



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Jesús Araúz

05 TRABAJO FIN DE MASTER

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MASTER

Metro de Panamá: estimación y aprovechamiento alternativo de la energía del frenado regenerativo

TRABAJO FIN DE MÁSTER
PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MÁSTER EN
INGENIERÍA ELÉCTRICA

SEPTIEMBRE 2021

Jesús Araúz

DIRECTORES DEL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER:

Juan de Dios Sanz Bobi
Sergio Martínez González



Agradecimientos institucionales

Agradecimiento especial a aquellas instituciones que colaboraron con la obtención de la información necesaria para elaborar el modelo de simulación:

- Secretaría del Metro de Panamá: Ing. Carlos Cedeño (Dirección de Mantenimiento).
- Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Madrid: Dr. Juan de Dios Sanz Bobi, Ing. Álvaro Calvo Hernández e Ing. Javier Gómez Hernández.
- Facultad de Ingeniería Industrial y Vicerrectoría Académica de la Universidad Tecnológica de Panamá: Dra. Aranzazu Berbey Álvarez, que además brindó una extensa y detallada asesoría técnica-científica a lo largo del desarrollo del TFM y en la realización de las dos publicaciones relacionadas al presente trabajo.
- Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI): Dr. Félix Henríquez, director.

Agradecimiento al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Madrid: Dr. Juan de Dios Sanz Bobi, Ing. Álvaro Calvo Hernández e Ing. Javier Gómez Hernández., por el apoyo con el programa de simulación, el ordenador y el incesable asesoramiento en la utilización del software y conceptualización de la investigación.

Agradecimiento a la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología de Panamá (SENACYT) por el financiamiento parcial para cursar el máster en cuestión.

Resumen

Desde comienzos del siglo pasado, las grandes capitales del mundo han apostado al transporte ferroviario para mejorar el desarrollo logístico del transporte de mercancía, así como de movilización de personas. Los múltiples sistemas ferroviarios (ligero, de alta velocidad, carga, interurbano, etc.) han optimizado el comercio mundial y mejorado la calidad de vida de millones de personas, permitiéndoles desplazarse dentro de regiones y ciudades en poco tiempo respecto a lo posible en transporte particular u otro medio de transporte. Panamá ha contado con sistemas ferroviarios desde antes del periodo republicano y recientemente ha incursionado en el desarrollo de líneas de metro (desde el 2014). Asimismo, se tiene trazada la “Red Maestra” que involucra nueve líneas de metro y dos posibles metro cables, que permitirán interconectar los distritos más habitados de la Provincia de Panamá y Panamá Oeste. Un proyecto de dicha envergadura exige un suministro de energía notable, tal como puede apreciarse en las dos líneas actuales del Metro de Panamá que requieren un alto presupuesto solamente para sufragar el consumo energético. Grandes cantidades de flujo de energía exigen altos estándares de eficiencia y de optimización y, específicamente, en sistemas eléctricos tan dispersos, desequilibrados y variables como éstos. Considerando la naturaleza electromecánica de los trenes, al frenar éste inyecta un flujo de potencia (frenado regenerativo) a la catenaria que, si no es aprovechado por otro tren en aceleración, debe disiparse mediante resistencias (freno reostático) para mantener la calidad de suministro y evitar posibles actuaciones de las protecciones. Desde comienzos del milenio, varios sistemas ferroviarios han aplicado métodos para reducir dicho desperdicio de energía como sincronización de la marcha de los trenes, sistemas de almacenamiento y subestaciones reversibles.

Basado en esto, esta investigación propone evaluar la instalación de sistemas de almacenamiento en la línea 1 y analizar el impacto sobre la reducción de picos de corriente, huecos de tensión y consumo energético. En la literatura, muchos autores han conseguido ahorros energéticos y reducción de potencia hasta de un 50%, además de reducir la banda de tensiones en la catenaria y reducir la dependencia del suministro local. Para dicha evaluación, se realizó un modelo general en Matlab para estimar y corroborar las bondades de baterías y supercapacitores en donde se aprecia una reducción casi total del aporte de energía de la red y una estabilización de la tensión y corriente. Seguidamente, se simuló electrodinámicamente la línea del metro para inspeccionar la variación de los parámetros y cuantificar la energía regenerada para obtener un punto de partida y estudiar el acople de tecnologías de almacenamiento a ésta. Finalmente, con el recurso estimado y la tecnología instalada, se realizó una exploración del aprovechamiento que implica un predimensionamiento de las posibles aplicaciones como son: estaciones de recarga rápida de vehículos eléctricos, plantas generadoras de hidrógeno verde (estaciones electrolizadoras) para diversos usos y suministro auxiliar a consumidores críticos como hospitales, que además se le suministraría oxígeno resultante de la electrólisis.

Los resultados de estudio del desempeño de los dispositivos de almacenamiento, baterías y supercapacitores, sí demuestran la capacidad de reducir fluctuaciones de tensión y picos de potencias, así como reducir el aporte energético por parte. Sin embargo, la simulación electrodinámica establece, ante distintas condiciones de operación, que la Línea 1 del Metro no presenta fluctuaciones de tensión considerables (banda del 1% del nominal), además de presentar una regeneración nominal de 8%, así haciendo poco provechosa la implementación de dispositivos de almacenamiento y evitando su acople al sistema en estudio.

Respecto al aprovechamiento de la energía del frenado regenerativo, se obtuvo una regeneración nominal estimado de 8 MWh/día, suficiente para abastecer 152 vehículos

Metro de Panamá: estimación y aprovechamiento alternativo de la energía del frenado regenerativo

eléctricos, conseguir más de 2000 L de hidrógeno líquido y abastecer del 37% al 320% del consumo eléctrico de edificaciones universitarias de la Universidad Tecnológica de Panamá. Considerando estos resultados, se proyecta la interacción de la red ferroviaria con otras actividades comerciales y/o industriales que representen más beneficio práctico y colabore con los planes nacionales de eficiencia energética y movilidad eléctrica.

Palabras claves: Metro, frenado regenerativo, eficiencia energética, dispositivos de almacenamiento, vehículos eléctricos, hidrógeno.

Códigos UNESCO: el presente trabajo se incluye dentro del marco del código 3300, “Ciencias Tecnológicas”, donde se pueden destacar:

- 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas.
 - 330601 Utilización de la Corriente Continua.
 - 330602 Aplicaciones Eléctricas.
 - 330607 Maquinaria Rotatoria.
- 3322 Tecnología Energética.
 - 332201 Distribución de la Energía.
 - 332205 Fuentes no Convencionales de Energía.
- 3323 Tecnología de Los Ferrocarriles.
 - 332301 Locomotoras.
 - 332302 Equipo Ferroviario.
 - 332303 Servicio de Ferrocarril.
 - 332305 Material Rodante.

Abstract

Since the beginning of the last century, the great capitals of the world have opted for rail transport to improve the logistical development of the transport of goods, as well as the mobilization of people. The multiple rail systems (light, high-speed, freight, intercity, etc.) have optimized world trade and improved the quality of life of millions of people, allowing them to move within regions and cities in a short time compared to what is possible in private transport or other means of transport. Panama has had rail systems since before the Republican period and has recently ventured into the development of metro lines (since 2014). Likewise, the “Master Network” has been drawn up, which involves nine metro lines and two possible metro cables, which will allow the interconnection of the most inhabited districts of the Province of Panama and Panama Oeste. A project of this magnitude requires a remarkable energy supply, as can be seen in the two current lines of the Panama Metro that require a high budget just to cover energy consumption. Large amounts of energy flow demand high standards of efficiency and optimization and, specifically, in electrical systems as dispersed, unbalanced and variable as these. Considering the electromechanical nature of trains, when braking it injects a flow of power (regenerative braking) to the catenary that, if not used by another accelerating train, must be dissipated by means of resistors (rheostatic brake) to maintain supply quality and avoid possible actions of the protections. Since the beginning of the millennium, various railway systems have applied methods to reduce such energy waste, such as train timing, storage systems, and reversible substations.

Based on this, this research proposes to evaluate the installation of storage systems on line 1 and analyze the impact on the reduction of current peaks, voltage dips and energy consumption. In the literature, many authors have achieved energy savings and power reduction of up to 50%, in addition to reducing the voltage band in the catenary and reducing dependence on the local supply. For this evaluation, a general model was carried out in Matlab to estimate and corroborate the benefits of batteries and supercapacitors, where an almost total reduction in the supply of energy from the network and a stabilization of voltage and current can be seen. Next, the metro line was electro-dynamically simulated to inspect the variation of the parameters and quantify the regenerated energy to obtain a starting point and study the coupling of storage technologies to it. Finally, with the estimated resource and the installed technology, an exploration of the use was carried out that implies a pre-dimensioning of the possible applications such as: fast recharging stations for electric vehicles, green hydrogen generating plants (electrolyzing stations) for various uses and supply assist critical consumers such as hospitals, which would also be supplied with oxygen resulting from electrolysis.

The results of the study of the performance of storage devices, batteries and supercapacitors, do demonstrate the ability to reduce voltage fluctuations and power peaks, as well as reduce energy input by part. However, the electro-dynamic simulation establishes, under different operating conditions, that Metro Line 1 does not present considerable voltage fluctuations (band of 1% of the nominal), in addition to presenting a nominal regeneration of 8%. This makes the implementation of storage devices not profitable nor essential and allow to avoid their coupling to the system under study.

Regarding the use of the energy of regenerative braking, an estimated nominal regeneration of 8 MWh / day is obtained, enough to supply 152 electric vehicles, obtain more than 2000 L of liquid hydrogen and supply 37% to 320% of the electricity consumption of universities buildings of the Technological University of Panama. Considering these results, the interaction of the railway network with other commercial or industrial activities represents more practical

benefit and collaborate with the national plans for energy efficiency and electric mobility is projected.

Keywords: Metro, regenerative braking, energy efficiency, storage devices, electric vehicles, hydrogen.

UNESCO Codes: this work is included within the framework of code 3300, "Technological Sciences", where the following can be highlighted:

- 3306 Electrical Engineering and Technology.
 - 330601 Use of Direct Current.
 - 330602 Electrical Applications.
 - 330607 Rotating Machinery.
- 3322 Energy Technology.
 - 332201 Power Distribution.
 - 332205 Unconventional Sources of Energy.
- 3323 Railroad Technology.
 - 332301 Locomotives.
 - 332302 Railway Equipment.
 - 332303 Rail Service.
 - 332305 Rolling Stock.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	iv
Abstract	vi
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
SIGLAS Y SÍMBOLOS	xv
INTRODUCCIÓN	xviii
Objetivo	21
Objetivos específicos	21
Estrategias de Investigación/ Metodología	22
CAPÍTULO 1	23
1.1. Tendencias más desarrolladas	24
1.1.1. Horario de operación	25
1.1.2. Almacenamiento de energía	25
1.1.3. Subestaciones reversibles	27
1.2. Enfoques investigativos contemporáneos	27
1.2.1. Sistemas de almacenamiento híbrido, algoritmos de optimización y control	27
1.2.1.1. Enfocados en técnicas de optimización	31
1.2.2. Integración de la Generación Distribuida	37
1.3. Tabla resumen	43
CAPÍTULO 2	48
2.1. Descripción de la línea 1 del Metro de Panamá	48
2.2. Descripción del simulador dinámico-eléctrico	49
2.3. Aplicación de Sistemas de Almacenamiento: perspectiva general	53
2.3.1. Modelado de dispositivos: baterías y supercapacitores	54
2.3.2. Modelado de dispositivos: desempeño	56
CAPÍTULO 3	62
3.1. Validación mecánica	62
3.2. Validación eléctrica	65
3.3. Cuantificación del recurso	69
3.3.1. Otras condiciones de explotación	71
3.3.2. Circulación en horas valle	73
CAPÍTULO 4	77
4.1. Exploración de formas de aprovechamiento	78

Metro de Panamá: estimación y aprovechamiento alternativo de la energía del frenado regenerativo

4.1.1. Estaciones de carga de vehículos eléctricos.....	79
4.1.2. Producción de Hidrógeno Verde.....	82
4.1.3. Abastecimiento alternativo de energía.....	84
Publicaciones asociadas	86
Conclusiones	87
Líneas futuras	89
Planificación temporal y presupuesto	90
Referencias	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen tabular del Estado del arte.	44
Tabla 2. Características del material rodante aportada por Metro de Panamá. Elaboración propia.....	64
Tabla 3. Ubicación de estaciones de pasajeros y subestaciones de tracción (sombreado). Elaboración propia.	66
Tabla 4. Dimensionamiento de las unidades tractoras de las subestaciones. Elaboración propia.	67
Tabla 5. Análisis estadístico de los consumos (MWh) de las horas pico en enero 2021. Elaboración propia.	69
Tabla 6. Potencias máximas requeridas por parte de las subestaciones para suplir la demanda en hora pico. Elaboración propia.....	73
Tabla 7. Potencias máximas requeridas por parte de las subestaciones para suplir la demanda en hora valle. Elaboración propia.....	76
Tabla 8. Potencia regenerativa promediada a 1 hora en cada tipo de marcha con cada grado de explotación evaluado. Elaboración propia.	77
Tabla 9. Razón de Regeneración en cada tipo de marcha con cada grado de explotación evaluado. Elaboración propia.....	78
Tabla 10. Cantidad de ciclos de circulación y días operativas para cubrir la demanda horaria por marcha y demanda diaria. Elaboración propia.....	78
Tabla 11. Aprovechamiento diario por subestación de acuerdo con la repartición de la energía del frenado: Vehículos eléctricos (cantidad de automóviles o de autobuses suministrables)..	82
Tabla 12. Aprovechamiento diario por subestación de acuerdo con la repartición de la energía del frenado: Producción de hidrógeno verde.....	84
Tabla 13. Distribución aproximada de duración de actividades a lo largo del TFM.	91
Tabla 14. Estimación del presupuesto medio de la elaboración el TFM.	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Red Maestra del Sistema Ferroviario de Panamá. Fuente: Metro de Panamá.....	xix
Figura 2. Topología del sistema híbrido. Fuente: Liu et al., [46].....	28
Figura 3. Topología del sistema híbrido de almacenamiento estudiado. Fuente: Liu et al., [47]	29
Figura 4. Resultados del análisis de sensibilidad. Fuente: Liu et al., [47]	30
Figura 5. Flujos de potencia del tren, de la batería y del supercapacitor, y potencia a través de la red ante la intervención del control cooperativo. Fuente: Lee et al., [80].....	30
Figura 6. SOC mínimos a los distintos tiempos de operación. Fuente: Jefimowski et al., [81]	32
Figura 7. 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. c) restricción de volumen máximo = 0.25m ³ . Fuente: Wu et al., [87]	34
Figura 8. Resultados de la potencia suministrada por la red de la optimización con un almacenador de energía. Fuente: Lamedica et al., [91].....	35
Figura 9. Circuito representativo del "Supercapacitor Based Active Stabilizer". Fuente: Naseri et al., [95]	35
Figura 10. Sistema de control de dos modos de estrategia de control predictivo orientadas al cálculo de la capacitancia y a la tensión en el bus. Fuente: Naseri et al., [95].....	36
Figura 11. Esquema de control sugerido por los autores. Fuente: Krim et al., [44]	37
Figura 12. Diagrama de topología propuesta. Fuente: Pan et al., [103].....	38
Figura 13. Esquema de conexión propuesta por Zhong et al., [107]	38
Figura 14. Estructura del sistema de potencia de una estación ferroviaria basada en micro redes. Fuente: Xie et al., [108].....	39
Figura 15. Utilización de un "energy router" en un sistema de potencia. Fuente: Bulatov et al., [110].	40
Figura 16. Arquitectura de la micro red. Fuente: Gabbar et al., [111].....	41
Figura 17. Catenaria con subestaciones de tracción convencionales y eólicas. Fuente: Kotel'nikov et al., [112]	42
Figura 18. Resumen de implementación de micro redes. Fuente: Brenna et al., [113]	43
Figura 19. Esquema de la línea 1 del Metro de Panamá (Fase 1 + Fase 2) (Berbey-Alvarez, 2013).....	49

Figura 20. Interfaz para la introducción de parámetros en un tren de pasajeros. Captura de pantalla	50
Figura 21. Ejemplo de curvas de tracción de un tren. Fuente: Metro de Madrid [27].	51
Figura 22. Ejemplo de curvas de frenado de un tren. Fuente: Metro de Madrid [27].	52
Figura 23. Malla de circulación genérica.	52
Figura 24. Ejemplo de la interfaz del simulador para definir una catenaria rígida alimentada en 1500 Vdc. Fuente: Martín et al., [27].	53
Figura 25. Resultados del simulador: variación de la tensión máxima y mínima a lo largo de la catenaria.	54
Figura 26. Modelo de una celda de batería de ion Litio. Fuente: Locorotondo et al.,[139].	55
Figura 27. izq a der, arriba hacia abajo: Modelo polinómico, sinusoidal, exponencial y Gauseano de la tensión de circuito abierto. Fuente: Zhang et al., [133]	56
Figura 28. Modelo representativo de una celda de supercapacitor. Fuente: Lahyani et al., [142].	56
Figura 29. arriba: Consigna de velocidad vs Velocidad real vs error. Abajo: Consigna de corrientes del inversor vs corrientes reales. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]	57
Figura 30. arriba: Energía entregada por la red. Abajo: Energía consumida por el vehículo. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]	58
Figura 31. Arriba: tensión de la red. Abajo: Tensión del vehículo. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]	58
Figura 32. arriba: Energía entregada por la red. Abajo: Energía entregada por la batería. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]	59
Figura 33. Batería conectada. Arriba: tensión de la red. Abajo: Tensión del vehículo. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]	59
Figura 34. Energía entregada por la red. Abajo: Energía entregada por la batería. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]	60
Figura 35. Supercapacitor conectado. Arriba: tensión de la red. Abajo: Tensión del vehículo. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]	60
Figura 36. Arriba hacia abajo: Energía entregada por la red, energía entregada por la batería y energía entregada por el supercapacitor. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]	61
Figura 37. Variación de la velocidad objetivo por punto kilométrico. Elaboración propia.	62
Figura 38. Variación de la pendiente por punto kilométrico. Elaboración propia.	63

Figura 39. Variación de la curvatura absoluta por punto kilométrico. Elaboración propia.	63
Figura 40. Malla de circulación resultante. Elaboración propia.	65
Figura 41. Distribución espacial de la velocidad máxima (roja) y la evolución de la velocidad real (azul). Elaboración propia.	65
Figura 42. Variación de la tensión máxima y mínima en el trayecto de ida. Elaboración propia.	67
Figura 43. Variación de la tensión máxima y mínima en el trayecto de vuelta. Elaboración propia.	68
Figura 44. Potencia máxima y mínima en el trayecto de ida. Elaboración propia.	68
Figura 45. Potencia máxima y mínima en el trayecto de vuelta. Elaboración propia.	68
Figura 46. Promedio hora a hora de la Línea 1 en enero 2021. Elaboración propia.	69
Figura 47. Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes. Elaboración propia.	70
Figura 48. Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones. Elaboración propia. ..	70
Figura 49. Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes a 0.4 m/s ² en hora pico. Elaboración propia.	71
Figura 50. Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones a 0.4 m/s ² en hora pico. Elaboración propia.	72
Figura 51. Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones a 0.7 m/s ² en hora pico. Elaboración propia.	72
Figura 52. Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes a 0.7 m/s ² en hora pico. Elaboración propia.	73
Figura 53. Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes a 1.0 m/s ² en hora valle. Elaboración propia.	74
Figura 54. Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones a 1.0 m/s ² en hora valle. Elaboración propia.	74
Figura 55. Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes a 0.4 m/s ² en hora valle. Elaboración propia.	75
Figura 56. Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones a 0.4 m/s ² en hora valle. Elaboración propia.	75
Figura 57. Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes a 0.7 m/s ² en hora valle. Elaboración propia.	76
Figura 58. Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones a 0.7 m/s ² en hora valle. Elaboración propia.	76

Lista de Figuras

Figura 59. Esquema general de acople de una catenaria en corriente continua con una microrred [113].	79
Figura 60. Esquemas representativos de estaciones de carga de vehículos eléctricos. Fuente: Aldhanhani et al., [151].....	80
Figura 61. Esquema general de integración de un sistema híbrido de almacenamiento de energía con hidrógeno, energías renovables y conectado a la red. Fuente: Zhang [157].	83
Figura 62. Modelo sugerido de sistema híbrido de alimentación. Fuente: Hun et al., [161] ...	85

SIGLAS Y SÍMBOLOS

Representación	Significado	Unidades
PENCYT	Plan Estratégico Nacional de Ciencia y Tecnología	-
ODS	Objetivos del Desarrollo Sostenible	-
IoT	<i>“Internet of Things”</i> - Internet de las Cosas	-
Ni-Cd	Níquel-Cadmio (Baterías)	-
Ni-MH	Níquel-Metal Hidruro (Baterías)	-
NaS	Sulfuro de Sodia (Baterías)	-
Li-ion	Ion de Litio (Baterías)	-
Lead-Acid	Ácido de Plomo (Baterías)	-
HES	<i>“Hybrid Energy System”</i> - Sistema híbrido de Almacenamiento	-
SES	<i>“Supercapacitor Energy System”</i> -Sistema de almacenamiento con capacitores	-
HESOP	<i>“Harmonic and Energy Saving Optimizer”</i> - Optimizador de armónicos y ahorro de energía	-

Representación	Significado	Unidades
PWM	<i>“Pulse Width Modulation”</i> -Modulación de ancho de pulso	-
IGBT	<i>“Isolated Gate Bipolar Transistor”</i> -Transistor bipolar de compuerta aislada	-
SOC	<i>“State of Charge”</i> -Estado de Carga	-
OCV/VOC	<i>“Open Circuit Voltage”</i> – Voltaje de Circuito Abierto	-
$F_{Davis}(v)$	Fuerza de Davis: Resistencia al recorrido	N (Newtons)
v	Velocidad	m/s
A, B, C	Coefficientes de Davis	N, Ns/m, Ns ² / m ²
$\mu(v)$	Adherencia dinámica	adimensional
x, y, x', y', z, z'	Coefficientes de adherencia	Adimensionales los cuatro primeros y s/m los dos últimos
a_i, b_i, c_i	Coefficientes de regresiones para estimación de VOC	-
R1	Resistencia en la celda principal del modelo del supercapacitor y resistencia del modelo carga/descarga de una batería	Ω (Ohmios)
Co	Capacitancia estática en la celda principal del modelo del supercapacitor	F (Faradios)

Metro de Panamá: estimación y aprovechamiento alternativo de la energía del frenado regenerativo

Representación	Significado	Unidades
Cv	Capacitancia dinámica con la tensión en la celda principal del modelo del supercapacitor	F (Faradios)
R2	Resistencia en la celda lenta del modelo del supercapacitor	Ω (Ohmios)
C2	Capacitancia en la celda lenta del modelo del supercapacitor	F (Faradios)
Rint	Resistencia interna en el modelo de la batería	Ω (Ohmios)
C1	Capacitancia del modelo carga/descarga de una batería	F (Faradios)

INTRODUCCIÓN

La República de Panamá es una nación situada en América Central con 75 475 km² y 4 170 607 habitantes según el censo del 2019, la cual es reconocida a nivel mundial por ser un “hub” del comercio logístico marítimo y aeroportuario. Pese a su buen estado económico, respecto a las otras naciones de la región, el transporte urbano siempre ha sido un tema con poco desarrollo a lo largo de la historia republicana, en el cual los ciudadanos tenían que recurrir al transporte particular o a empresas de transporte privadas. Esta situación se ha visto reflejada en los siguientes informes de investigación: Berbey-Alvarez et al., [1]–[3] del Proyecto de I+D “*Metodologías e índices de desempeño para sistemas de transporte ferroviario*”. Adicionalmente Berbey-Alvarez et al., [4][5] ha realizado estudios publicados sobre las externalidades socio económicas y ambientales de los efectos de la línea 1 del metro sobre la ciudad de Panamá. También en Guevara-Cedeño et al., [6] se realizó una revisión de la movilidad eléctrica en la Ciudad de Panamá. Todos estos estudios y publicaciones científicas se han realizado en el grupo de investigación “*Panama Railway engineering research group*” [7]

Debido a una carencia de un buen sistema de transporte urbano, en el 2014 se logra inaugurar la primera línea del Metro de Panamá, siendo la de una serie de líneas ferroviarias que se pretenden desarrollar en el país, en el 2019 la segunda línea y en el 2021 los estudios para iniciar la construcción de la tercera línea, que corresponde a una tecnología ferroviario no convencional de tipo monorriel. Dicha realidad, posiciona a este sistema ferroviario tipo metro en América Central.

