day: La metro subway wayside energy storage substation," in *Proceeding of the 2015 Joint Rail Conference*, 2017, pp. 2015–2018.
- [54] Alstom, "RE-USE Layman's Report," 2018. Recuperado: https://life-future-project.eu/ficheros/Informe_Layman_LifeFuture-ENG.pdf
- [55] D. Cornic, "Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2010, p. 9.
- [56] V. Gelman, "Energy Savings With Reversible Thyristor Controlled Rectifier," in *Proceeding of the 2009 ASME Joint Rail Conference*, 2009, pp. 1–6.
- [57] Siemens, "Sitras TCI-Thyristor Controlled Inverter for DC Traction Power Supply." Siemens, 2018. Recuperado: <https://dokumen.tips/documents/sitras-tci-siemens-sitras-tci-thyristor-controlled-inverter-for-dc-traction-power.html>
- [58] Q. Lu *et al.*, "An optimized regulation scheme of improving the effective utilization of the regenerative braking energy of the whole railway line," *Energies*, vol. 12, no. 21, 2019.
- [59] F. Hao, G. Zhang, J. Chen, Z. Liu, D. Xu, and Y. Wang, "Optimal Voltage Regulation and Power Sharing in Traction Power Systems with Reversible Converters," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8950, no. c, 2020.
- [60] G. Li and D. Görges, "Ecological Adaptive Cruise Control and Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Heuristic Dynamic Programming," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, pp. 1–10, 2018.
- [61] S. Nazari, J. Siegel, and A. Stefanopoulou, "Optimal Energy Management for a Mild Hybrid Vehicle With Electric and Hybrid Engine Boosting Systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 4, pp. 3386–3399, 2019.
- [62] A. Rezaei, J. B. Burl, B. Zhou, and M. Rezaei, "A New Real-Time Optimal Energy Management Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 27, no. 2, pp. 830–37, 2017.
- [63] I. M. Sobol, "Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates," *Math. Comput. Simul.*, vol. 55, no. 1–3, pp. 271–280, 2001.
- [64] H. Yin, S. Member, C. Zhao, S. Member, M. Li, and C. Ma, "Utility Function-Based Real-Time Control of A Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy System," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 3203, no. c, pp. 1–12, 2014.
- [65] C. Zhao, H. Yin, and Z. Yang, "Equivalent Series Resistance-Based Energy Loss Analysis of a Battery Semiactive Hybrid Energy Storage System," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 3, pp. 1081–1091, 2015.
- [66] Y. Cao, S. Member, R. C. Kroeze, and P. T. Krein, "Multi-timescale Parametric Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations," *IEEE Trans. Transp. Electrifi.*, vol. 2, no. 4, pp. 432–442, 2016.
- [67] H. Lee, J. Kim, C. Lee, and J. Kim, "Novel Cooperative Controller Design of Heterogeneous Energy Storages for Economic Applications in Electric Railway Systems," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 979–987, 2020.
- [68] W. Jefimowski, A. Nikitenko, Z. Drążek, and M. Wieczorek, "Stationary supercapacitor energy storage operation algorithm based on neural network learning system," *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.*, vol. 68, no. 4, pp. 733–738.

- [69] P. V. Radu, A. Szlag, and M. Steczek, "On-board energy storage devices with supercapacitors for metro trains-case study analysis of application effectiveness," *Energies*, vol. 12, no. 7, 2019.
- [70] M. Outtara and Y. Gordon, "WMATA Energy Storage Demonstration Project." Federal Transtir Adm. no 0086, Washington DC, USA, p. 39, 2015.
- [71] R. Barrero, X. Tackoen, J. Van Mierlo, V. U. Brussel, and B.-Elsene, "Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2008, pp. 1–8.
- [72] N. Devillers, S. Jemei, M. Péra, D. Bienaimé, and F. Gustin, "Review of characterization methods for supercapacitor modeling," *J. Power Sources*, vol. 246, pp. 596–608, 2013.
- [73] D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Speed-Based State-of-Charge Tracking Control for Metro Trains With Onboard Supercapacitors," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 4, pp. 2129–2140, 2012.
- [74] C. Wu, S. Lu, F. Xue, L. Jiang, and M. Chen, "Optimal Sizing of Onboard Energy Storage Devices for Electrified Railway Systems," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 6, no. 3, pp. 1301–1311, 2020.
- [75] C. Wu *et al.*, "Train Speed Trajectory Optimization With On-Board Energy Storage Device," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. PP, no. Mld, pp. 1–11, 2018.
- [76] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen, and P. Tricoli, "Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways," *IET Electr. Syst. Transp.*, no. September 2013, pp. 9–20, 2014.
- [77] V. I. Herrera, H. Gaztañaga, A. Milo, and A. Saez-de-ibarra, "Optimal Energy Management and Sizing of a Battery - Supercapacitor based Light Rail Vehicle with Multi - objective approach," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 9994, no. c, pp. 3367–3377, 2016.
- [78] R. Lamedica, A. Ruvio, L. Palagi, and N. Mortelliti, "Optimal Siting and Sizing of Wayside Energy Storage Systems in a D.C. Railway Line," *Energies*, vol. 13, no. 23, p. 6271, 2020.