La Secretaría del Metro de Panamá, empresa gestora del sistema de transporte ferroviario metropolitano, en coordinación con el Gobierno, ha realizado estudios de factibilidad para llevar a cabo el “Plan Maestro”. Éste contempla la culminación de nueve líneas de metro y dos posibles metro cables, como se representa en la Figura 1, para conectar al área metropolitana de la Provincia de Panamá, sus afueras; y las cercanías de la Provincia de Panamá Oeste donde una considerable parte de la población se moviliza diariamente a la capital.



Figura 1. Red Maestra del Sistema Ferroviario de Panamá. Fuente: Metro de Panamá.

Aunque actualmente solo estén operando plenamente dos de las nueve líneas previstas por desarrollar, la inclusión de un sistema que demanda grandes cantidades de energía, en un país que todos los años incrementa su consumo energético y su demanda máxima diaria, es motivo suficiente para consultar la situación energética de país debido a que la integración de un sistema de transporte masivo, cuya labor tenderá a crecer y a abarcar más zonas de la ciudad, sin considerar las iniciativas estatales y de empresa privada en los sectores energéticos y logísticos nacional, podría proporcionar problemas en la calidad y fiabilidad de la energía eléctrica suministrada en todo el país, especialmente en las áreas circundantes a las inmediaciones del ferrocarril [8].

Atendiendo la naturaleza demográfica nacional comentada y los pronósticos de aumento de consumo de energía del sistema ferroviario [9], el consumo intrínseco de la operación del metro no se reducirá, aunque sí puede variar el aporte energético de las distintas fuentes energéticas disponibles. Esta variación de aporte puede lograrse si el Metro produjese su propia energía, si una fuente externa a la red de media tensión alimentase a las instalaciones o si se mejora la eficiencia global del sistema. Cabe señalar que la Red de Metro de Panamá se alimenta con líneas de uso exclusivo. Éstas son totalmente ajenas de las líneas de distribución emplazadas para el suministro de energía eléctrica a los clientes residenciales y comerciales. Además, el procedimiento de cobro de la energía es distinto con esta entidad respecto a los demás clientes del mercado.

Acorde con los planes nacionales, tales como el “Plan Estratégico Nacional de Ciencia y Tecnología (PENCIYT)” [10] y el “Plan Energético Nacional” [8], Panamá está en miras de una transición energética que implica innovación necesaria en la generación y consumo de energía eléctrica. Además de diversificar la matriz energética, mediante la integración de energías renovables y ganar independencia de unas pocas tecnologías de generación, se prevé una

incursión tecnológica referente a ciudades eco-inteligentes que participen activa y pasivamente en la atenuación de los efectos del cambio climático y en la recuperación de las condiciones ambientales; a la “Cuarta Revolución Industrial” que acopla la inteligencia artificial a las actividades comerciales, manufactureras, investigativas y generales y a los compromisos con los “Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)”.

El desarrollo estratégico de la eficiencia energética ya comenzó en varios entornos de la industria panameña y, de acuerdo con el ferrocarril, tiene un gran potencial de incursión en los sistemas de transporte masivo. Actualmente, la empresa suministradora del material rodante de la línea 2 del Metro, Alstom, ha instalado equipos en algunas estaciones que permiten aprovechar más eficientemente la energía [11], sin embargo la línea 1 y todas las demás líneas no tienen proyectado la implementación de algún sistema para el manejo eficiente de la energía fluyente del metro; inclusive en la línea 2, que ya se ha mejorado, se puede buscar otro tipo de soluciones o enfoques que aporten en mayor escala al mejoramiento continuo y a la reducción de los gastos de operación [12]. Consecuentemente, hay inmensas oportunidades de incursionar en la modernización y en el estudio de la integración del sistema de transporte urbano ferroviario como objeto del cambio y desarrollo sostenible.

Objetivo

Evaluar el efecto de la implementación de estrategias de aprovechamiento de la energía del frenado regenerativo de los trenes de la línea 1 del Metro de Panamá.

Objetivos específicos

1. Investigar el efecto del flujo de la energía del frenado regenerativo en el sistema de electrificación ferroviario de la línea 1.
2. Determinar las bondades de los distintos sistemas existentes de aprovechamiento de la energía del frenado.
3. Conocer las nuevas tendencias investigativas relacionadas a la eficiencia energética en el ámbito ferroviario.
4. Simular dinámica y eléctricamente la línea 1 del Metro de Panamá.
5. Estimar las mejoras técnicas y energéticas de la aplicación de sistemas de recuperación del frenado en el Metro de Panamá.
6. Aportar recomendaciones finales al Metro de Panamá para mejorar la integridad de sus sistemas.
7. Establecer un inicio para futuras investigaciones relacionadas al ámbito ferroviario.

Estrategias de Investigación/Metodología

Fases	Materiales y programas	Actividades
Fase 1: Realización del 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) y el archivo digital de la universidad. b) Análisis Bibliométrico. c) Compilación de avances logrados y nuevas tendencias.
Fase 2: Simulación dinámica y eléctrica del Metro de Panamá	<ul style="list-style-type: none"> • Datos técnicos aportados por el Metro de Panamá e investigadores externos • AutoCad • Microsoft Excel • Matlab 	<ul style="list-style-type: none"> a) Elaboración de la circulación de los trenes del Metro de Panamá mediante la consideración de los tramos de las líneas las características que los definen (puntos kilométricos, curvatura, velocidad, etc). b) Introducción de las características mecánicas de los trenes al programa de simulación. c) Introducción de las características eléctricas del sistema de electrificación al programa de simulación. d) Simulación dinámica y eléctrica.
Fase 3: Modos de aprovechamiento del frenado regenerativo en el Metro de Panamá	<ul style="list-style-type: none"> • Artículos científicos • Fichas técnicas • Simulink • Matlab 	<ul style="list-style-type: none"> a) Estimación inicial del efecto de dispositivos de almacenamiento en el sistema de electrificación (Simulink). b) Simulación eléctrica. c) Exploración para aprovechamiento del recurso

CAPÍTULO 1

Estado del arte

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 [13]. 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 [14]. 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 [15];
- la interoperabilidad a través del Internet de las Cosas (IoT) y Redes Inteligentes (Smart Grid) [16][17][18];
- el avance de la electrónica de potencia y su rol decisivo en el mejoramiento de la operación y optimización de sistemas [19][20];
- y 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 [21]–[27]

En Serrano-jiménez *et al.*, [15] 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 Fraga-lamas *et al.*, [17] 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 Martin *et al.*, [27] 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 [28], Sistema Inverfer [29], Merlin [30], E-Lobster [31], Ferrosmartgrid, Osiris [32] y Ferrolinera [33]. 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); y la Ferrolinera de Adif que 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 [34][35]. 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 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, y modelado y optimización de sistemas híbridos de almacenamiento.

1.1. Tendencias más desarrolladas

En esta sección se desea resaltar 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.

1.1.1. 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 [26]. De acuerdo con el método implementado, se puede obtener ahorros energéticos del 4% [36] al 38.6% [37].

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 Khodaparastan *et al.*, [26] se presenta una recopilación de diversos métodos de optimización orientados al tiempo en las estaciones: algoritmo genético [38], modelo dinámico de programación [39], modelos heurísticos [40], optimización del consumo en subestaciones [37] y mucho más.

1.1.2. 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 vasta, 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 [41][42], operación sin catenaria [43], minimizar fluctuaciones de tensión [44][45] y reducción de picos de consumo [22][46].

Los dispositivos más ampliamente usados para sistemas de almacenamiento son las baterías, los supercapacitores y los volantes de inercia. De acuerdo con Liu *et al.*, [47], Popescu *et al.*, [14], Zhang *et al.*, [24], Liu *et al.*, [23], 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 Abdelhedi *et al.*, [48] 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 Ghaviha *et al.*, [49], Chatzivasilieadi *et al.*, [50], Chen *et al.*, [51] se caracterizan los dispositivos previamente mencionados junto a variantes de éstos de acuerdo con la densidad de potencia y energía, eficiencia de ciclo, autodescarga diaria, ciclos de vida y tiempo promedio de almacenamiento. En Liu *et al.*, [23] se presentan 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 [26]. La eficiencia de estos sistemas depende fuertemente de las características del vehículo en el cual está instalados. Según Arboleya *et al.*, [52] 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 [14]. En los ferrocarriles de Bruselas y Madrid se han obtenido ahorros de energía desde 18.6% hasta 35.8% [53][54]. En Khodaparastan *et al.*, [26] 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 [55].

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% [56] 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 [57].

Por parte de la empresa Alstom hay supercapacitores a bordo STEEM instalados en el tranvía de París [57] en donde se consiguió reducción del consumo energético del 10% al 18% y operación sin catenaria en tramos entre estaciones de 300 m [58], baterías a bordo de Ni-MH Salft en el tranvía de Niza [57] y volantes de inercia en el techo del tranvía de Rotterdam [59][60] 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) [57], y sistemas híbridos de supercapacitores con baterías Ni-MH como el Sitras HES instalado en el tren ligero de Lisboa [61].

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% [26]. 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 [62]; los supercapacitores “Capapost” de Meiden, instalados en Hong Kong [63]; la solución de supercapacitores del proveedor Envitech Energy (parte del grupo ABB) “Envistore”, instalada en el metro de Varsovia Philadelphia [63]; 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 [64]; 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 [26][63][65].

1.1.3. 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 [66]. 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 [49].

En el mercado existen varios modelos como:

- Subestaciones reversibles con un solo convertidor rectificador/inversor (HESOP avanzado por Alstom) [67].
- Subestaciones reversibles con rectificadores basados en tiristores e inversores en PWM (Harmonic and Energy Saving Optimizer, “HESOP” por Alstom) [68].
- Subestaciones reversibles con rectificadores reversibles basados en tiristores controlados (Enviline TCR por ABB) [69].
- Inversores basados en IGBT conectados en antiparalelo con la subestación rectificadora de diodos (Enviline Energy Recuperation System, ERS de ABB)[14].
- Subestaciones reversibles con rectificadores de diodos e inversores PWM (Sitras por Siemens e INGEBER por INGETEAM Traction Company)[69].
- Subestaciones reversibles con rectificadores de diodos e inversores basados en tiristores controlados (Sitras TCI por Siemens) [70].

Ajeno al tipo de configuración implementada, estos sistemas [14] [67], [68], [69]. [70]...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 [71][72].

1.2. 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 Liu *et al.*, [46] 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 [73]; 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 [74] y un sistema híbrido batería con supercapacitor en donde éstos se alternan en los procesos de absorción y liberación de energía [75], pero ninguno se acopló a los requerimientos de cambios repentinos de energía. Por lo tanto, se propone 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 2 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.

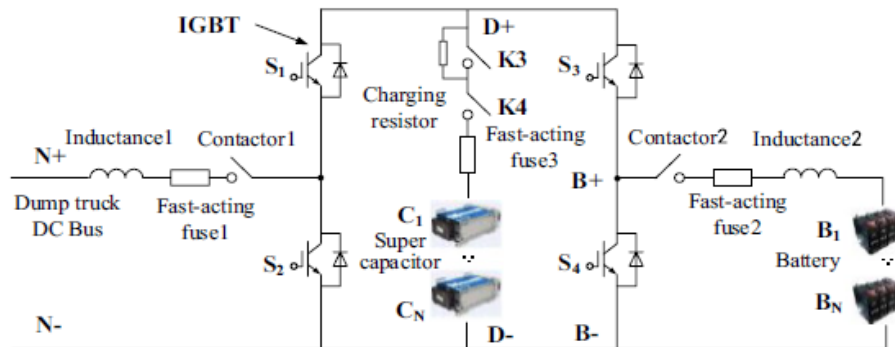


Figura 2. Topología del sistema híbrido. Fuente: Liu et al., [46]

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%.

Liu *et al.*, [47] 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; éste es ampliamente usado para determinar la influencia de parámetros sobre una función no lineal dada [76].

Este artículo 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. Yin *et al.*, [77] 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; Zhao *et al.*, [78] 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; Cao *et al.*, [79] 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 3 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.

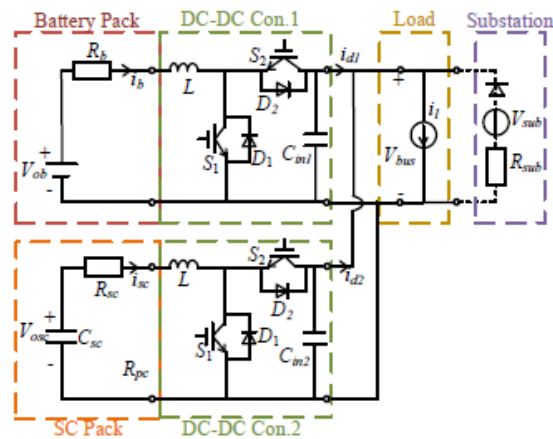


Figura 3. Topología del sistema híbrido de almacenamiento estudiado. Fuente: Liu et al., [47]

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 4 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 despreciar 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.

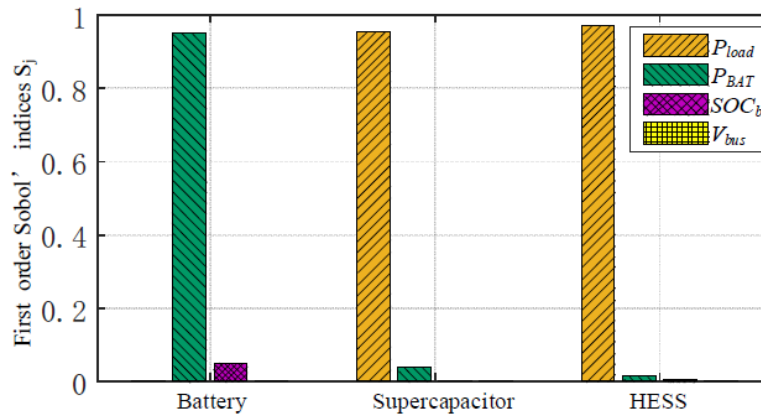


Figura 4. Resultados del análisis de sensibilidad. Fuente: Liu et al., [47]

Lee *et al.*, [80] 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 5 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.

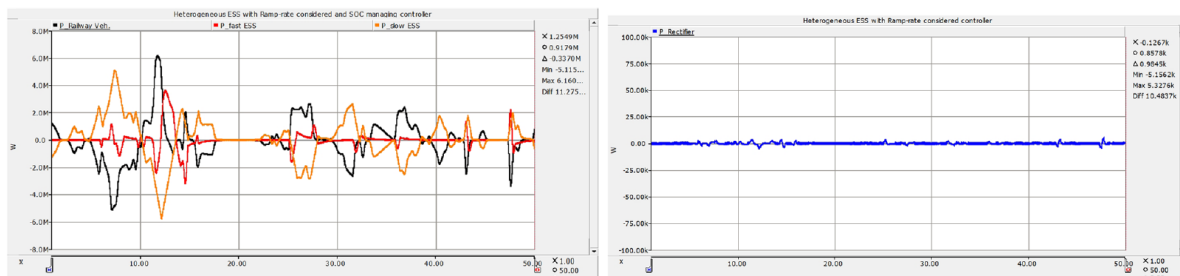


Figura 5. Flujos de potencia del tren, de la batería y del supercapacitor, y potencia a través de la red ante la intervención del control cooperativo. Fuente: Lee et al., [80]

1.2.1.1. Enfocados en técnicas de optimización

En Jefimowski *et al.*, [81] 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 [82] y en el Metro de Washington, D.C que se logra duplicar el ahorro energético al colocar los supercapacitores entre dos estaciones [83].

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% [84]. Para determinar el SOC mínimo primero se determinan las pérdidas del supercapacitor [85] 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 6) 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.

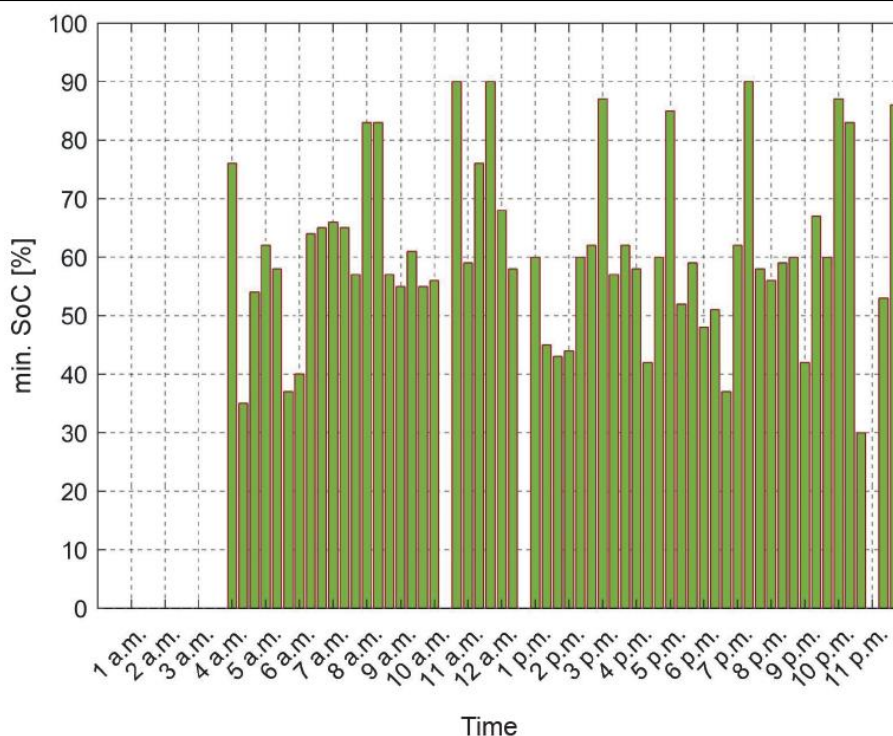


Figura 6. SOC mínimos a los distintos tiempos de operación. Fuente: Jefimowski et al., [81]

En Dutta *et al.*, [35] 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 [86] 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 [86].

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 Wu *et al.*, [87] 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 [88], así como se ha estudiado el dimensionamiento de dispositivos de almacenamiento de energía estacionarios y abordó sin restricciones de volumen ni peso, mediante simulaciones [89] y algoritmo genético para minimizar la energía a través de la catenaria y la inversión inicial [90], 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 7). 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.

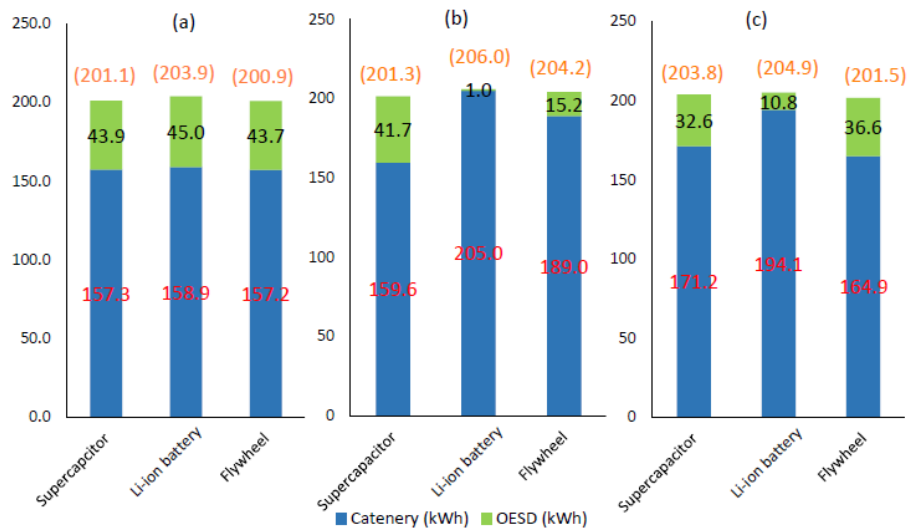


Figura 7. Resultado de la optimización del mínimo consumo de energía por parte de la catenaria. a) sin restricciones. b) restricción de costo máximo de \$10000.00. c) restricción de volumen máximo = 0.25m³. Fuente: Wu et al., [87]

Lamedica *et al.*, [91] 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: Yoshida *et al.*, [92] optimiza el tamaño del dispositivo de almacenamiento minimizando su costo, sin encontrar la mejor ubicación; Calderaro *et al.*, [93] determina la mejor posición y tamaño para un supercapacitor, estableciendo como objetivo a minimizar la energía demandada de la red; Graber *et al.*, [94] 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 [91].

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 8) con un retorno de 2 años, 9 meses con un costo de 0.015 euros/kWh.

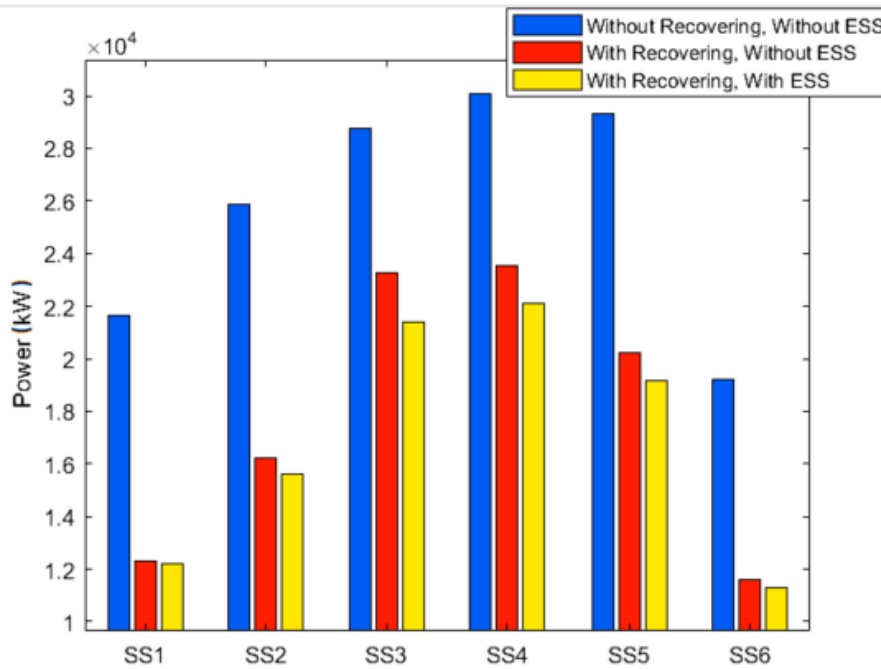


Figura 8. Resultados de la potencia suministrada por la red de la optimización con un almacenador de energía. Fuente: Lamedica et al., [91]

En Naseri *et al.*, [95] 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. Xia *et al.*, [96] 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; Rufer *et al.*, [97] resuelve los problemas de fluctuaciones de tensión de un estación de tracción débil instalando una estación de supercapacitores al final de la línea; Iannuzzi *et al.*, [98] 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 9) 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.

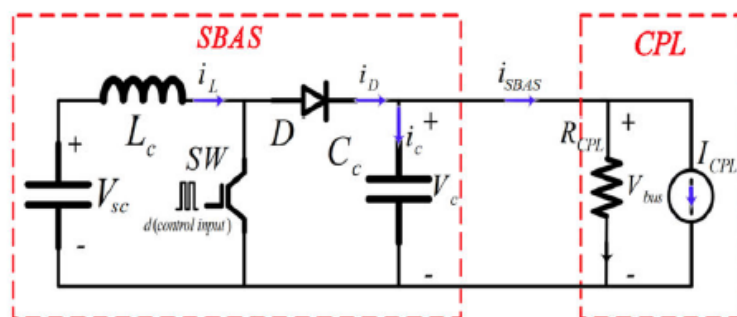


Figura 9. Circuito representativo del "Supercapacitor Based Active Stabilizer". Fuente: Naseri et al., [95]

El primer algoritmo (Figura 10) 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 la tesis doctoral de X. Zhang [99], en 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.

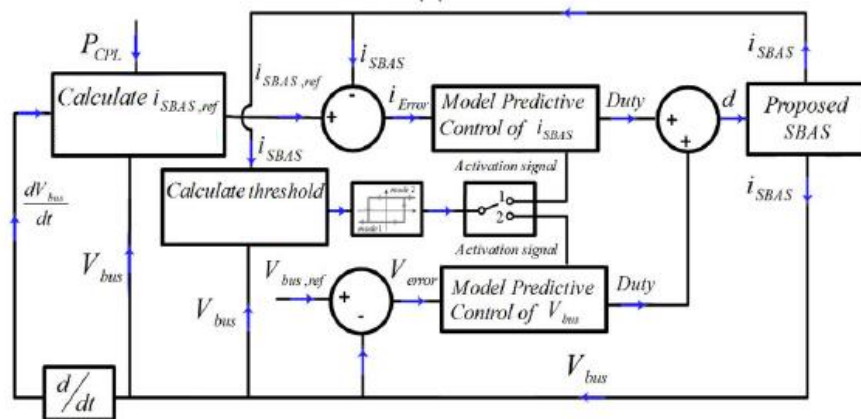


Figura 10. Sistema de control de dos modos de estrategia de control predictivo orientadas al cálculo de la capacitancia y a la tensión en el bus. Fuente: Naseri et al., [95]

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.

Krim *et al.*, [44] 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 11). 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 Almaksour *et al.*, [100] se logró recuperar el 22.5% de la potencia de frenado, limitado por las características del control y por la estrategia de frenado del tren.

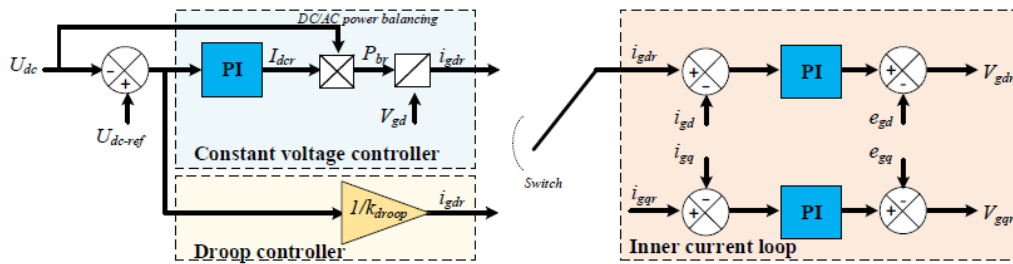


Figura 11. Esquema de control sugerido por los autores. Fuente: Krim et al., [44]

Debido a dicho límite, se propone la segunda metodología a tensión constante, que usualmente se usa en micro-grid en continua [101] y en generación distribuida con energía renovable [102]. 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.

1.2.2. Integración de la Generación Distribuida

Pan *et al.*, [103] 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 almacenarlos 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 objetiva.

Se toma de referencia la previa utilización de la generación distribuida para la regulación de tensión en líneas de distribución de Zad *et al.*, [104] en donde también se utiliza análisis de sensibilidad con algoritmos de optimización por enjambre partículas, pero sin considerar las pérdidas; y Farivar *et al.*, [105] en 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 autores, se propone una estrategia multi-agente (Figura 12) 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.

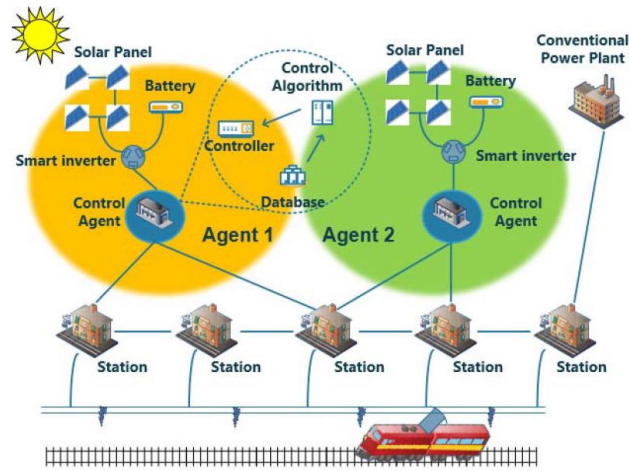


Figura 12. Diagrama de topología propuesta. Fuente: Pan et al., [103]

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.

Li *et al.*, [106] y Zhong *et al.*, [107] estudiaron la óptima planeación de generación fotovoltaica a lo largo de una línea de alta velocidad. Zhong *et al.*, [107] 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 13, 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.

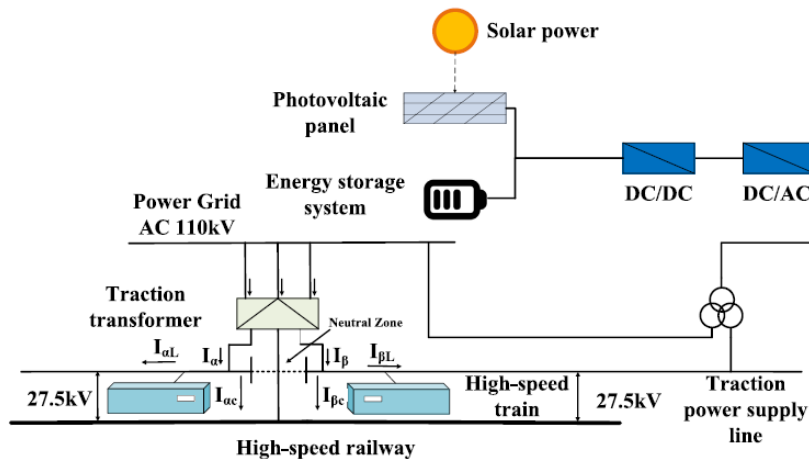


Figura 13. Esquema de conexión propuesta por Zhong et al., [107].

Li *et al.*, [106] parte del modelo general propuesto por Zhong *et al.*, [107], 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.

Xie *et al.*, [108] 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 algunas autores que también han propuesto implementar micro redes para el abastecimiento de la energía en estaciones, [109], 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 14, 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.

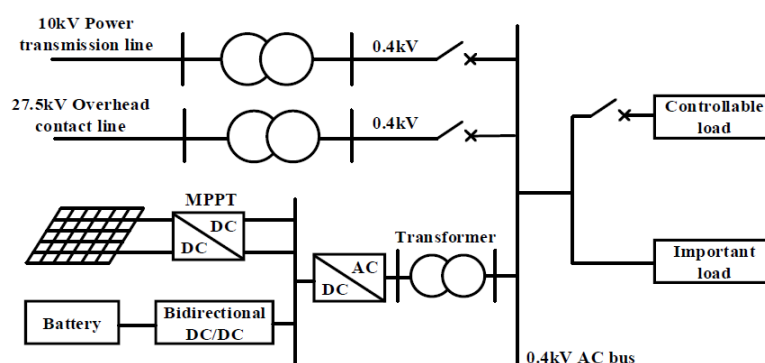


Figura 14. Estructura del sistema de potencia de una estación ferroviaria basada en micro redes. Fuente: Xie et al., [108]

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 suple 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.

Bulatov *et al.*, [110] examina la aplicación de “*energy routers*” para el acople de la generación renovable al suministro de una línea en corriente alterna. La Figura 15 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.

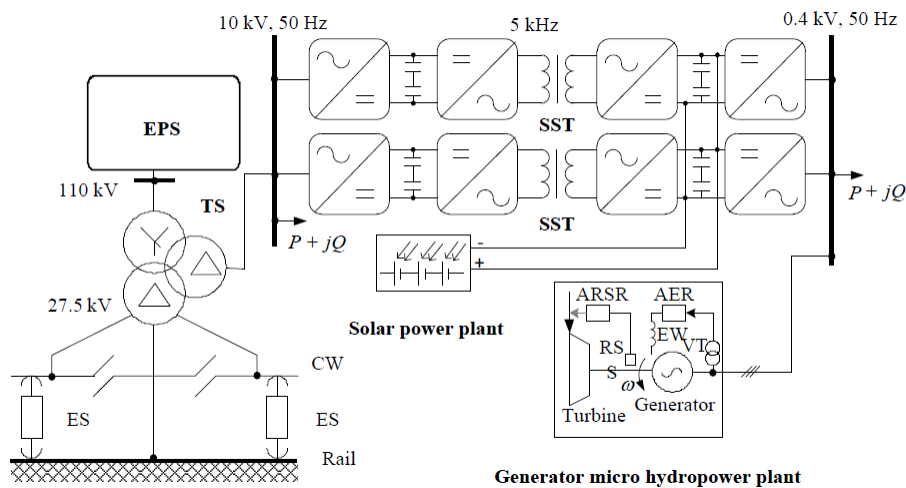


Figura 15. Utilización de un "energy router" en un sistema de potencia. Fuente: Bulatov et al., [110].

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%.

Gabbar *et al.*, [111] 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 16 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.

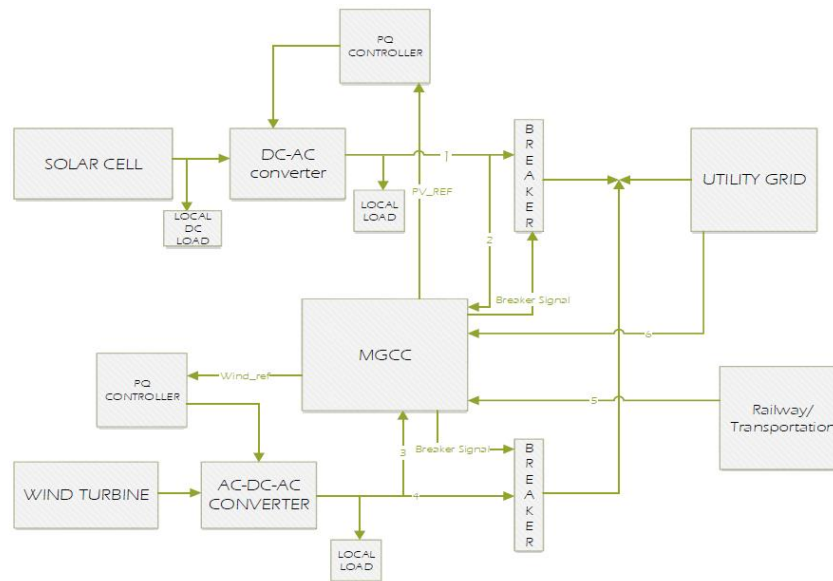


Figura 16. Arquitectura de la micro red. Fuente: Gabbar et al., [111]

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, también 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 años 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.

Kotel'nikov *et al.*, [112] 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 17 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.

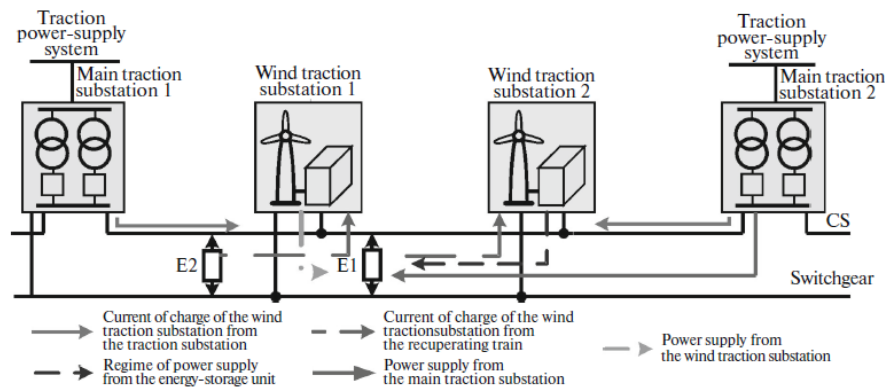


Figura 17. Catenaria con subestaciones de tracción convencionales y eólicas. Fuente: Kotelnikov et al., [112]

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.

Brenna *et al.*, [113] 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

Metro de Panamá: estimación y aprovechamiento alternativo de la energía del frenado regenerativo

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 en 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 18 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	RPFC	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 18. Resumen de implementación de micro redes. Fuente: Brenna et al., [113]

1.3. Tabla resumen

La siguiente tabla 1 corresponde a un resumen tabular del Estado de Arte de este TFM y una clasificación de acuerdo con el tipo de técnica, algoritmo, método, enfoque que ha sido desarrollado en el documento citado. Esta tabla 1 es una tabla de naturaleza comparativa, que permite tener una síntesis del estado del arte de este TFM.

Tabla 1. Resumen tabular del Estado del arte.

Autor	Año	1	2	3	4	5	6	7	Observaciones
IEA [13]	2017	x							Railway Handbook
Popescu <i>et al.</i> , [14]	2019		x						Eficiencia energética
Serrano <i>et al.</i> , [15]	2017		x				x		Suministro eléctrico
Train <i>et al.</i> , [16]	2017		x						Sensores
Fraga-lamas <i>et al.</i> , [17]	2017		x						Internet de las cosas
Ballesteros <i>et al.</i> , [18]	2020				x	x			TFM: Smart Grid
Villalba <i>et al.</i> , [19]	2019		x				x		Modelos de optimización
Hayashiya <i>et al.</i> , [20]	2020		x						Electrónica de potencia
Mousavi <i>et al.</i> , [21]	2017		x		x	x			Volantes de inercia
Berrueta <i>et al.</i> , [22]	2019		x		x				Supercapacitores
Liu <i>et al.</i> , [23]	2020		x		x				Definiciones y datos característicos
Zhang <i>et al.</i> , [24]	2020		x		x				Definiciones y datos característicos
Lu <i>et al.</i> , [25]	2017			x	x				Supercapacitor, comparaciones y topologías
Khodaparastan <i>et al.</i> , [26]	2019		x		x	x			Soluciones a bordo y estacionarias
Martin <i>et al.</i> , [27]	2020				x	x			TFM: Caso de estudio
Dutta <i>et al.</i> , [35]	2020			x	x		x		Tipos de híbridos según recurso
Albrecht [36]	2004			x			x		Itinerario de trenes
Tian <i>et al.</i> , [37]	2017			x			x		Itinerario de trenes
Nasri <i>et al.</i> , [38]	2010			x			x		Itinerario de trenes
Van Mierlo <i>et al.</i> , [39]	2004			x					Simulación de vehículos
Fournier <i>et al.</i> , [40]	2015			x			x		Algoritmo heurístico
Brenna <i>et al.</i> , [41]	2020		x						Ferrocarril, VE's y marina
Minaminosono <i>et al.</i> , [42]	2019		x						Usos del frenado
Yang <i>et al.</i> , [43]	2020			x	x		x		Operación sin catenaria y dimensionamiento
Krim <i>et al.</i> , [44]	2020			x			x		Técnicas de control
Cui <i>et al.</i> , [45]	2019			x	x				Supercapacitor
Liu <i>et al.</i> , [46]	2020			x	x				Sistema híbrido
Liu <i>et al.</i> , [47]	2019			x	x		x		Sistema híbrido: Cálculo de pérdidas

Metro de Panamá: estimación y aprovechamiento alternativo de la energía del frenado regenerativo

Autor	Año	1	2	3	4	5	6	7	Observaciones
Abdelhedi <i>et al.</i> , [48]	2017			x	x		x		Sistema híbrido optimizado
Ghaviha <i>et al.</i> , [49]	2017		x		x				Definiciones y datos característicos
Chatzivasileiadi <i>et al.</i> , [50]	2013			x	x				Dispositivos de almacenamientos en edificios
Chen <i>et al.</i> , [51]	2009		x		x				Soluciones estacionarias
Arboleya <i>et al.</i> , [52]	2016		x		x				Soluciones a bordo
Barrero <i>et al.</i> , [53]	2008		x		x				Caso de estudio: a bordo
Barrero <i>et al.</i> , [54]	2010			x	x				Caso de estudio: a bordo y estacionario
Boizumeau <i>et al.</i> , [55]	2011		x		x				Proyecto Kyoto
Steiner <i>et al.</i> , [56]	2007			x	x				Supercapacitores (MITRAC)
González-gil <i>et al.</i> , [57]	2014			x			x		Eficiencia y optimización
Moskowitz <i>et al.</i> , [58]	2010			x	x				Supercapacitores (STEEM)
González-Gil <i>et al.</i> , [59]	2014			x			x		Eficiencia y optimización
Lacôte <i>et al.</i> , [60]	2005		x		x				Alstom
González-gil <i>et al.</i> , [63]	2013		x		x				Eficiencia y optimización
Konishi <i>et al.</i> , [64]	2012			x	x				Sistemas estacionarios para corriente continua
Castro <i>et al.</i> , [65]	2007			x	x				Soluciones estacionarias
Cornic <i>et al.</i> , [68]	2010		x			x			Estaciones reversibles
Gelman <i>et al.</i> , [69]	2009			x		x			Rectificador de tiristores
Lu <i>et al.</i> , [71]	2019			x			x		Sistema de gestión de la energía y optimización
Hao <i>et al.</i> , [72]	2020			x		x	x		Estaciones reversibles
Li <i>et al.</i> , [73]	2018			x			x		Control adaptativo
Nasari <i>et al.</i> , [74]	2019			x			x		Vehículo híbrido
Rezaei <i>et al.</i> , [75]	2017			x			x		Vehículo híbrido
Sobol [76]	2001			x			x		Análisis de sensibilidad
Yin <i>et al.</i> , [77]	2014			x	x		x		Sistemas híbridos
Zhao <i>et al.</i> , [78]	2015			x	x				Sistemas híbridos
Cao <i>et al.</i> , [79]	2016			x	x				Modelo de baterías
Lee <i>et al.</i> , [80]	2020			x	x		x		Control de sistemas híbridos

Autor	Año	1	2	3	4	5	6	7	Observaciones
Jefimowski <i>et al.</i> , [81]	2020			x	x		x		Supercapacitor, machine learning
Radu <i>et al.</i> , [82]	2019			x	x				Supercapacitores a bordo
Barrero <i>et al.</i> , [84]	2008			x	x				Supercapacitores estacionarios
Devillers <i>et al.</i> , [85]	2013		x		x				Supercapacitores
Iannuzzi <i>et al.</i> , [86]	2012			x	x				Supercapacitores a bordo
Wu <i>et al.</i> , [87]	2020			x	x		x		Dimensionamiento óptimo. A bordo
Wu <i>et al.</i> , [88]	2018			x	x		x		A bordo
Ratniyomchai <i>et al.</i> , [89]	2014		x		x				Dispositivos de almacenamiento: casos de estudio
Herrera <i>et al.</i> , [90]	2016			x	x		x		Dimensionamiento óptimo y supercapacitor
Lamedica <i>et al.</i> , [91]	2020			x	x		x		Dimensionamiento y posicionamiento
Yoshida <i>et al.</i> , [92]	2018			x	x				Dimensionamiento
Calderaro <i>et al.</i> , [93]	2015			x	x		x		Dimensionamiento y posicionamiento
Graber <i>et al.</i> , [94]	2018			x	x				Enfoque económico del dimensionamiento
Naseri <i>et al.</i> , [95]	2020			x	x		x		Supercapacitor, control predictive
Xia <i>et al.</i> , [96]	2015			x	x		x		Dimensionamiento, ubicación y algoritmo genético
Rufer <i>et al.</i> , [97]	2004			x	x				Supercapacitores
Iannuzzi <i>et al.</i> , [98]	2012			x	x				Supercapacitores
Zhang <i>et al.</i> , [99]	2016					x			Tesis doctoral
Almaksour <i>et al.</i> , [100]	2019			x		x			Estaciones reversibles
Cabrane <i>et al.</i> , [101]	2017			x	x		x		Híbridos, lógica difusa
Krim <i>et al.</i> , [102]	2018			x			x		Lógica difusa, control
Pan <i>et al.</i> , [103]	2017			x	x		x	x	Control Tensión-Reactiva
Li <i>et al.</i> , [106]	2020			x			x	x	Análisis multi-objetivo de generación FV
Zhong <i>et al.</i> , [107]	2020			x	x		x	x	Implementación óptima de generación FV
Xie <i>et al.</i> , [108]	2020			x	x	x	x	x	Micro redes en estaciones ferroviarias

Metro de Panamá: estimación y aprovechamiento alternativo de la energía del frenado regenerativo

Autor	Año	1	2	3	4	5	6	7	Observaciones
Bulatov <i>et al.</i> , [110]	2018			x		x		x	“Energy Router” para integración de GD
Gabbar <i>et al.</i> , [111]	2017			x	x		x	x	Optimización tecno económica con Micro redes
Kotel'nikov <i>et al.</i> , [112]	2017			x	x			x	Subestaciones eólicas de tracción
Brenna <i>et al.</i> , [113]	2020		x			x		x	Topologías de Micro redes
1: normas técnicas, guías, manuales; 2: Revisiones bibliográficas; 3: Artículos investigativos; 4: Sistemas de almacenamiento; 5: Convertidores; 6: Optimización y control; 7: Generación Distribuida									

CAPÍTULO 2

CASO DE ESTUDIO

El estudio previo permite visualizar el amplio campo de aplicación referente al frenado regenerativo en el ámbito ferroviario y cómo puede profundizarse mediante la aplicación de métodos matemáticos orientados a la optimización y dimensionamiento de los parámetros de un sistema en particular.

Sin embargo, en el transcurso de las aplicaciones presentadas en la sección anterior, se puede concluir que cada caso de estudio puede ser considerablemente distinto a los demás y, asimismo, la eficacia de las mejoras por implementar. Esto sugiere que es recomendable probar en primera instancia algunos dispositivos de almacenamiento clásicos y observar el alcance de sus beneficios en el sistema de electrificación.

Para inspeccionar dichos resultados, primero es mandatorio conocer el sistema por estudiar, cómo varían sus parámetros durante la operación cotidiana y distinguir qué tanto se podría mejorar. Luego de establecer una línea de acción estimada en la cual se ha encontrado una de las muchas soluciones posibles, se puede optimizar y ajustar los resultados en función de los objetivos concretos que se deseen alcanzar. Consecuentemente, el alcance del presente trabajo implica el modelado dinámico y eléctrico de la línea 1 del Metro de Panamá y, posteriormente, la evaluación del impacto de dispositivos de almacenamiento del frenado regenerativo en la catenaria de ésta, si se encuentran deficiencias operativas en sus parámetros.

2.1. Descripción de la línea 1 del Metro de Panamá

La línea 1 del Metro de Panamá (PML1) inició sus operaciones el 6 de abril de 2014 [114]–[116]. Actualmente, tiene una longitud de 16.3 km, conectando la zona norte de la Ciudad de Panamá a través de la estación San Isidro, con el sur de la Ciudad de Panamá, a través de la estación Albrook (Ver Figura. 1). Esta última estación se conecta con la Terminal Nacional de Autobuses de Transporte de Albrook que sirve a todo el país y la ciudad de Panamá. De la Terminal Nacional de Autobuses de Transporte de Albrook llegan y salen los autobuses interprovinciales. Esta estación está, además, bastante cerca del aeropuerto local, Marcos A. Gelabert. Actualmente, el “headway” de la línea 1 del Metro de Panamá corresponde a 2:00 minutos en horas pico (27 trenes) y es de 4:10 minutos en horas de menor actividad (14 trenes) [117]. La línea 1 del Metro de Panamá es un metro metropolitano con tramos de vía subterránea y elevada [118] que funciona con un sistema de transporte guiado por catenaria rígida (vía) y flexible (patios y talleres).

En el extremo sur, en la zona de Albrook, la línea 1 del Metro de Panamá cuenta con una instalación de almacenamiento y mantenimiento del material rodante con una superficie de 10 hectáreas. En estas instalaciones se realiza el mantenimiento pesado y ligero del material rodante. Además, el Centro de Control de Operaciones (OCC) se encuentra en esta instalación. El material rodante corresponde a trenes de 3 y 5 coches eléctricos de unidades múltiples con una capacidad máxima de 800 y 1000 pasajeros / tren respectivamente [119]. Actualmente, el tiempo de parada en las estaciones de la línea 1 del Metro de Panamá corresponde a un rango de 20 a 30 segundos [120][121]. La velocidad de operación de la

línea 1 del metro de Panamá es 32 km / h [121]. La velocidad máxima del material rodante es de 80 km / h [117] .