- [79] Y. Yoshida, H. P. Figueroa, and R. A. Dougal, "Use of Time Series Load Data to Size Energy Storage Systems," *2018 IEEE Green Energy Smart Syst. Conf. IGESSC 2018*, pp. 1–6, 2018.
- [80] V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber, and A. Piccolo, "Optimal Siting and Sizing of Stationary Supercapacitors in a Metro Network using PSO," in *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015, pp. 2680–2685.
- [81] G. Graber, V. Calderaro, V. Galdi, A. Piccolo, and R. Lamedica, "Techno-economic Sizing of Auxiliary-Battery-Based Substations in DC Railway Systems," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 4, no. 2, pp. 616–625, 2018.
- [82] F. Naseri, E. Farjah, Z. Kazemi, E. Schartz, T. Ghanbari, and J. L. Schanen, "Dynamic Stabilization of DC Traction Systems Using a Supercapacitor-Based Active Stabilizer with Model Predictive Control," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 228–240, 2020.
- [83] H. Xia, H. Chen, Z. Yang, F. Lin, and B. Wang, "Optimal Energy Management, Location and Size for Stationary Energy Storage System in a Metro Line Based on Genetic Algorithm," *energies MDPI*, vol. 8, no. 10, pp. 11618–11640, 2015.
- [84] A. Rufer, S. Member, D. Hotellier, and P. Barrade, "A Supercapacitor-Based Energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 2, pp. 629–636, 2004.
- [85] D. Iannuzzi, F. Ciccarelli, and D. Lauria, "Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks," *Transp. Res. Part C*, vol. 21, no. 1, pp. 321–337, 2012.
- [86] X. Zhang, "Impedance Control and Stability of DC/DC Converter Systems, Doctoral dissertation," University of Sheffield, 2016.
- [87] K. Almaksour *et al.*, "Mutual impact of train regenerative braking and inverter based reversible DC railway substation," in *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2019*, 2019.
- [88] Z. Cabrane, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, "Battery and supercapacitor for photovoltaic energy storage: a fuzzy logic management," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 4, pp. 1157–1165, 2017.
- [89] Y. Krim, D. Abbes, S. Krim, and M. Faouzi, "Intelligent droop control and power management of active generator for ancillary services under grid instability using fuzzy logic technology," *Control Eng. Pract.*, vol. 81, no. September, pp. 215–230, 2018.
- [90] W. Pan, S. C. Dhulipala, and A. S. Bretas, "A distributed approach for DG integration and power quality management in railway power systems," *Conf. Proc. - 2017 17th IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2017 1st IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. IEEEIC / I CPS Eur. 2017*, 2017.
- [91] B. B. Zad, H. Hasanvand, J. Lobry, and F. Vallée, "Optimal reactive power control of DGs for voltage regulation of MV distribution systems using sensitivity analysis method and PSO algorithm," *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 68, pp. 52–60, 2015.
- [92] M. Farivar, R. Neal, C. Clarke, and S. Low, "Optimal Inverter VAR Control in Distribution Systems with High PV Penetration," *IEEE*, pp. 1–7, 2012. Recuperado: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6345736>
- [93] C. Li, C. Xu, and X. Li, "A multi-criteria decision-making framework for site selection of distributed PV power stations along high-speed railway," *J. Clean. Prod.*, vol. 277, p. 124086, 2020.
- [94] Z. Zhong, Y. Zhang, H. Shen, and X. Li, "Optimal planning of distributed photovoltaic generation for the traction power supply system of high-speed railway," *J. Clean. Prod.*, vol. 263, p. 121394, 2020.

- [95] S. Xie, Y. Gao, M. Tian, and Z. Jia, "A novel power supply method for railway stations in Western China based on microgrid," *Proc. - 2020 5th Asia Conf. Power Electr. Eng. ACPEE 2020*, pp. 1085–1089, 2020.
- [96] K. S. Alam *et al.*, "Modeling and computation of a solar-piezoelectric hybrid power plant for railway stations," *2012 Int. Conf. Informatics, Electron. Vision, ICIEV 2012*, pp. 155–159, 2012.
- [97] Y. Bulatov, A. Kryukov, and G. Arsentyev, "Application of energy routers in railway power supply systems," *MATEC Web Conf.*, vol. 239, 2018.
- [98] H. A. Gabbar, A. M. Othman, and K. Singh, "Control Architecture of Resilient Interconnected Microgrids (RIMGs) for Railway Infrastructures," *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 594–603, 2017.
- [99] A. V. Kotel'nikov, M. V. Shevlyugin, and A. A. Zhumatova, "Distributed generation of electric energy in traction power-supply systems of railways based on wind-power plants," *Russ. Electr. Eng.*, vol. 88, no. 9, pp. 586–591, 2017.
- [100] M. Brenna, F. Foiadelli, and H. J. Kaleybar, "The Evolution of Railway Power Supply Systems Toward Smart Microgrids: The concept of the energy hub and integration of distributed energy resources," *IEEE Electrif. Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 12–23, 2020.
- [101] J. Arauz-Sarmiento, "Metro de Panamá: Estimación y aprovechamiento alternativo de la energía de frenado regenerativo," *SICutp*, 2021. Recuperado: <http://www.investigadores.utp.ac.pa/proyectos/971>