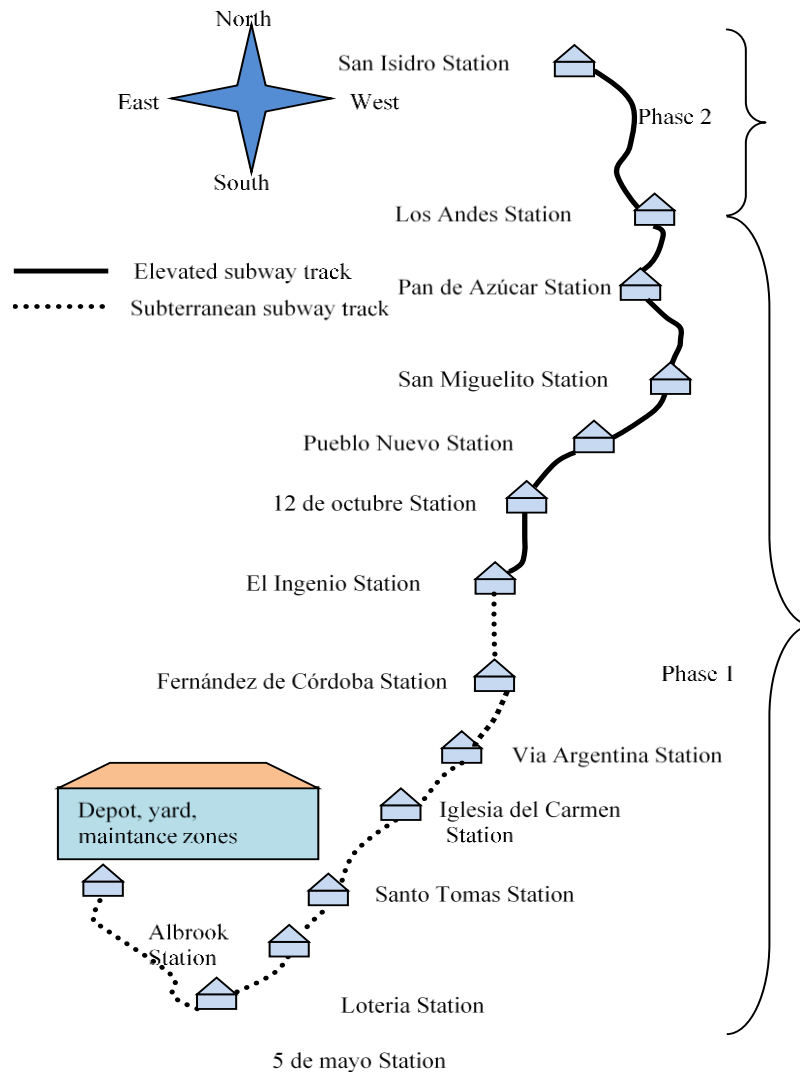


Figura 19. Esquema de la línea 1 del Metro de Panamá (Fase 1 + Fase 2) (Berbey-Alvarez, 2013)

2.2. Descripción del simulador dinámico-eléctrico

Previo al desarrollo de este TFM Berbey-et al.[122]–[126][127], realizó un conjunto de simulaciones relativas a las operaciones de la línea 1 del Metro de Panamá en su fase 1, utilizando los simuladores SEE y el simulador Railsim. En Berbey-Alvarez et al.,[126] desarrolló una metodología general para la estimación de los servicios parciales en caso de averías, incidencias. En Berbey-Alvarez et al.,[126] se plasmaron los resultados encontrados una serie de análisis de distintos escenarios para la operación de la línea 1 del metro de Panamá. En estos escenarios se estiman índices preliminares relativos a variables como tiempos de viaje, tiempos de paradas, consumo energético, e inclusive en el modo degradado del sistema ante alguna incidencia o fallo, que es cuando ocurren los servicios parciales. De modo este trabajo anterior sirve de comparación para afinar los resultados obtenidos en este TFM.

La herramienta seleccionada para generar las simulaciones ha sido usada en varios proyectos ingenieriles e investigativos como en Ballesteros *et al.*, [18] y Martín *et al.*, [27]. Esta herramienta es capaz de generar trazados de circulación de los trenes; perfiles de velocidad y aceleración; y las curvas de la relación entre la potencia y la tracción. Luego de validar los resultados, permite realizar simulaciones eléctricas a través de las cuales es posible obtener la característica de consumo de potencia de la subestación eléctrica; y variación de intensidades, tensiones y potencia en la catenaria del sistema en estudio.

Respecto a las simulaciones dinámicas, es necesario suministrarle al programa los puntos kilométricos iniciales y finales, en kilómetros, que describen cada tramo por discretizar, la pendiente en milímetros por metro (mm/m), el límite de velocidad en kilómetros por hora (Km/h) y la curvatura de la vía férrea en metros (m). Además, se considera en la división en tramos la variación de la velocidad máxima, curvatura y pendiente. Los límites de velocidad pueden definirse intrínsecamente por la sección; en circulaciones de pendiente superiores o inferiores a +30 mm/m o -30mm/m, respectivamente, y en radios de curvatura reducidos (300m, 400m, 500m, etc.). Cabe señalar que la máxima pendiente de la línea 1 del metro de Panamá corresponde a 35 mm/m[128].

Luego de incluir dichas cantidades, atendiendo a otras limitaciones (máxima deceleración, puntos de paradas, circuitos de riel, etc.), se debe definir el material rodante o vehículo, como se representa en la Figura 20. La interfaz facilita cargar trenes desde una basta base de datos o introduciendo los valores solicitados.

Datos del Tren

Introduzca el tipo de tren: S-100 [Guardar]

Coeficiente estático de adherencia: []

Aceleración Máxima (m/s²): [] Factor de Potencia (cosphi): []

Desaceleración Máxima (m/s²): [] Masa del Tren (t): []

Potencia en llantas Máxima (kW): [] Masa adherente (t): []

Potencia de frenado máxima (kW): [] Porcentaje de regeneración (Tanto por uno): []

Esfuerzo de tracción Máximo (kN): [] Parámetro A (daN): []

Esfuerzo de tracción Punto de la Recta (kN): [] Parámetro B (daN/[km/h]): []

Punto de velocidad de recta Re: [] Parámetro C (daN/([km/h]²)): []

Punto Velocidad de curva hiperbólica Ra: [] Esfuerzo de Frenado Máximo (KN): []

Velocidad Máxima (km/h): [] Punto Velocidad de curva hiperbólica frenado Raf: []

Potencia de Servicios Auxiliares (SSAA) (kW): [] Longitud del tren (m): []

Ancho de vía: 1668 []

Ecuación de adherencia: $\mu(v)=\mu_0(a+b/(V+c))$

a: [] b: [] c: []

[Rendimientos]

Figura 20. Interfaz para la introducción de parámetros en un tren de pasajeros. Captura de pantalla

Como se observa, los valores caracterizan específicamente al desempeño del tren ante la circulación exigida al comienzo de esta sección. Varios autores como Alnuman *et al.*, [129] y Su *et al.*, [130] realizan procedimientos muy similares y también aplican la ecuación de Davis para modelar la resistencia al recorrido o la fuerza de arrastre. Los parámetros A, B y C de la Figura 20 se modelan con la ecuación (1):

$$F_{Davis}(v) = A + Bv + Cv^2 \quad (1)$$

En donde normalmente el parámetro A se relaciona a la masa del vehículo, B a la interacción de éste con las llantas-riel y C al comportamiento aerodinámico. Estos parámetros se calculan experimentalmente y, de acuerdo con Su *et al.*, [130], también describen:

1. La lubricación de las llantas y los rieles, incluyendo la participación del tipo y condición de los rodamientos.
2. La optimización de la aerodinámica del pantógrafo.
3. La aerodinámica de las secciones de los bogies.
4. La racionalización de las superficies anterior, posterior y laterales.
5. La reducción de la masa.

También está la ecuación de adherencia, que describe la capacidad de tracción debido a la interacción llanta-riel cimentada en la fricción de los trenes. Sus parámetros se calculan experimentalmente y pretenden considerar el estado de los rieles (húmedos, secos, con hojas, etc) así como el estado del tiempo. El grupo Japan Railways [131] estableció una serie de fórmulas empíricas para la estimación de la adherencia dinámica, en las cuales la ecuación (2) representa el coeficiente en marcha y la ecuación (3) en frenado, que posee la misma relación entre variables de la implementada en el simulador. Los coeficientes que acompañan dichas ecuaciones procuran distinguir entre locomotoras en sistemas de corriente alterna, continua y líneas ferroviarias convencionales.

$$\mu(v) = x \frac{1 + yv}{1 + zv} \quad (2)$$

$$\mu(v) = x' \frac{y'}{1 + z'v} \quad (3)$$

En la Figura 20 también se solicita las potencias y esfuerzos máximos de tracción y de frenado del material rodante, con sus correspondientes puntos de velocidad. Usualmente, los propietarios del sistema o los fabricantes ferroviarios, dependiendo de si el estudio es de una línea existente o en etapa de diseño, proporcionan las curvas de tracción (ver figura 13) y las curvas de frenado (ver figura 14). Atendiendo a las imágenes referenciadas, se podrían conseguir los parámetros restantes para caracterizar al tren:

- Figura 21: 240 kN (tracción máxima), 155 kN (tracción en recta), 45 Km/h (velocidad en recta) y 66 Km/h (velocidad curva hiperbólica).

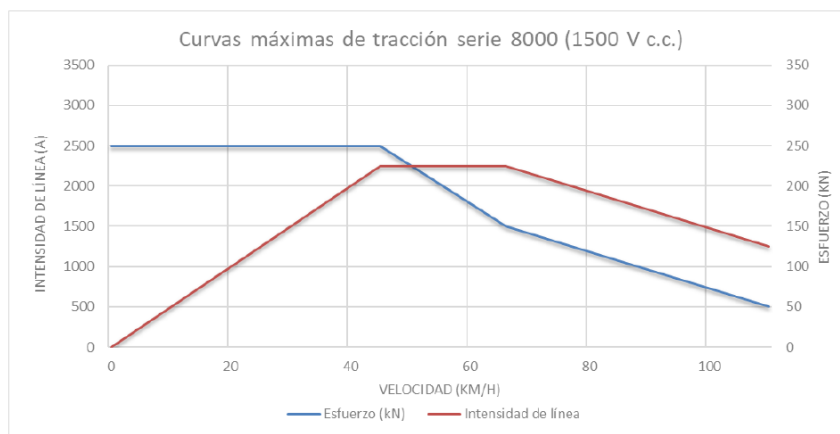


Figura 21. Ejemplo de curvas de tracción de un tren. Fuente: Metro de Madrid [27].

- Figura 22: 230 KN (frenado máximo) y 75 Km/h (velocidad curva hiperbólica).

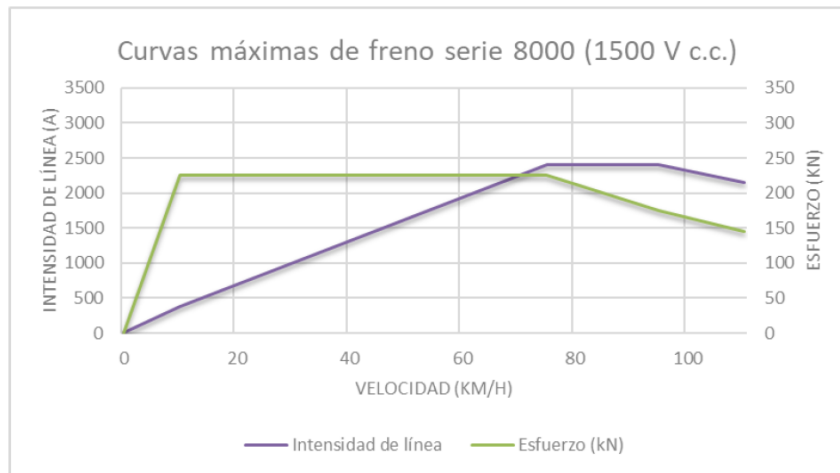


Figura 22. Ejemplo de curvas de frenado de un tren. Fuente: Metro de Madrid [27].

Al finalizar la introducción de los datos, se espera obtener un resultado como la Figura 23, es decir una malla horaria. En ésta se visualizan ocho curvas con pares de colores compartidos en un eje de coordenadas “punto kilométrico vs tiempo transcurrido”. Interpretando la imagen de izquierda a derecha, cada curva de un color representa un tren que comenzó su desplazamiento a lo largo de la línea. El pequeño rizado, el cual mantiene una trayectoria totalmente horizontal en su aparición, simula el tiempo en las estaciones; las curvas con pendiente promedio positiva son en el trayecto de “ida” y la de pendiente promedio negativa son las de “vuelta”. Como es de esperar, todas las curvas de un mismo color han ser idénticas, pero en sentido contrario y mantener la misma distancia en tiempo durante el trayecto (“headway”, distancia entre trenes). Aquí se representan cuatro trenes, cuatro estaciones, un headway aproximado de 125 s, una trayectoria de 58 Km y un recorrido total aproximado de 2650 s.

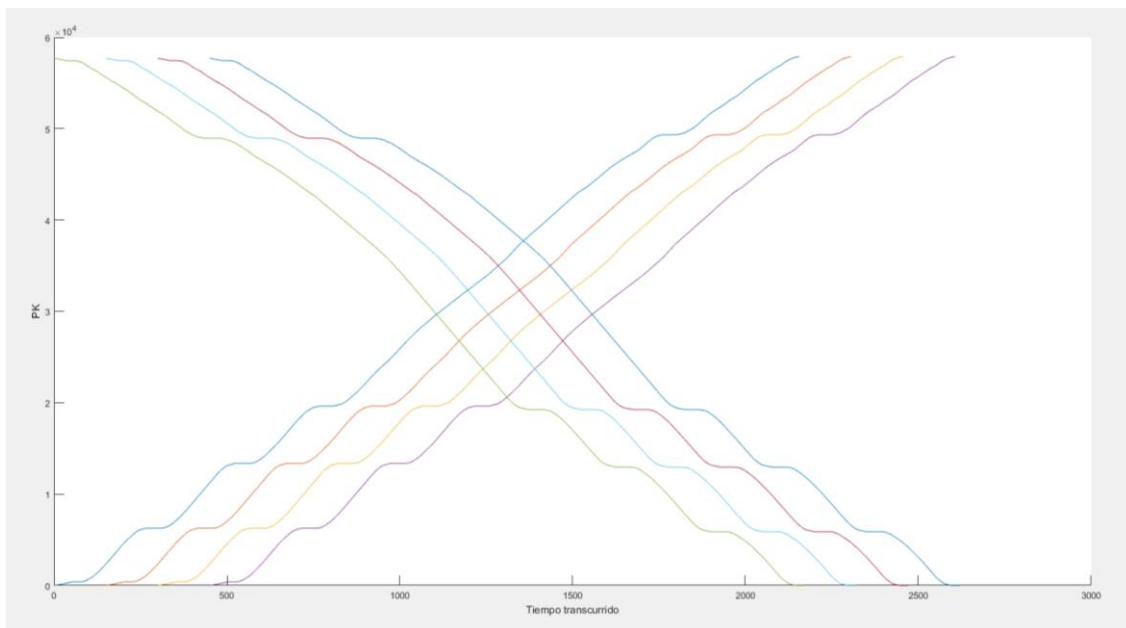


Figura 23. Malla de circulación genérica.

En Capasso *et al.*, [132] se obtiene una malla de circulación con la misma topología, generada en un software de simulaciones ferroviarias basado en el lenguaje de programación

Modelica. En este estudio se simuló un tren, 12 estaciones, un recorrido máximo de 5 Km en un tiempo de 1000 s, en un tranvía alimentado a 1650 Vdc en Roma.

Considerando el aspecto eléctrico del simulador, es necesario definir el tipo de electrificación a utilizar (continua en la tensión especificada o cuál tipo alimentación en alterna); esto definirá el alcance de la demanda de parámetros por parte del programa. En lo que corresponde al presente estudio, solamente es necesario definir la catenaria en corriente continua; lo que significa que no es necesario precisar autotransformadores, zonas neutras y, además, la configuración de la catenaria es más asequible.

Aun así, se debe definir la cantidad, capacidad, tensión y ubicación de las subestaciones de tracción, las características de la catenaria rígida (permeabilidad magnética relativa, sección transversal, resistividad), conductancia por vía en los carriles, resistencias de puesta a tierra y distancias entre éstas, tensión nominal de operación, presencia de alimentadores de refuerzo, puntos de puesta en paralelo (ppp) y la disposición geométrica de los elementos, como se ejemplifica en la Figura 24 en donde se caracteriza la catenaria rígida de la línea 9 del Metro de Madrid.

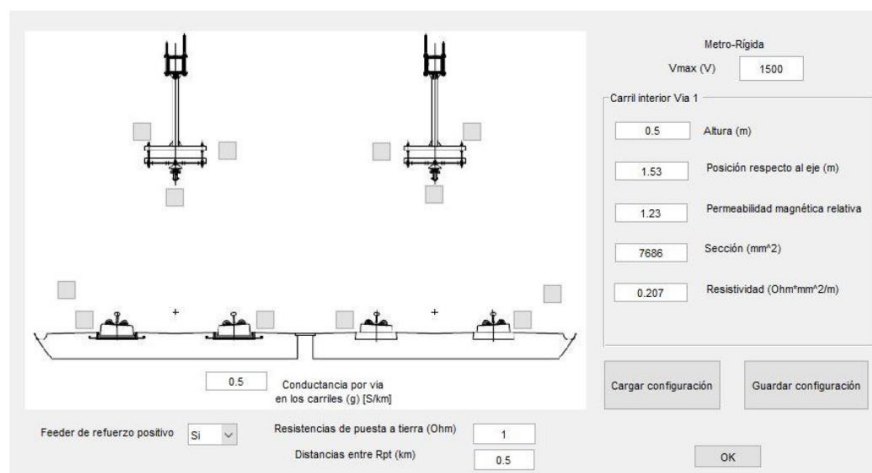


Figura 24. Ejemplo de la interfaz del simulador para definir una catenaria rígida alimentada en 1500 Vdc. Fuente: Martín et al., [27].

2.3. Aplicación de Sistemas de Almacenamiento: perspectiva general

Los sistemas de almacenamiento en el entorno ferroviario han sido foco de estudio para ingenieros e investigadores en la última década. Como se presentó en el **Capítulo 1**, muchas tecnologías de éstas tienen participación en el aumento de la eficiencia energética y en la calidad de suministro, por lo que tienden a instalarse para reducir o posiblemente independizarse de la electrificación mediante catenaria, que influye directamente en el flujo de energía a través de ésta y, consecuentemente, reduce la caída de tensión en su recorrido; aunque el enfoque principal suele ser almacenar energía del frenado regenerativo, que reduce las pérdidas globales del sistema, también favorecen colateralmente a la reducción de picos de tensión creados por la inyección de la regeneración. Las bondades de la aplicación de distintos tipos de baterías, supercapacitores, volantes de inercia y más, han sido corroboradas en un sin número de estudios, como los recopilados en el **Estado del Arte**.

El enfoque de la actual investigación es vislumbrar cómo dichas tecnologías de almacenamiento podrían alterar los parámetros eléctricos y energéticos de la/s línea/s del Metro de Panamá. Por lo tanto, es imprescindible conocer suficientemente estos dispositivos para modelarlos y contemplar su comportamiento y desempeño.

Mediante el simulador es posible integrarlos a los algoritmos y analizar resultados como los de la Figura 25. Esta imagen representa los resultados de la tensión por punto kilométrico definido en la malla de circulación. Al completar la introducción de información mecánica y eléctrica de la línea ferroviaria, el simulador proporciona espectros de tensiones, intensidades, potencias, energía y potencia suministrada por las subestaciones. Es esperable que luego de implementar algún dispositivo de almacenamiento, las fluctuaciones de tensión e intensidad sean menor, así como el suministro por parte de las subestaciones, considerando que el dispositivo en cuestión será aquel que suministra y absorbe los flujos excedentes que ocasionaban tales fluctuaciones. La Figura 25 presenta una aparente tensión nominal de 1500 V que sobrepasa los 1580 V y cae por debajo de 1410 V, esto representa un rango de 170 V, siendo más acusada la caída que el pico.

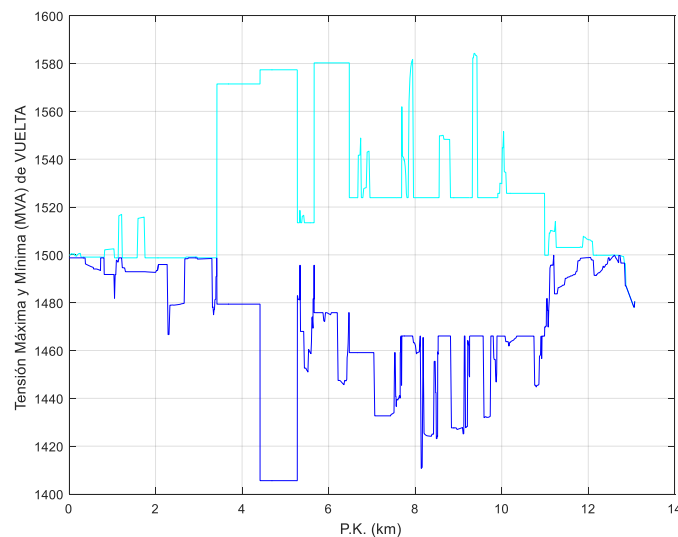


Figura 25. Resultados del simulador: variación de la tensión máxima y mínima a lo largo de la catenaria.

2.3.1. Modelado de dispositivos: baterías y supercapacitores

Antes de acoplar las tecnologías al simulador, es oportuno representarlas y certificar los resultados obtenidos por varios autores. Distintos autores [133]–[139] han estudiado ampliamente modelos, identificación de parámetros y acoples híbridos con otras tecnologías (celdas de combustible, paneles fotovoltaicos, etc.).

El modelo de la Figura 26 representa 4 componentes generales: una fuente de tensión denominada OCV, un resistor con valor R_{int} , un resistor con valor R_1 y un capacitor con valor C_1 . A este modelo le falta un resistor de resistencia muy grande en paralelo con la fuente para representar la auto-descarga, pero el autor comenta que para ciclos de trabajo reducidos es una válida aproximación despreciarla. La R_{int} representa la caída de tensión en las partes conductoras de la celda y los contactos en los terminales, el conjunto paralelo pretende representar la característica transitoria en los ciclos de carga y descarga y, de acuerdo con Plett [140] y Arribas *et al.*, [141], entre más conjuntos paralelo hayan mejor descrito estará el modelo.

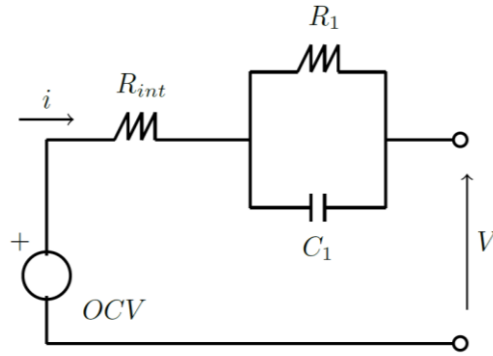


Figura 26. Modelo de una celda de batería de ion Litio. Fuente: Locorotondo et al.,[139]

La fuente de tensión, OCV, representa la tensión de circuito abierto (“*Open Circuit Voltage*”) y de acuerdo con Zhang *et al.*, [133] puede representar de muchas maneras, siempre manteniendo una estrecha relación con la temperatura de operación y el estado de carga (SOC: “*State of Charge*”).

Zhang *et al.*, [133] presenta 4 modelos diferentes en la Figura 27 para estimar la tensión de circuito abierto, mediante ensayos controlados de ciclos de carga y descarga y aplicando métodos de regresión. La ecuación (4) es la ecuación característica de una regresión polinómica, la ecuación (5) de una suma de funciones senos, la ecuación (6) representa el modelo exponencial y la ecuación (7) es el modelo Gauseano.

$$V_{OC} = \sum_{i=0}^n a_{i+1} SOC^{n-i} \quad (4)$$

$$V_{OC} = \sum_{i=1}^n a_i \sin(b_i SOC + c_i) \quad (5)$$

$$V_{OC} = \sum_{i=1}^n a_i e^{b_i SOC} \quad (6)$$

$$V_{OC} = \sum_{i=1}^n a_i e^{\left(\frac{SOC-b_i}{c_i}\right)^2} \quad (7)$$

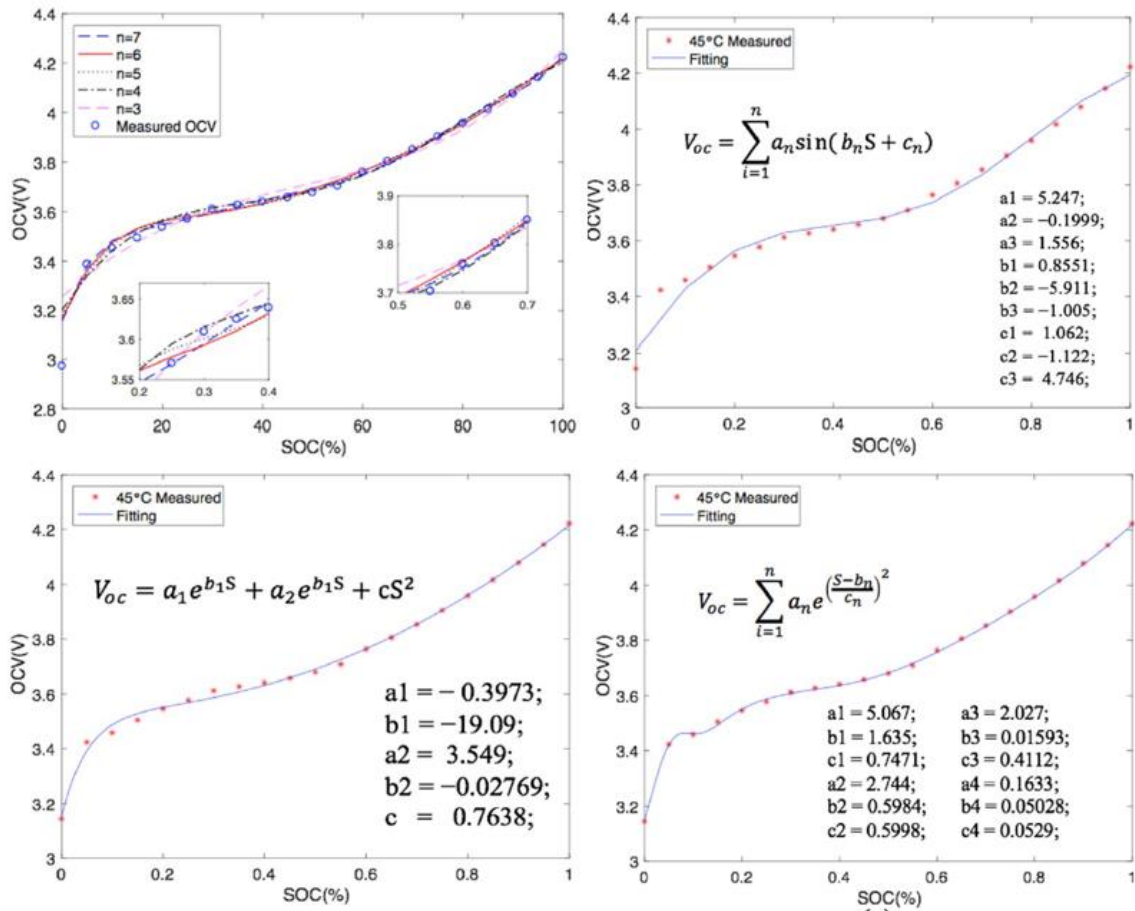


Figura 27. izq a der, arriba hacia abajo: Modelo polinómico, sinusoidal, exponencial y Gauseano de la tensión de circuito abierto. Fuente: Zhang et al., [133]

El modelo de la Figura 28 representa una celda un supercapacitor compuesto por 5 cinco elementos: tres resistores de valores R_f , R_1 y R_2 ; y dos capacitores de valores C_1 y C_2 . El resistor R_f representa la auto-descarga y también puede despreciarse para operaciones de cortas duraciones; la etapa central, “Main Cell”, representa la acción que sigue directamente la fluctuación de tensión en el capacitor central debido a la intensidad, y la última sección, “Slow Cell”, representa el comportamiento estacionario debido a la característica intrínseca del dispositivo.

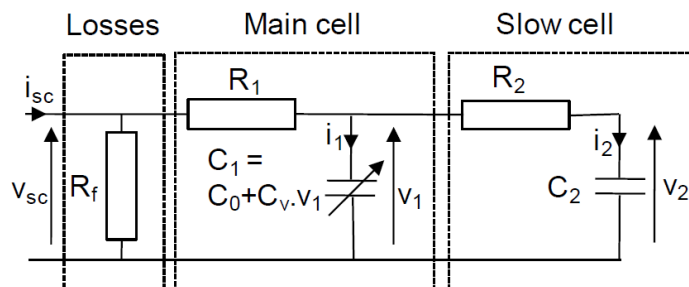


Figura 28. Modelo representativo de una celda de supercapacitor. Fuente: Lahyani et al., [142].

2.3.2. Modelado de dispositivos: desempeño

Luego de entender cómo se pueden representar, es interesante visualizar el desempeño de éstos en un sistema genérico. Sin embargo, implementar los modelos tal y como se han

desarrollado es complicado debido a que los fabricantes no proporcionan los valores exactos de cada uno de los componentes necesarios para completar una apropiada aproximación. Para esto, se modelará con los resultados obtenidos por Zhang *et al.*, [133], Lahyani *et al.*, [142] y Locorotondo *et al.*, [139].

De la Figura 27 se obtienen los coeficientes para representar la fuente de tensión a una temperatura dada, Lahyani *et al.*, [142] ensaya al supercapacitor BCAP 3000 de Maxwell, así como Locorotondo *et al.*, [139] ensaya varios conglomerados de baterías y obtienen:

- Supercapacitor:
 - $R1=0.36\text{ m}\Omega$.
 - $C0=2100\text{ F}$.
 - $Cv=623\text{ F/V}$.
 - $R2=1.92\text{ }\Omega$.
 - $C2=172\text{ F}$.
- Batería:
 - $R_{int}=38.72\text{ m}\Omega$.
 - $R1=4.81\text{ m}\Omega$.
 - $C1=715.1767\text{ F}$.

Estos dispositivos se instalan directamente a un sistema sencillo que alimenta a un motor de imanes permanentes (Arribas *et al.*, [141]). El motor está controlado y modelado mediante vectores espaciales sin debilitamiento de campo y con banda de histéresis para generar los disparos del inversor que lo alimenta. Con intenciones de simplificar el modelo y estudiar directamente cómo podrían desempeñarse la batería y el supercapacitor, se considera una red en tensión continua de 400 V, con resistores para representar la caída de tensión en la fuente y en los alimentadores del inversor. Además, se desarrolla un ciclo de aceleración de 3 s en donde llega a su velocidad nominal al primer segundo e inicia el frenado en el siguiente segundo hasta llegar a detenerse en el último segundo (Figura 29); la Figura 30 muestra la generación y consumo de energía y la Figura 31 la variación de tensión.

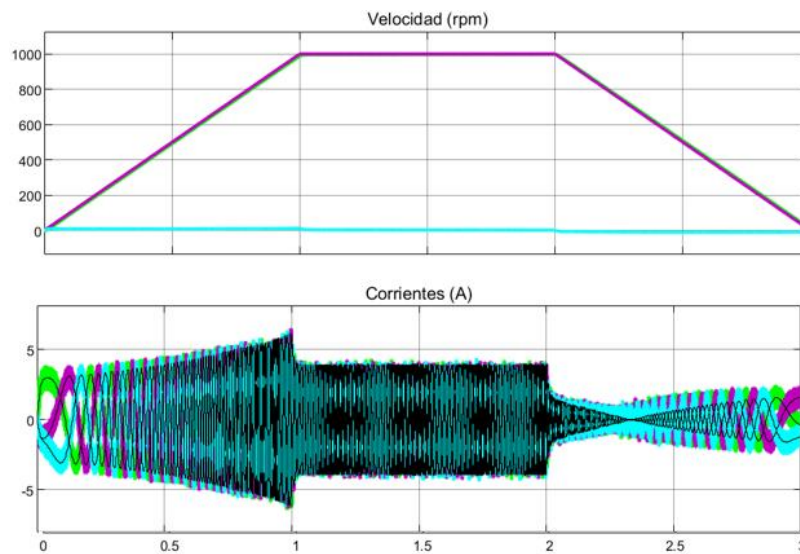


Figura 29. arriba: Consigna de velocidad vs Velocidad real vs error. Abajo: Consigna de corrientes del inversor vs corrientes reales. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas *et al.*, [141]

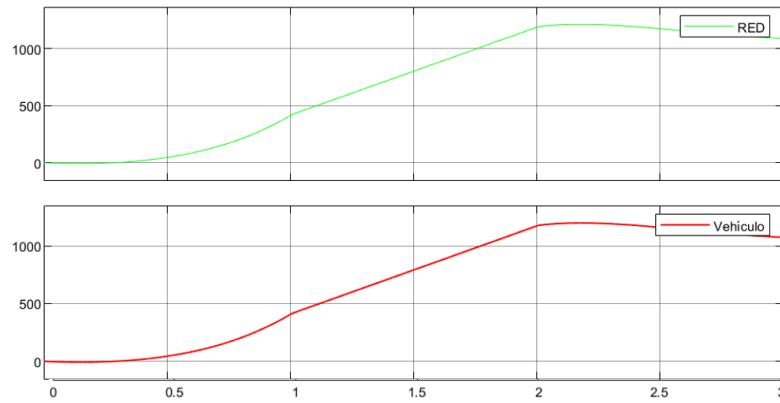


Figura 30. arriba: Energía entregada por la red. Abajo: Energía consumida por el vehículo. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]

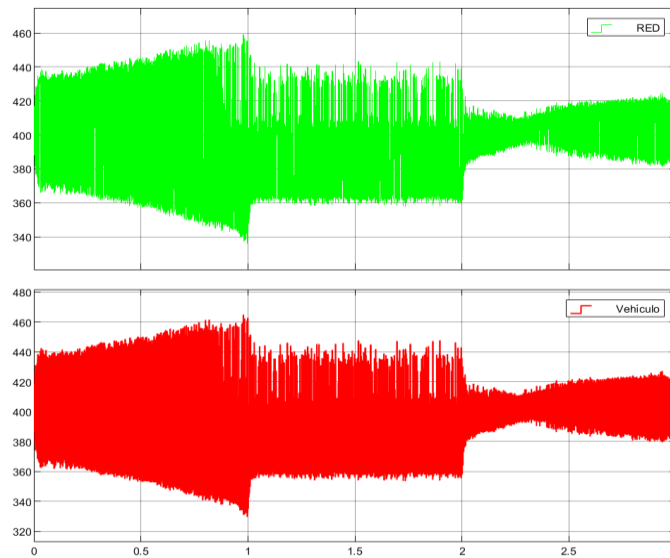


Figura 31. Arriba: tensión de la red. Abajo: Tensión del vehículo. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]

En primera instancia, es posible diferenciar que es una carga pequeña con un requerimiento máxima de intensidad de menos de 6 A, pero es notable la gran banda de tensión en las terminales de la red y del vehículo, de un máximo de 120 V. De acuerdo con la vasta literatura consultada, una batería y/o un supercondensador apropiadamente dimensionado regularían esta situación y reducirían la energía suministrada por la red.

Los modelos por utilizar cumplen con el requerimiento de intensidad, pero no con la tensión de operación. La batería tiene una tensión de circuito abierto de 4.2 V al 100% de su carga según el modelo de Zhang *et al.*, [133] y el supercapacitor de 2.7 V según Lahyani *et al.*, [142]. Esto indica que hay que hacer una asociación serie de por lo menos 95 baterías [141] y 148 supercapacitores [138]. La batería y el condensador serán conectados mediante interruptores ideales que los accionarán cuando la tensión suba o baje en un 1% de la tensión nominal. Es bastante improbable que se conecten sin algún controlador electrónico como convertidores DC-DC o inversores, pero eso involucraría más variables a analizar en esta pequeña simulación. Se pretende solamente ver el efecto general, sin detenimiento en cantidades, de éstos en los parámetros eléctricos del sistema.

Si se conecta la batería, se obtiene un flujo de energía como en la Figura 32, en donde la batería aporta más de 2/3 del total de lo requerido por el vehículo; en la Figura 33 se aprecia una reducción general del rizado y de la banda de la tensión a 80 V.

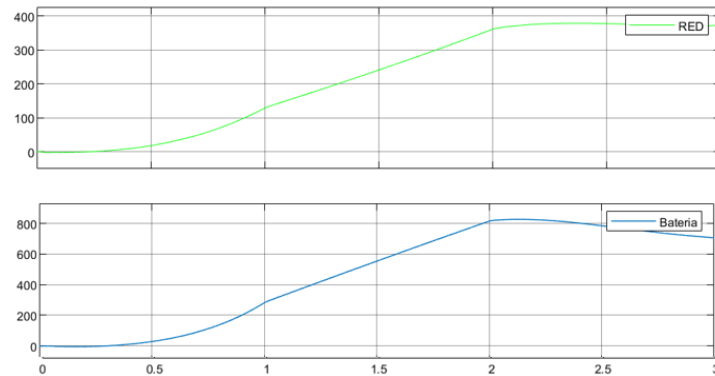


Figura 32. arriba: Energía entregada por la red. Abajo: Energía entregada por la batería. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]

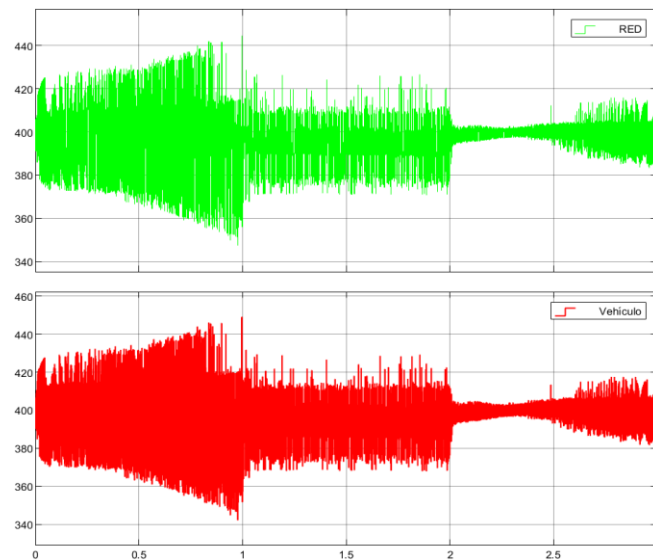


Figura 33. Batería conectada. Arriba: tensión de la red. Abajo: Tensión del vehículo. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]

Si se conecta solamente el supercapacitor, se aprecia que éste debido a su rápida respuesta es capaz de suministrar prácticamente toda la energía que requiere el vehículo (Figura 34), también posee una capacidad de regular tensión superior a la batería previamente probada; en la Figura 35 se visualiza una banda de 10 V en el vehículo y de menos de 1 V en la red.

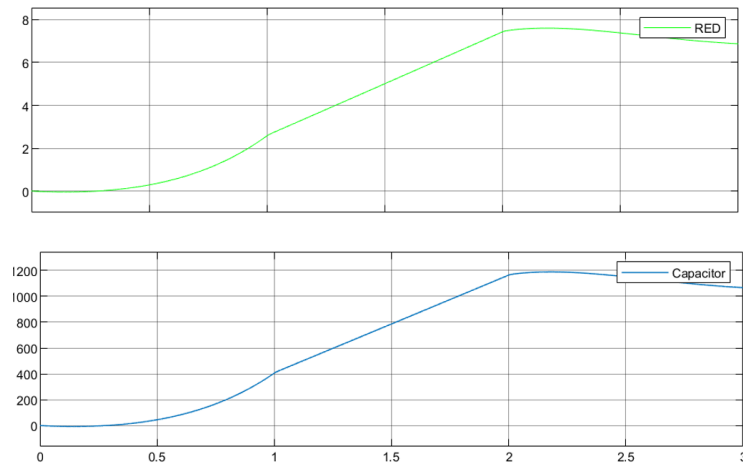


Figura 34. Energía entregada por la red. Abajo: Energía entregada por la batería. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas *et al.*, [141]

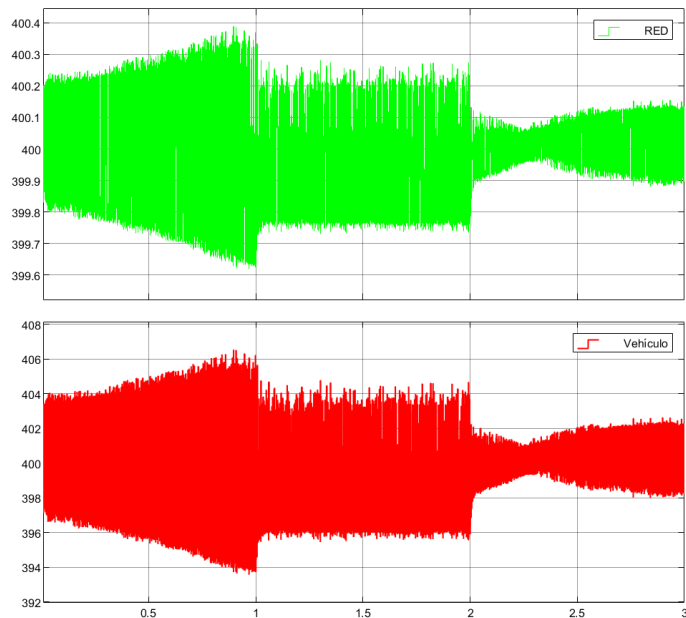


Figura 35. Supercapacitor conectado. Arriba: tensión de la red. Abajo: Tensión del vehículo. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas *et al.*, [141]

Los resultados reafirman lo que diversos autores han establecido entre las diferencias de respuesta entre baterías y supercapacitores y, asimismo, la preferencia de aplicación de éstos para requerimientos de calidad de energía o almacenamiento de energía. Entre los resultados se puede apreciar, aunque no haya sido ilustrado, la capacidad de absorber el frenado del vehículo de ambos dispositivos, que después del segundo 2 se comporta como un generador para cumplir la consigna establecida.

Otra realidad notable por comentar es la necesidad de un control adecuado y que considere la naturaleza de ambas tecnologías. Lopez *et al.*, [136], Lahyani *et al.*, [142], Dutta *et al.*, [35] y muchos autores más concluyen que en la hibridación de ambos es necesario limitar al supercapacitor en función de la respuesta dinámica de la batería, considerando que el último es más lento. Esto se ejemplifica en la Figura 36 en la cual se realizó nuevamente la simulación, pero con ambos dispositivos conectados a través de los interruptores ideales y con la misma consigna de control. Claramente se ve que el supercapacitor entregó casi a totalidad todo lo demandado por el vehículo mientras que la batería sobrepasó por poco el

10% del total. Además, la variación de la energía en el tiempo en el supercapacitor es más acusada, presenta varios cambios de pendiente muy notable, cuando la batería mantuvo una trayectoria bastante lineal en donde tuvo un leve punto de inflexión cuando el supercapacitor varió drásticamente (últimos instantes del ciclo).

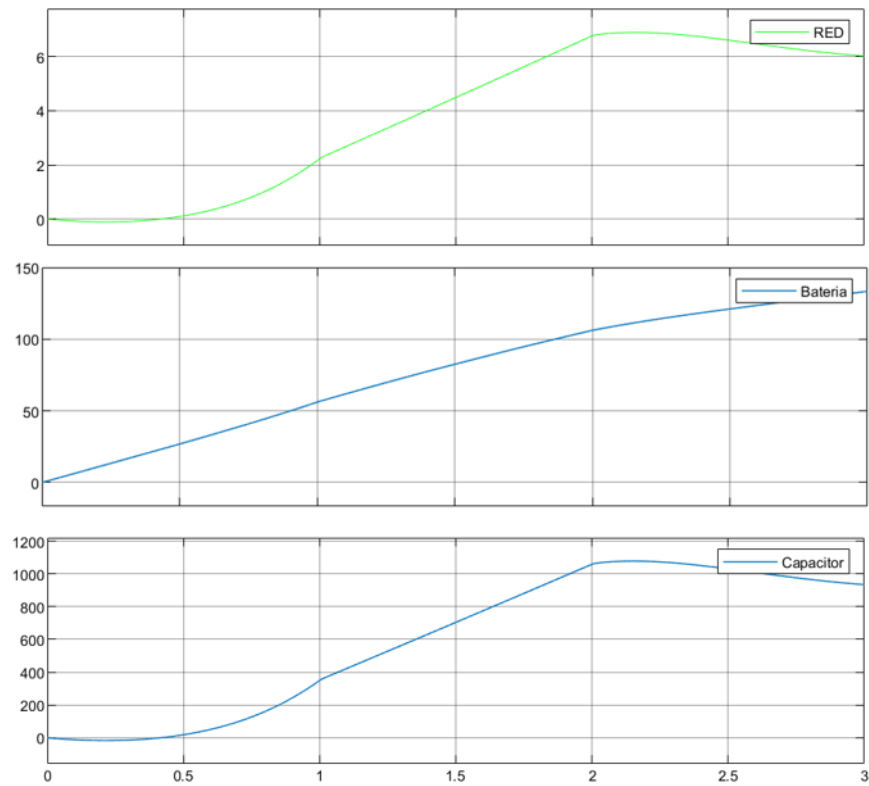


Figura 36. Arriba hacia abajo: Energía entregada por la red, energía entregada por la batería y energía entregada por el supercapacitor. Fuente: Elaboración propia en la adaptación del modelo de simulink de Arribas et al., [141]

CAPÍTULO 3

Simulaciones

3.1. Validación mecánica

La administración del Metro de Panamá suministró un esquema que contiene la disposición kilométrica de las estaciones y distintas gráficas que contienen la variación de los parámetros. Evidentemente, al tratarse de emular el comportamiento dinámico de una línea de 15 Km no se puede introducir la totalidad en el dominio continuo del tiempo, sino que es necesario discretizarla. Para obtener la mayor precisión posible, es recomendable discretizar la línea en tramos de 10 m a 20 m, con mayor detalle en las zonas de aceleración y frenado.

Para tal motivo, se discretizó la línea en 1427 tramos, lo que equivale a tramos de 10.77 m, en donde en los trayectos con poca variación de parámetros ni cambio sobre la marcha del material rodante se optó por colocar tramos hasta de 15 m. La Figura 37 es el resultado de dicha discretización sobre la curva de velocidad; claramente se aprecia la velocidad máxima de 80 Km/h y las catorce (14) estaciones en donde el vehículo se detiene. Asimismo, la Figura 38 y la Figura 39 son el resultado de discretizar la pendiente y la curvatura, respectivamente. En la primera se corrobora la pendiente máxima de acuerdo con los documentos técnicos revisados [128] y en la segunda, con una relación semi logarítmica, la variación de la curvatura en valores absolutos, debido a que el programa de simulación considerado evalúa la curvatura para la limitación de la velocidad, despreciando la dirección de ésta.

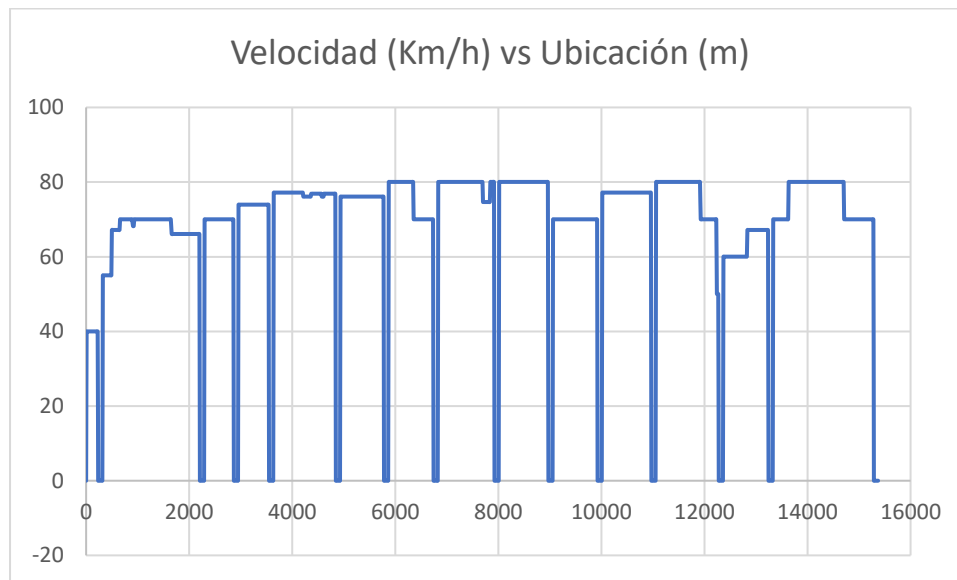


Figura 37. Variación de la velocidad objetivo por punto kilométrico. Elaboración propia.

Capítulo 3: Simulaciones y Validación

Tabla 2. Características del material rodante aportada por Metro de Panamá. Elaboración propia.

Aceleración máxima (m/s ²)	1	Factor de potencia	0.96
Desaceleración máxima (m/s ²)	0.9	Masa del tren (t)	155.875
Potencia en llantas máxima (kW)	2385.5	Masa adherente (t)	124.7
Potencia de frenado Máxima (kW)	5000	Porcentaje de regeneración	0.96
Esfuerzo de tracción máximo (kN)	264.24	A (daN)	254.7648
Esfuerzo de tracción punto de la recta (kN)	264.24	B (daN/(km/h))	2.16048
Punto de velocidad de recta (km/h)	32.5	C (daN/(km/h) ²)	0.059
Punto de velocidad de curva hiperbólica (km/h)	32.5	Esfuerzo de frenado máximo (kN)	250
Velocidad máxima (km/h)	80	Punto de velocidad de curva hiperbólica (km/h)	72
Potencia de servicios auxiliares (kW)	207.493	Longitud del tren (m)	86.094

La simulación fue realizada considerando las exigencias pico de la línea de Metro, en donde hay una circulación de 27 trenes con intervalos de 2 minutos. Dicho conteo de trenes es representado en el programa como el doble, para así simular los trayectos ida y vuelta como si fuesen 2 trenes en vez de uno, proporcionando el desplazamiento de 54 trenes. La Figura 40 representa el desplazamiento kilométrico de cada tren, en donde cada línea de pendiente positiva representa un tren en la dirección de ida, y cada línea de pendiente negativa representa un tren en la dirección de vuelta. Se aprecia que realiza un total de 14 paradas, distinguidas en la gráfica por aplanamientos en la curva. Dichas paradas representan las 14 estaciones de pasajeros del Metro. Asimismo, es apreciable que cada uno logra recorrer los 15 km en 23 minutos. Otra característica importante por distinguir es el punto de encuentro de trenes, en dirección contraria, en la curva aplanada. Esto indica que el punto de parada en la estación se invierte dependiendo de dónde venga el tren. Toda la circulación son 1 hora 18 minutos, los cuales presentan zonas de alta demanda entre el minuto 14 y el minuto 60, aproximadamente. Ese periodo debería coincidir con los puntos de alto requerimiento energético.

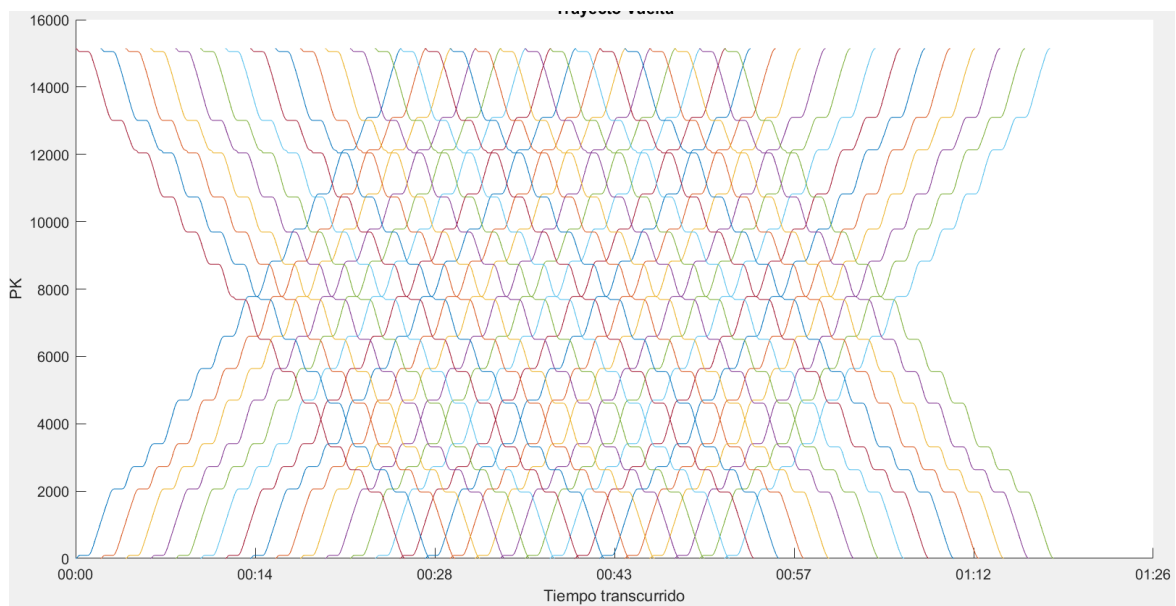


Figura 40. Malla de circulación resultante. Elaboración propia.

La Figura 41 plasma el desarrollo de la velocidad real desarrollada por el simulador para lograr las consignas cargadas a éste. Lo más importante a destacar es que el resultado revela que en ningún momento la velocidad real sobrepasó los límites para conseguir los requerimientos “posición vs tiempo” de la circulación. La curva roja, velocidad máxima por tramos, siempre debe estar por encima de la azul, velocidad real, de esa manera se corrobora el óptimo desarrollo de la simulación.

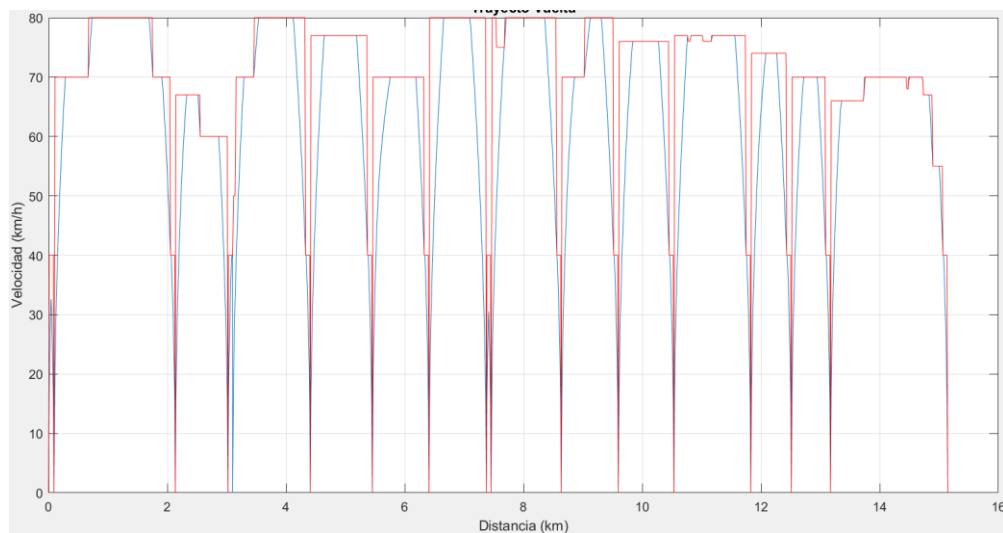


Figura 41. Distribución espacial de la velocidad máxima (roja) y la evolución de la velocidad real (azul). Elaboración propia.

3.2. Validación eléctrica

El propósito de la simulación eléctrica es estimar el flujo de energía a través de la catenaria hacia los trenes y en sentido contrario. Por lo tanto, los parámetros por inspeccionar son la potencia y tensión, considerando sus valles y picos. La primera indica la capacidad del sistema eléctrico en satisfacer los requerimientos dinámicos de la movilización de personas, y el segundo la respuesta en cuanto calidad de la energía ante dicho requerimiento.

La línea 1 cuenta con 8 subestaciones de tracción (Tabla 3) ubicadas con una estación de pasajeros en medio, aproximadamente. Todas están equipadas con transformadores de 3.5 MW y rectificadores de diodos con filtrado inductivo de 6 pulsos de 3.15 MW. La primera subestación de tracción y la última cuenta con dos unidades de éstas en paralelo, así componiendo una unidad de 12 pulsos de 6.30 MW.

Tabla 3. Ubicación de estaciones de pasajeros y subestaciones de tracción (sombreado). Elaboración propia.

Estaciones	pk
Albrook	0.091
5 de Mayo	2.065
La Lotería	2.724
Santo Tomás	3.407
Iglesia Del Carmen	4.703
V. Argentina	5.638
Fernández De Córdoba	6.600
El Ingenio	7.782
12 de Octubre	8.828
Pueblo Nuevo	9.783
San Miguelito	10.827
Pan de Azúcar	12.135
Los Andes	13.101
San Isidro	15.145

La Tabla 4 muestra los resultados de la simulación ante el dimensionamiento de las estaciones instaladas. Los valores “med” seguidos de un número representan los periodos de integración para el cálculo de las potencias en cuestión; así se considera la cantidad de trenes simultáneos en los distintos periodos. Los resultados presentan la capacidad instalada necesaria para cumplir las consignas de velocidad y tiempo entre trenes con la aceleración nominal indicada. De todas maneras, de acuerdo con algunas recopilaciones [144], [145], la aceleración comúnmente utilizada para la explotación de la línea ronda los 0.65 m/s^2 hasta más allá de 1.0 m/s^2 , aunque con 1.0 m/s^2 o superior se expone la seguridad de los pasajeros, especialmente en la salida de las estaciones. Además, la utilización de una aceleración u otra se ve grandemente influida por el factor humano, a menos que sean vehículos autónomos. Esto explica el hecho de que la potencia instantánea, que es el dato de dimensionamiento necesario, supere la potencia nominal de varios rectificadores del sistema. Sin embargo, sería un dimensionamiento en condiciones extremas.

Metro de Panamá: estimación y aprovechamiento alternativo de la energía del frenado regenerativo

Tabla 4. Dimensionamiento de las unidades tractoras de las subestaciones. *Elaboración propia.*

Unidades en Subestaciones	Pmed (MW)	Pmed5' (MW)	Pmed15' (MW)	Pmed30' (MW)	Pinst (MW)
1	0.3644	0.4847	0.4578	0.439	1.5153
1	0.8779	1.1791	1.1252	1.0974	2.769
2	1.3013	1.5858	1.5553	1.5422	3.7295
3	1.9916	2.6545	2.5521	2.5034	5.5788
4	2.0015	2.6131	2.5	2.4446	4.7154
5	2.1762	2.7833	2.6925	2.6494	5.1538
6	1.9226	2.4092	2.3165	2.2727	4.5244
7	2.1656	2.656	2.5118	2.456	5.7378
8	1.1564	1.5417	1.4812	1.4503	3.7341
8	0.1272	0.1716	0.1617	0.1569	0.9481

La Figura 42 y Figura 43 representan la variación de la tensión a lo largo del trayecto, en dirección “ida” y “vuelta”, respectivamente. El sistema de catenaria rígida doble vía en cuestión tiene una tensión nominal de 1500 V en corriente continua. Se visualiza ampliamente que la tensión varía en una banda máxima de **15 V**, equivalente al 1%. Esta banda de fluctuación es insignificante para el óptimo funcionamiento de los trenes y para el correcto funcionamiento de las protecciones. En las líneas de Metro no son usuales fluctuaciones tan moderadas, como se ha inspeccionado en la revisión bibliográfica del inicio; esto es así por el pequeño espaciamiento existente entre las subestaciones de tracción, que demuestran la buena calidad de diseño de la línea en cuestión. Aunque la característica de tensión sea considerablemente positiva, se puede destacar la asimetría que existen entre ambas ocasionada por la diferente percepción de la pendiente del trayecto mostrada en la Figura 38. En el tramo de ida la pendiente está mayormente a favor del movimiento, ocasionando el efecto contrario en la vuelta. Esto también se intuye en la Figura 44 y Figura 45 en donde el trayecto de vuelta presenta picos más elevados de potencia que de ida mientras que ambos presentan cantidades similares de potencia mínima.

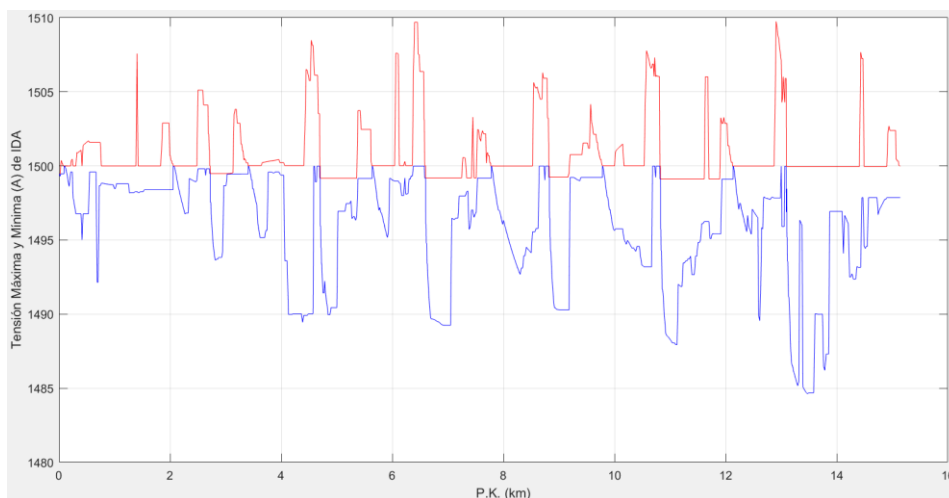


Figura 42. Variación de la tensión máxima y mínima en el trayecto de ida. *Elaboración propia.*

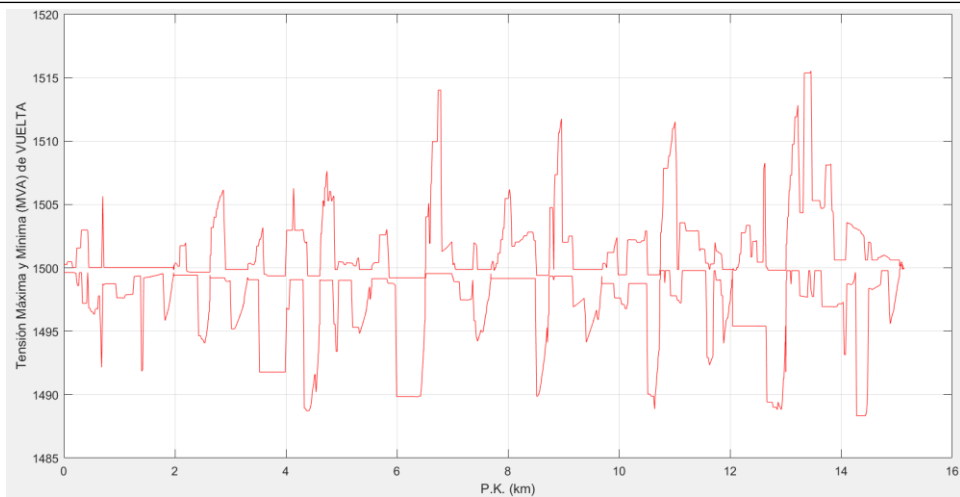


Figura 43. Variación de la tensión máxima y mínima en el trayecto de vuelta. Elaboración propia.

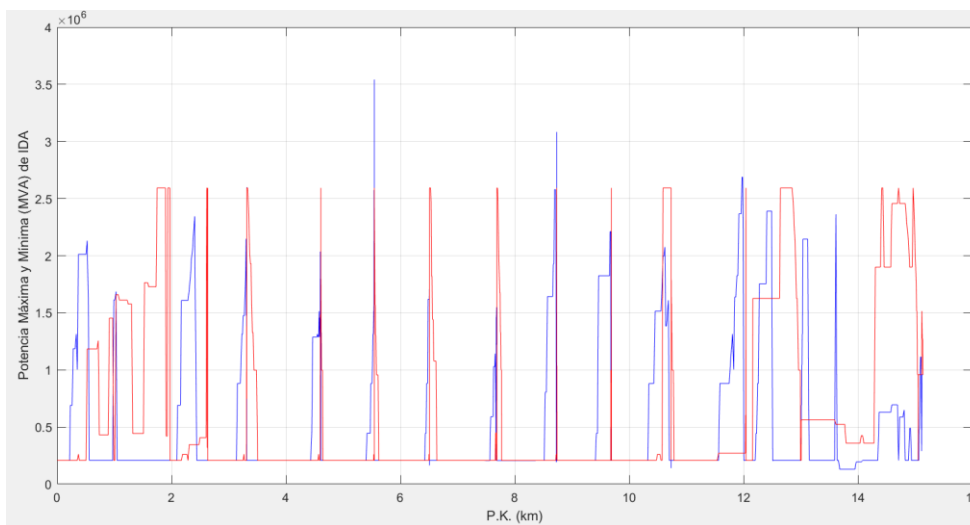


Figura 44. Potencia máxima y mínima en el trayecto de ida. Elaboración propia.

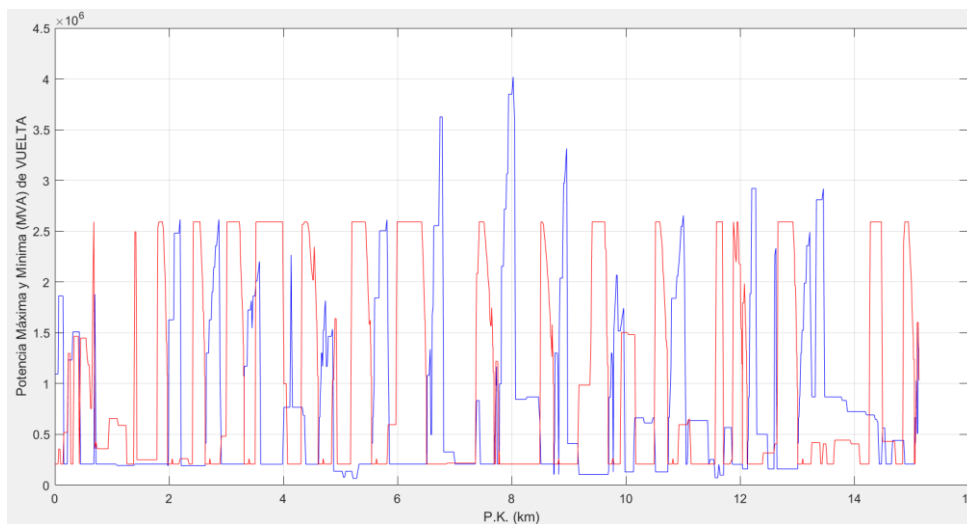


Figura 45. Potencia máxima y mínima en el trayecto de vuelta. Elaboración propia.

3.3. Cuantificación del recurso

Previo a considerar cuánta energía realmente se consume por parte de los trenes, es necesario establecer una comparación respecto al consumo real registrado por la Línea 1 del Metro. Según la información proporcionada, esta está alimentada por dos acometidas distintas (denominadas LAN y CMA); sin embargo, los medidores no distinguen entre el consumo propio del movimiento de personas de las estaciones (aire acondicionado, control, comunicaciones, etc.). Indistintamente, la Figura 46 representa el promedio de cada hora en el mes de enero del año 2021. El diagrama de dispersión representa la media aritmética de cada hora, destacando los momentos pico de consumo, que ocurren a las horas 7, 8, 17 y 18.

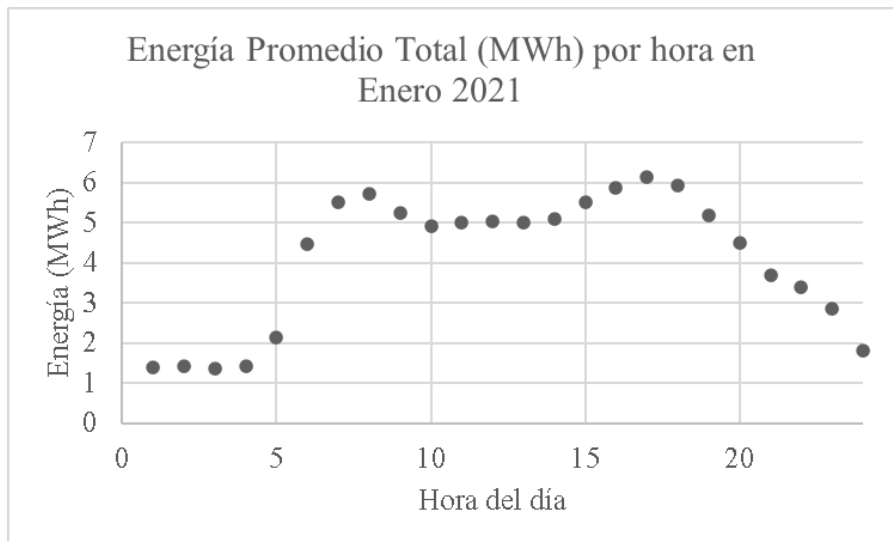


Figura 46. Promedio hora a hora de la Línea 1 en enero 2021. Elaboración propia.

Como se ha simulado el comportamiento del tren de acuerdo con el perfil necesario para suplir la demanda en horas pico, se enfoca el estudio únicamente en esos puntos. La Tabla 5 contiene los resultados de un conciso análisis estadístico de las horas en cuestión. Aquí se aprecia el promedio, el máximo y la desviación de los consumos energéticos, en donde el primero coincide totalmente con la gráfica anteriormente señalada.

Es interesante destacar que hay una desviación considerable, debido a la poca singularidad de la demanda existente de pasajeros. Consecuente a esto, y a la naturaleza del simulador, se seleccionan los datos máximos para establecer la comparación entre consumo real y simulado.

Tabla 5. Análisis estadístico de los consumos (MWh) de las horas pico en enero 2021. Elaboración propia.

Hora	Acometida	Promedio	Máximo	Desviación
7	LAN	2.6699	4.1388	1.4865
	CMA	2.8517	4.1390	1.2027
8	LAN	2.6144	3.9832	1.4233
	CMA	3.1135	4.5398	1.2145
17	LAN	2.6933	4.1166	1.4613
	CMA	3.4424	4.8167	1.1904
18	LAN	2.6618	4.3622	1.5097
	CMA	3.2671	4.7847	1.1504

Atendiendo a las condiciones nominales de simulación, se obtiene la Figura 47 y Figura 48. Se obtienen totalizando los flujos de potencia a lo largo del tiempo sin considerar la ubicación de estos. Dicho procedimiento pretende elaborar un equivalente de consumo independiente del espacio, pero totalmente dependiente del tiempo en cual se consigue visualizar la demanda energética desde el punto de vista del material rodante y de las subestaciones. De esta manera, se obtiene en cada instante la potencia demandada por el conjunto de trenes y suministra por el conjunto de subestaciones. Las dos últimas gráficas de dichas figuras se obtienen filtrando la característica de la primera gráfica de acuerdo con la dirección de la potencia. Al superponer todos los trenes en el tiempo ya se considera el frenado regenerativo de unos siendo aprovechado por otros, y el excedente es la potencia que podría aprovecharse de alguna otra forma.

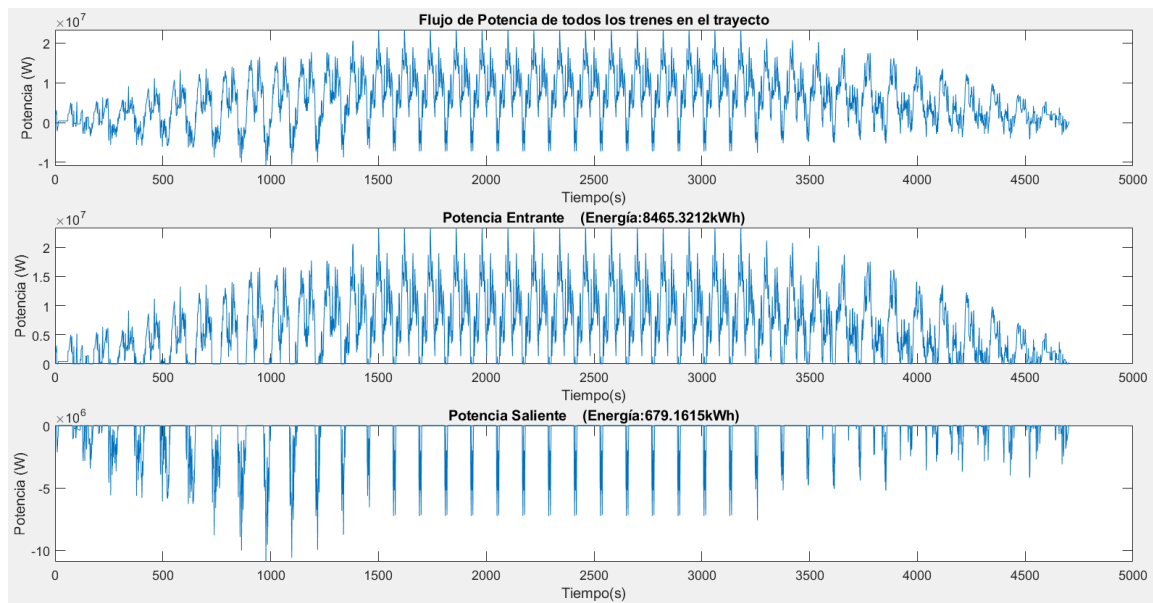


Figura 47. Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes. Elaboración propia.

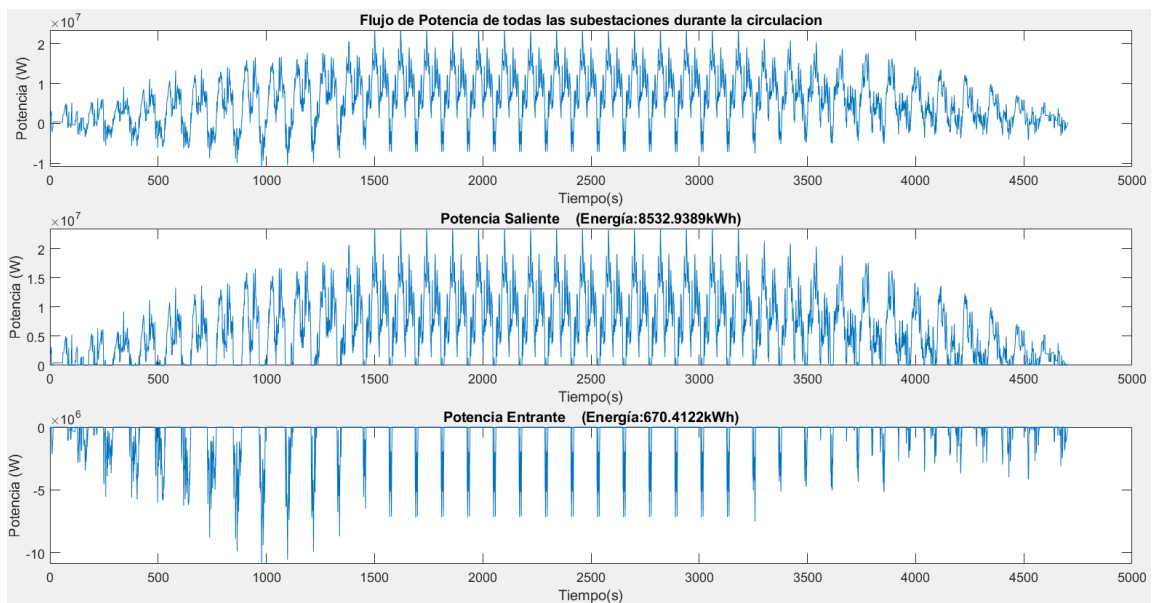


Figura 48. Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones. Elaboración propia.

Totalizando la energía en lapsos de segundos (Ws) y calculando la total durante la circulación desarrollada, se consigue la energía realmente transformada en trabajo por parte

de los trenes (8465.3212 kWh) y la inyectada por estos durante el frenado (679.1615 kWh). Es apreciable notar la consistencia con los resultados de las subestaciones, en donde éstas entregan un poco más (8532.9389 kWh) y reciben un poco menos (670.4122 kWh). Los resultados proporcionan una regeneración de **8%** y pérdidas de 0.79%. Se acota el valor de energía consumida por las subestaciones a un periodo de 1 h, para así compararlo con la Tabla 5. El consumo total en 1h es 6528.55 MWh, lo que representa un error mínimo de **21.1273%** y máximo de **28.3261%**. Si supone que el consumo en las primeras horas del día es propio de las estaciones y no de los trenes, se obtiene un error mínimo **5.4848%** y máximo de **11.5226%**.

3.3.1. Otras condiciones de explotación

Resulta interesante y necesario estudiar cómo se comportaría eléctricamente el sistema a otras aceleraciones (0.4 m/s^2 y 0.7 m/s^2), esto se realiza con el fin de estudiar la variabilidad de la aceleración explotada en el sistema, considerando que es un parámetro que delimita el grado de explotación y consumo, y porque la información proporcionada por el Metro de Panamá contempla condiciones nominales impuestas por el diseño y el fabricante, pero no las condiciones reales de explotación a lo largo del tiempo. Dicha imprecisión, considerando que se desea comparar resultados de simulación con datos reales, impone la necesidad de obtener el error del modelo ante distintas condiciones con tal de hacer un barrido dentro de las posibles condiciones reales de operación.

La Figura 49 demuestra que hay una reducción del consumo del 2.2%; la Figura 50 proporciona la misma reducción, tal y como se podía esperar. Debido a la reducción en la aceleración, el porcentaje de regeneración disminuye a un **3%**. Considerando el consumo en esta condición se obtiene un error mínimo, respecto al consumo real, de **26.2878%** y un máximo de **31.0156%**. Si se realiza la misma suposición sobre el consumo de las estaciones de pasajeros previamente comentada, se consigue un error mínimo de **11.3116%** y un máximo de **17.3116%**. Se evidencia un leve incremento en el error absoluto, debido a que un límite de 0.4 m/s^2 es una consideración muy conservadora; por lo que se procede a estudiar una aceleración intermedia.

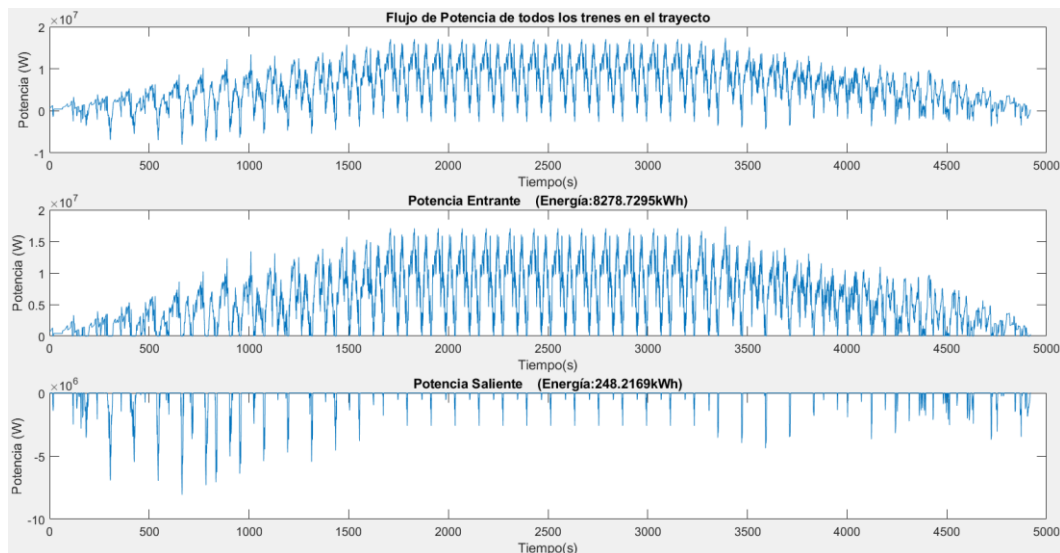


Figura 49. Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes a 0.4 m/s^2 en hora pico. Elaboración propia.

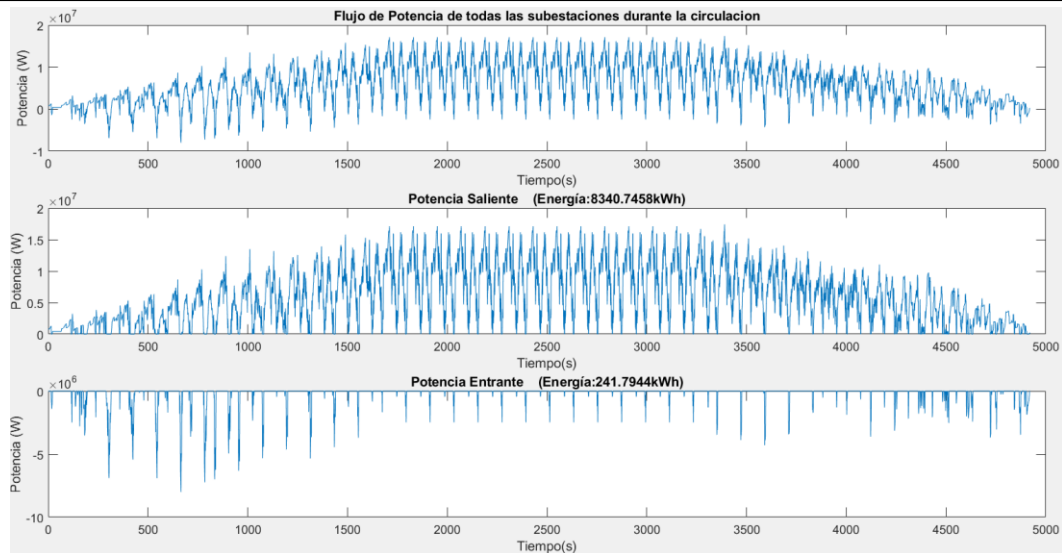


Figura 50. Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones a 0.4 m/s^2 en hora pico. Elaboración propia.

La Figura 51 y Figura 52 evidencian un aumento en el consumo energético y en la energía regenerada, representando una regeneración del **12.5%**. Asimismo, se obtienen pérdidas del 0.6827%. Referente al error respecto del consumo real, se obtiene un error máximo teórico del **25.465%** y un mínimo de **17.9789%**; mientras que si se realiza la asunción anteriormente mencionada sobre el consumo base de la Tabla 5, se obtienen errores máximo y mínimo del **8%** y **1.72%**, respectivamente.

En cualquiera de los casos supuestos, que pretenden simular las condiciones pico nominales y picos nominales ajustadas, se consigue una banda de error aceptable, considerando la imprecisión de los datos suministrados por la autoridad del Metro de Panamá y la metodología de resolución que emplea el simulador en cuando la consideración de situaciones extremas.

La Tabla 6 contiene las potencias máximas registradas por cada una de las unidades de las subestaciones a las aceleraciones estudiadas. Se aprecia como aceleraciones máximas inferiores someten a los equipos de tracción a menores exigencias, que se representa en necesitar equipos menores o a sobre cargarlos en menor magnitud.

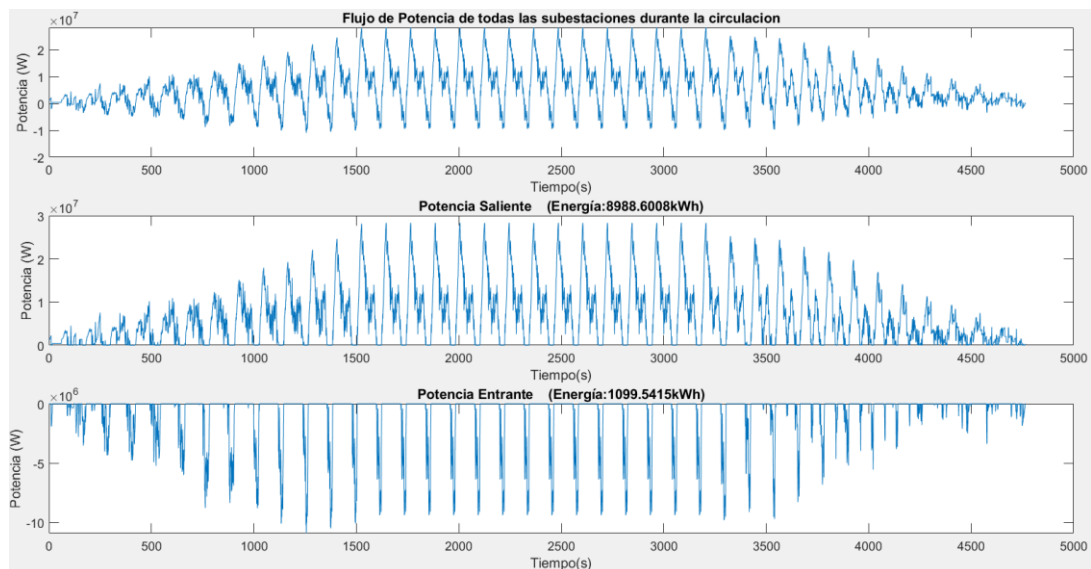


Figura 51. Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones a 0.7 m/s^2 en hora pico. Elaboración propia.

Metro de Panamá: estimación y aprovechamiento alternativo de la energía del frenado regenerativo

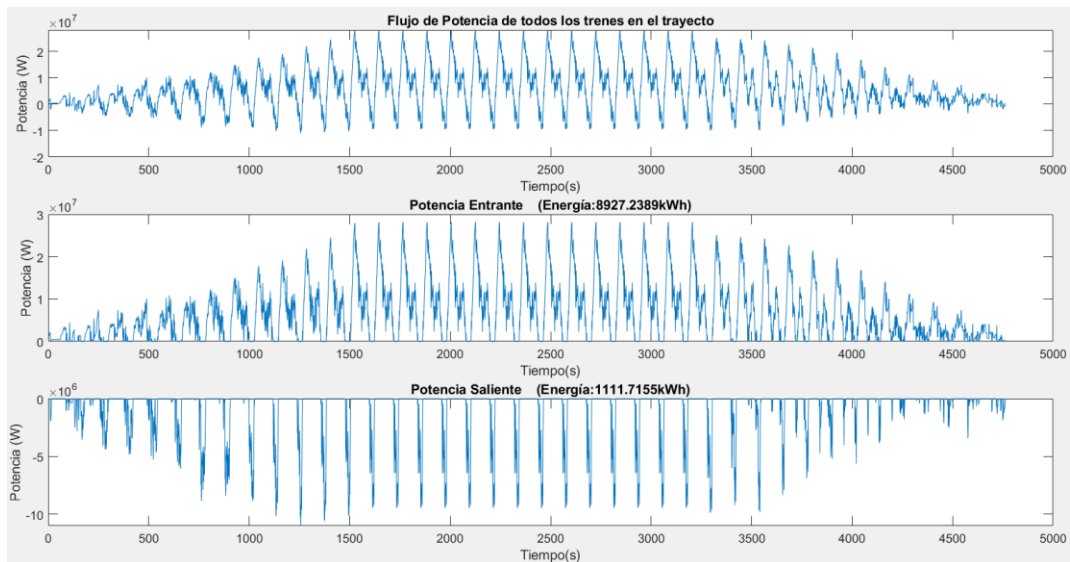


Figura 52. Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes a 0.7 m/s^2 en hora pico. Elaboración propia.

Tabla 6. Potencias máximas requeridas por parte de las subestaciones para suplir la demanda en hora pico. Elaboración propia.

Unidades en Subestaciones	P-1 (MW)	P-0.7 (MW)	P-0.4 (MW)
1	1.5153	1.0812	0.6156
1	2.769	2.1841	2.1380
2	3.7295	4.8614	4.3406
3	5.5788	4.3490	4.9283
4	4.7154	4.5755	4.7838
5	5.1538	5.2833	4.9475
6	4.5244	4.9014	5.9378
7	5.7378	6.3642	5.3789
8	3.7341	2.8268	2.2340
8	0.9481	0.6475	0.4004

3.3.2. Circulación en horas valle

La circulación habitual de la línea 1 no es la simulada en la sección anterior, sino que tiende a mantener 14 trenes circulando a intervalos de 4 minutos y 10 segundos. De igual manera, se explota a las condiciones nominales impuestas en la circulación pico. Sin embargo, se consideran las distintas aceleraciones para conseguir un rango de operación posible y, consiguientemente, una estimación razonable de la energía del frenado regenerativo.

La Figura 53 y Figura 54 representan el comportamiento energético de los trenes en la circulación en horas valle a condiciones nominales. En este caso, presenta una razón de regeneración del **13.22%** y pérdidas del 0.643%. Además, si se compara con la marcha en hora pico, se consigue una reducción del 82% del consumo energético, pero solamente una reducción del 9.44% de la energía del frenado regenerativo.

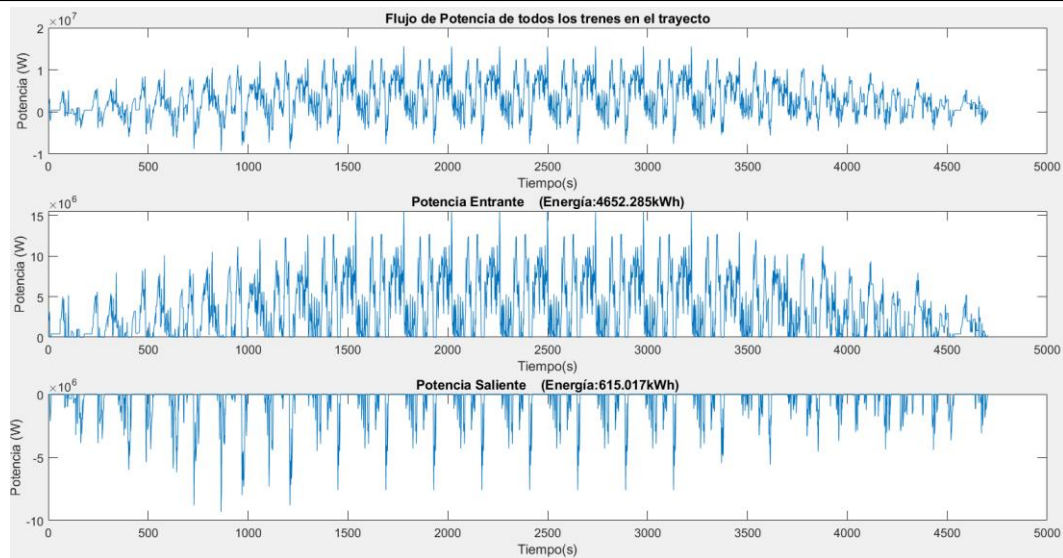


Figura 53.Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes a 1.0 m/s² en hora valle. Elaboración propia.

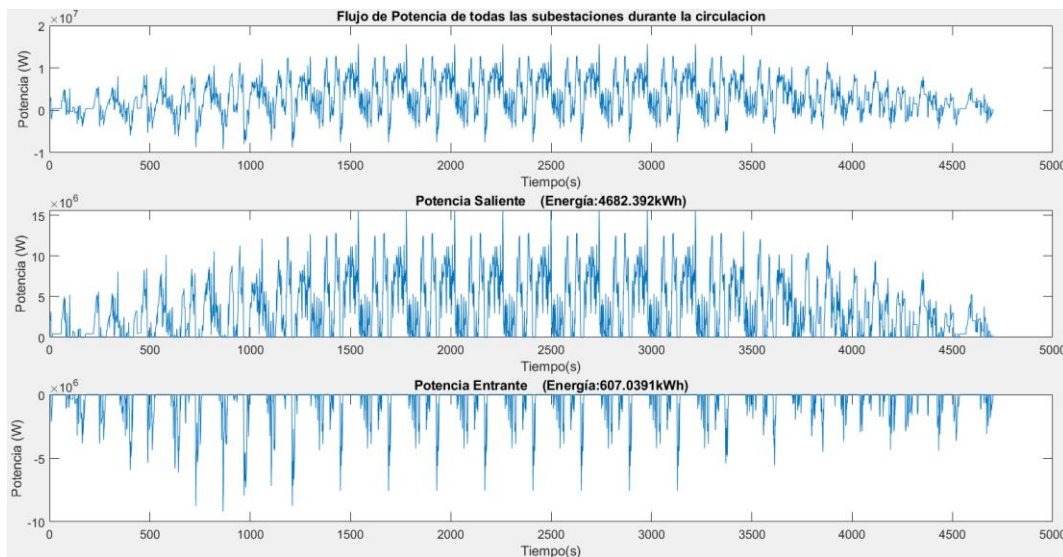


Figura 54.Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones a 1.0 m/s² en hora valle. Elaboración propia.

Si se simula la marcha en horas valle a una aceleración de 0.4 m/s², se obtienen las características mostradas en la Figura 55 y Figura 56, en donde el consumo energético equivalente no disminuye apreciablemente, pero la energía del frenado sí disminuye en un 61%. Bajo estas condiciones de explotación, se consigue una razón de regeneración del **5.4%** y pérdidas rondando el 0.6%.

Metro de Panamá: estimación y aprovechamiento alternativo de la energía del frenado regenerativo

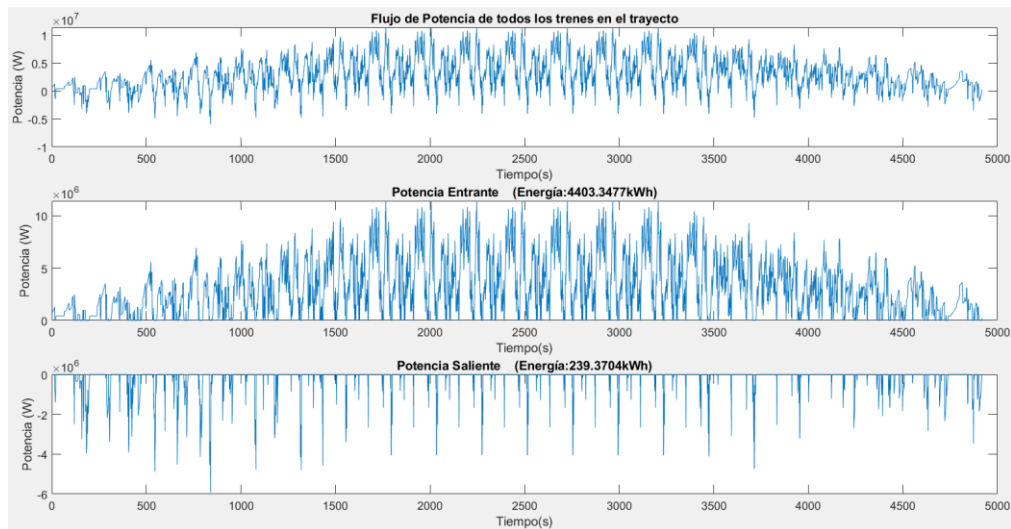


Figura 55. Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes a 0.4 m/s^2 en hora valle. Elaboración propia

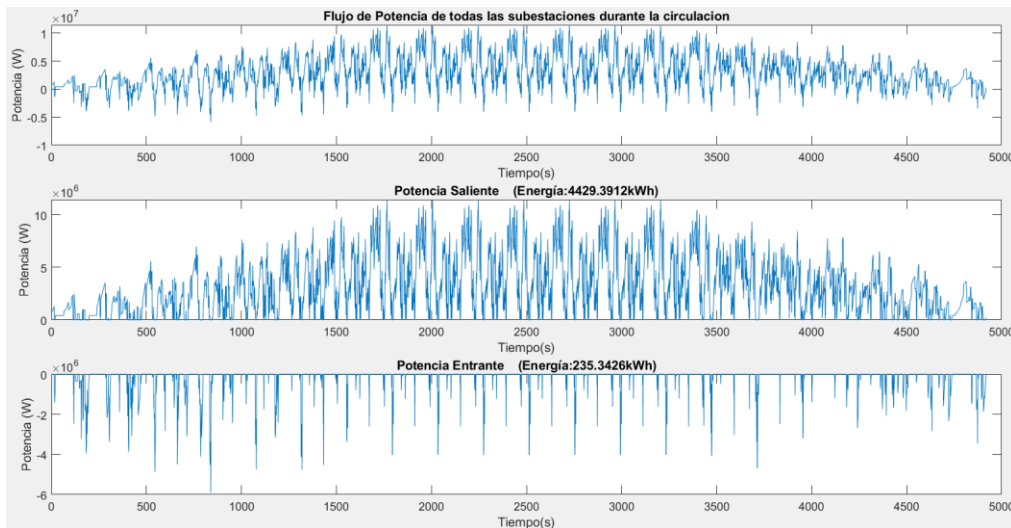


Figura 56. Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones a 0.4 m/s^2 en hora valle. Elaboración propia.

Para la explotación a 0.7 m/s^2 el consumo energético solamente aumento por aproximadamente 200 kWh, pero la energía del frenado aumenta en 21.5%, proporcionando una razón de regeneración del **15.57%** y pérdidas asociadas de 0.61%. Conjuntamente, la Tabla 7 contiene los requerimientos máximos de los rectificadores en la instalación. Idénticamente que, en la compilación anterior de potencias, algunas unidades presentan cantidad de potencia superior a la nominal. Sin embargo, dichos picos se presentan en pocas ocasiones en las simulaciones presente y, además, están considerando condiciones de operación extremas de alto requerimiento, por lo que basarse completamente en los resultados aportaría un galibo de seguridad.

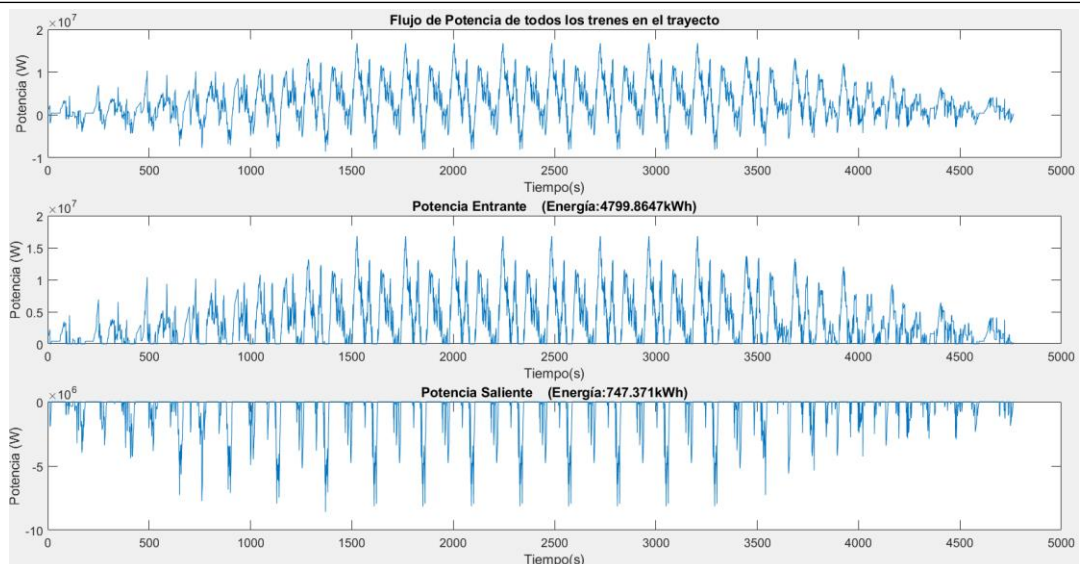


Figura 57. Resultado de flujo de cargas: Análisis de los trenes a 0.7 m/s^2 en hora valle. Elaboración propia.

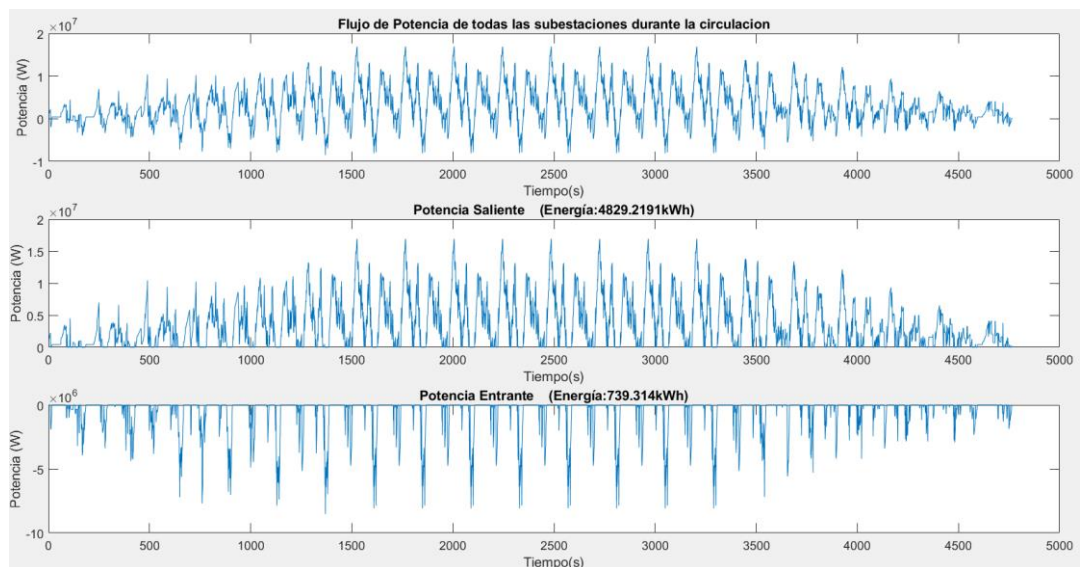


Figura 58. Resultado de flujo de cargas: Análisis de las subestaciones a 0.7 m/s^2 en hora valle. Elaboración propia.

Tabla 7. Potencias máximas requeridas por parte de las subestaciones para suplir la demanda en hora valle. Elaboración propia.

Unidades en Subestaciones	P-1 (MW)	P-0.7 (MW)	P-0.4 (MW)
1	1.5120	1.0812	0.6148
1	2.7685	1.9663	2.1273
2	2.6533	3.4296	2.5052
3	3.6889	2.8022	2.7708
4	3.1371	2.7976	3.1021
5	2.9475	2.6784	2.5458
6	3.2746	2.8885	3.6453
7	3.1752	3.5132	3.2188
8	3.6473	2.5851	2.2395
8	0.9481	0.6475	0.4004

CAPÍTULO 4

Resultados finales y exploración del aprovechamiento

Como punto de partida es apropiado relacionar la cantidad de la energía del frenado regenerativo con los consumos reales de la Línea 1 del Metro de Panamá. Para esto, se considera la energía entrante total al conjunto de subestaciones durante el periodo de circulación en cada uno de los estudios de explotación, cuyos resultados equivalentes se encuentran en la Tabla 8. Estos se calcularon con el cociente entre la energía entrante con el tiempo de circulación en horas. Dicho cálculo pretende normalizar el contenido energético disponible en cada caso al mismo periodo para así comparar apropiadamente las distintas disponibilidades y estimar lo aprovechable del recurso.

Tabla 8. Potencia regenerativa promediada a 1 hora en cada tipo de marcha con cada grado de explotación evaluado. Elaboración propia.

Potencia Promedio horaria (kW)			
Tipo de Marcha	Aceleración máxima (m/s ²)		
	1	0.7	0.4
Hora Valle	464.4720	558.4411	172.1669
Hora Pico	512.9615	839.7347	176.8868

Si se promedian todas las horas del mes, como en la Figura 46, y se escalan para representar el consumo diario se obtiene un consumo promedio de **98.6748 MWh**. Es notable la diferencia en orden de magnitud respecto de los resultados de la Tabla 8. Si se considera que el horario de operación del Metro es de 5:00am a 10:00pm de lunes a viernes, en el cual 4 horas son pico y el resto valle, se obtiene que son necesarios 12.2, 9.3 y 33.5 días de acumulación de frenado regenerativo a 1.0, 0.7 y 0.4 m/s², respectivamente, para cubrir la demanda diaria de la línea entera (Tabla 10).

Además, de acuerdo con los porcentajes de regeneración obtenidos en los resultados, oscilantes entre 3% y 15.57% dependiendo del caso, se obtiene que son necesarios de **33 a 6 ciclos** de circulación para cubrir la demanda de éstos, respectivamente en los casos extremos. La Tabla 9 contiene las respectivas relaciones, que indican que serían necesarios **7.5, 6,4 y 18.5 ciclos** de circulación en horas valle para cubrir la demanda de los trenes en hora valle en cada grado de explotación, respectivamente, y **12.5, 8 y 33.3 ciclos** de circulación de horas pico para cubrir la demanda pico bajo las mismas condiciones previamente establecidas (Tabla 10).

Tabla 9. Razón de Regeneración en cada tipo de marcha con cada grado de explotación evaluado. Elaboración propia.

Razón de Regeneración (%)			
Tipo de Marcha	Aceleración máxima (m/s ²)		
	1	0.7	0.4
Hora Valle	13.22	15.57	5.40
Hora Pico	8.00	12.50	3.00

Respecto a las horas valle, es posible acumular dicha energía bajo las dos primeras aceleraciones máximas. Sin embargo, las horas pico no tienen suficiente presencia a lo largo del día para cubrir un ciclo de circulación pico

Expuesto lo anterior, parece razonable considerar otras actividades en donde se pueda aprovechar la energía de manera más provechosa y apreciable. Sí es válido usar la energía estimada para suplir las instalaciones del Metro y los trenes, parcialmente, pero no representaría un valor agregado más que reducir los costos energéticos mensuales además de que la recuperación en el tiempo sería considerablemente lenta, considerando que los costos de adquirir e instalar sistemas de almacenamiento o subestaciones reversibles son similares a instalar otra subestación de tracción, pero aportando el consumo diario después de 12 a 34 días de regeneración acumulada (Tabla 10).

Tabla 10. Cantidad de ciclos de circulación y días operativas para cubrir la demanda horaria por marcha y demanda diaria. Elaboración propia.

Ciclos necesarios por consumo horario del ciclo			
Tipo de Marcha	Aceleración máxima (m/s ²)		
	1	0.7	0.4
Hora Valle	7.56	6.42	18.52
Hora Pico	12.50	8.00	33.33
Días necesarios por consumo diario de operación			
Enero2021	12.20	9.30	33.50

4.1. Exploración de formas de aprovechamiento

En la revisión bibliográfica presentada es posible notar que la mayoría de los autores desarrollan las investigaciones ferroviarias sin salir del entorno circunscrito a éste, es decir, que el aprovechamiento de la energía del frenado regenerativo se enfoca exclusivamente en alimentar a la operación de los trenes o a las estaciones de pasajeros y consumos auxiliares genéricos.

Partiendo de esta realidad, hay un gran campo de exploración en el cual se puede estudiar la interacción del ferrocarril con su entorno (Figura 59) y cómo puede influir en las actividades y planificación urbana. En primera instancia, se pretende considerar la energía del frenado regenerativo para:

- Suministro de energía eléctrica para estaciones de carga de vehículos eléctricos.
- Producción de “hidrógeno verde” mediante estaciones electrolizadoras.
- Fuente de abastecimiento auxiliar para cargas críticas o de interés particular.

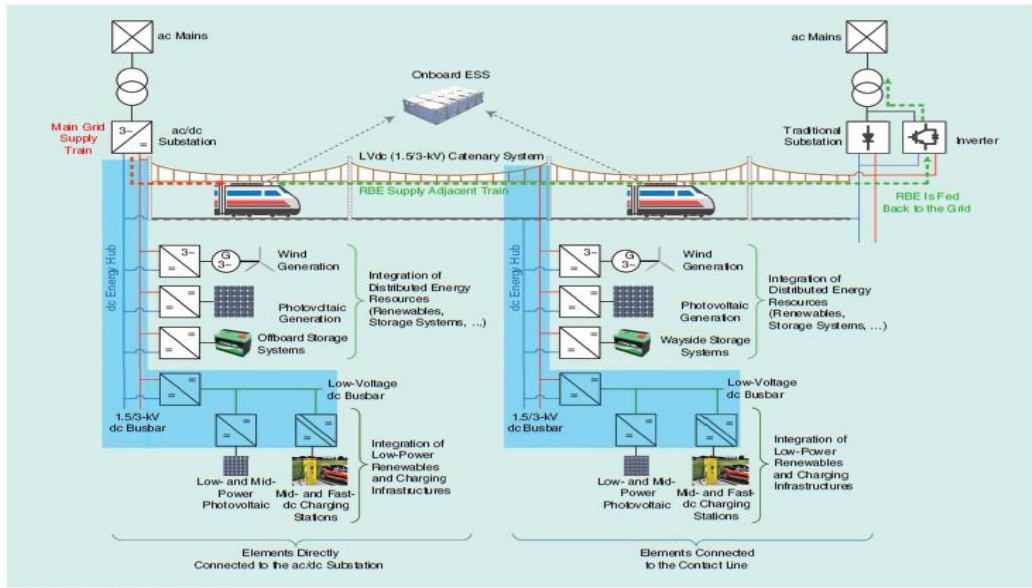


Figura 59. Esquema general de acople de una catenaria en corriente continua con una microrred [113].

De cualquier tipo de aprovechamiento contemplado, así como otros posibles de naturalezas similares, la Figura 59 representa la solución a la conectividad entre una catenaria en corriente continua y una red cualquiera. En esta se establece la posibilidad de realizar la derivación de la catenaria a la red en cuestión (o microrred) en las subestaciones de tracción o directamente al hilo de contacto. Los diferentes sistemas conectados se acoplarían mediante convertidores electrónicos DC-DC o DC-AC según sea el caso y el propósito.

4.1.1. Estaciones de carga de vehículos eléctricos

El diseño e instalación de estos sistemas alrededor del mundo ya lleva años de avances, por lo que no es una tecnología necesariamente moderna, aunque está en constante mejoramiento. De acuerdo con la recopilación de P. Moreno Torres [146], se visualizan los cuatro modos de carga definidos por la IEC 61851-1: enchufe convencional; enchufe convencional con cable dedicado; enchufe específico y cable dedicado; y cargador externo. Se diferencia el último modo de los demás por implementar un cargador externo en vez del interno del vehículo; debido a esto, el cuarto modo de carga se caracteriza por ser de carga rápida en espacios públicos, por la disposición de la tensión en continua en vez de en alterna debido a la electrónica de potencia involucrada, que es aquella que determina la velocidad y efectividad de la carga.

Considerando la naturaleza de la catenaria del Metro de la Línea 1, ya se tiene disponible la tensión DC, por lo que se podría conectar la derivación de la catenaria a un enlace de continua en donde, a su vez, se conecten equipos de almacenamiento, los cargadores para vehículos eléctricos y cualquier otro tipo de generación en continua o en alterna, si primero se realiza la transformación correspondiente (Figura 59).

Distintos autores se han enfocado en el diseño de estaciones de vehículos involucrando generación distribuida, energías renovables, cargas variables y rentabilidad del proyecto: Kumarsinh *et al.*, [147] estudia la coordinación apropiada de los perfiles de carga de vehículos eléctricos, baterías, variaciones de precios de la energía de la red y generación solar y eólica, en pro de rentabilizar la inversión mediante una solución lineal al algoritmo de optimización que maximiza la ganancia neta. En este caso, los perfiles de sol, viento, vehículos por recargar y SOC's de sus baterías se generaron mediante la superposición de modelos predictivos genéricos con el modelo gauseano de variables aleatorias con promedio

nulo para estimar el error; Domínguez-Navarro *et al.*, [148] realiza un estudio similar del diseño de una estación de carga rápida, pero generando los perfiles de generación renovable y los de frecuencia de vehículos por recargar con el Método de Monte Carlo y maximiza el valor presente neto con algoritmo genético; Ashish *et al.*, [149], Hafez *et al.*, [150] y Aldhanhani *et al.*, [151] también diseñan óptimamente estaciones de carga con múltiples fuente de energía, incluyendo biodigestores y un enfoque a reducir la producción de dióxido de carbono equivalente, pero utilizando la Plataforma de Optimización Híbrida (HOMER) que es un software diseñado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos para planificar y diseñar micro redes basadas en energías renovables. Éste tiene la capacidad de optimizar y modelas una basta cantidad de sistemas energéticos y eléctricos, por lo cual fue implementado por ambos autores para minimizar el costo del ciclo de vida de la estación y maximizar el valor presente neto. En estos casos los autores no produjeron los datos de la producción de energías renovables ni el perfil de frecuencia de carga de los vehículos eléctricos, sino que usaron mediciones de irradiancias, velocidades del viento y comportamiento de los vehículos mediante dispositivos instalados en éstos.

La Figura 60 ejemplifica las posibilidades de integración de fuentes de generación para abastecer una estación de carga. Se visualizan cuatro posibilidades consideradas en el estudio que se definen de acuerdo con los tipos de generación y gestión de la energía. Para la aplicación en cuestión, es importante notar la alternativa de los enlaces en alterna o en continua que permiten realizar carga de vehículos en AC o DC. En el esquema se considera la carga de vehículos en continua por el objetivo de diseñar una estación de carga rápida.

Considerando las curvas características del frenado regenerativo de los trenes, es válido comparar dicha inyección de corriente como la que realizaría la generación fotovoltaica y eólica en donde no hay una gestión del recurso, pero sí una calidad de la energía inyectada (puede variar en generación eólica dependiendo de la topología de generación escogida). Por lo tanto, se podría realizar una conexión de la catenaria al enlace de continua mediante un convertidor DC-DC, que controle los niveles de tensión, y la energía estaría instantáneamente disponible para los vehículos o se podría almacenar en el dispositivo de almacenamiento seleccionado.

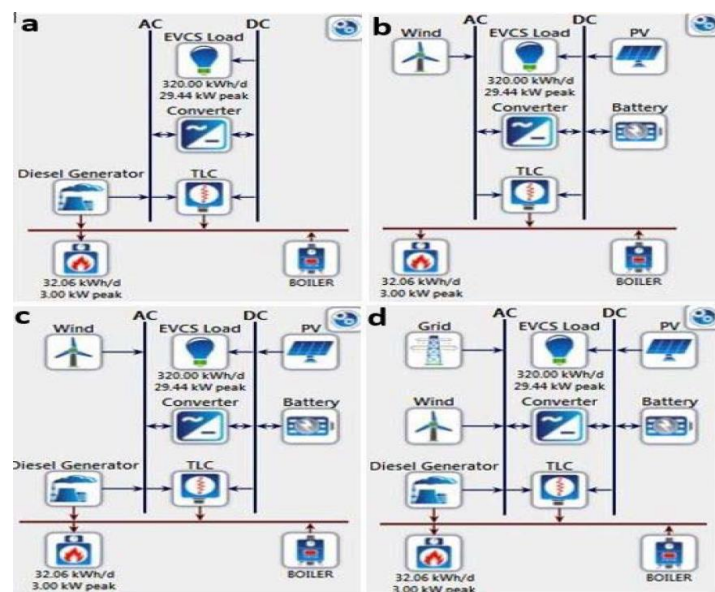


Figura 60. Esquemas representativos de estaciones de carga de vehículos eléctricos. Fuente: Aldhanhani et al., [151]

Atendiendo los resultados de la Tabla 8 junto al horario de operación habitual de la Línea 1, se puede estimar una acumulación de energía regenerativa en condiciones de explotación nominal de aproximadamente **8 MWh/día**.

Como primer enfoque, puede determinarse el alcance práctico de esa energía en función a la cantidad de vehículos eléctricos. Si se considera el modelo Yuan EV 400 de la compañía BYD, que actualmente es la que posee mejores ofertas en cuanto precio y difusión en el mercado panameño, cuya batería tiene una capacidad de 53.2 kWh, se obtiene que es posible abastecer a **152 vehículos por día**. Si además se consideran autobuses eléctricos (310 kWh), como el modelo k9 de BYD, ampliamente usado en proyectos de movilidad eléctrica a lo largo del mundo, se estima que pudieran abastecerse **26 autobuses por día**.

En principio, los resultados no representan grandes cantidades de beneficios, pero si se considera el marco del desarrollo de la movilidad eléctrica panameña, en donde según la Secretaría Nacional de Energía y Ambiente [152] habían 48 vehículos 100% eléctricos y 140 híbridos enchufables hasta marzo del 2019, se aprecia la capacidad de cargar posiblemente los 188 vehículos diarios, debido a que dicha estadística recopila los vehículos registrados desde el 2011, cuando los vehículos poseía baterías de aproximadamente 20 kWh [146]. Asimismo, es crucial distinguir que dicha tasa de carga busca recuperar la autonomía de los vehículos al 100% (200km-400km), mientras que en Panamá los océanos Atlántico y Pacífico, y los extremos del área metropolitana están distanciados 80 km y 30 km, respectiva y aproximadamente; por lo que la capacidad de 152 vehículos/día es suficiente y tiene holgura para incrementos en el tiempo de la demanda automovilística.

La composición de la estación de recarga estaría definida por un medio de almacenamiento capaz de almacenar 8MWh y con una potencia nominal no menor a la máxima del perfil de regeneración de la Figura 48; cargadores rápidos de 50 kW o super rápidos de 150 kW, en donde primero debe considerarse la fortaleza de la microrred y sus componentes; y una etapa de conversión DC-DC de 1500 V, tensión de la catenaria, a una tensión entre 400V y 1000V, tensión del enlace de continua y suministro a vehículos eléctricos. Sin embargo, debe hacerse un pronóstico de la demanda de recarga porque dependiendo del acople entre generación de energía regenerativa y demanda vehicular se necesitará más o menos capacidad de almacenamiento. Si la demanda es suficientemente continua, muy poco probablemente se llegue a tener disponibles 8MWh; asimismo, si los 8MWh no se consumen en el día, se requerirá otro manejo de la energía para nunca exceder el límite o un sistema de almacenamiento de mayor capacidad. Relacionado a dicha consideración, la selección de la cantidad de cargadores y sus respectivas potencias influyen en la coordinación “generación-consumo”, los tiempos de permanencia de vehículos y el comportamiento de los usuarios.

Otro enfoque poco usado en la literatura consultada es drenar la energía del frenado en cada subestación en vez de uno o pocos puntos. Éste se hace si se realiza un estudio de factibilidad que estudie las pérdidas por transmisión de energía en la catenaria y se concluye que es mejor tener varios centros de aprovechamiento, lo que implica más infraestructura por contemplar. Circunstancialmente, los resultados de la estimación están en la Tabla 11, en donde puede sugerirse estaciones de carga en las estaciones “Vía Argentina”, “El Ingenio”, “Pueblo Nuevo” y “San Miguelito” debido a la considerable regeneración relativa aprovechable en esas ubicaciones; y desde el punto de vista logístico, los puntos más provechosos de carga son en la estación “Albrook” y “San Miguelito”, que coinciden con la primera subestación y entre la sexta y séptima, respectivamente (Figura 19 y Tabla 3).

Tabla 11. Aprovechamiento diario por subestación de acuerdo con la repartición de la energía del frenado: Vehículos eléctricos (cantidad de automóviles o de autobuses suministrables).

Reparto del aprovechamiento en las subestaciones			
Subestaciones	Energía (MWh)	Automóviles (#)	Autobuses (#)
S1	0.5234	10	2
S2	0.885	17	3
S3	0.9756	18	3
S4	1.1827	22	4
S5	1.1469	22	4
S6	1.1703	22	4
S7	1.4407	27	5
S8	0.6754	13	2
Total	8	152	26

Es notable la participación de múltiples parámetros delimitadores que definen el sistema, recalcando la necesidad de procesos de optimización multi-objetivo tal como se han encontrado en la literatura para evitar sobredimensionamientos que, además de incrementar los costos iniciales, repercuten en los costos de operación y mantenimiento.

El aprovechamiento del frenado regenerativo en el contexto de la movilidad eléctrica ayudaría notablemente a alcanzar las metas de la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica [152] la cual espera que del 15% al 35% de los autobuses en concesionarias, 10% al 20% de vehículos privados, 25% al 40% de las ventas de vehículos particulares y 25% al 50% de vehículos de las flotas institucionales sean eléctricos.

4.1.2. Producción de Hidrógeno Verde

Suele denominarse hidrógeno verde a aquel que es producido mediante fuentes energéticas renovables. La producción de hidrógeno puede realizar mediante muchos mecanismos (termodinámicos, eléctricos, biológicos, químicos, etc.) que logran separar iones de hidrógeno de algún compuesto en particular (gas natural, agua)[153]. En cuanto al aprovechamiento de la energía del frenado de los trenes, el método de obtención de hidrógeno es mediante electrolisis, que involucra la circulación de electrones a través de la composición del agua, así desencadenando procesos de oxidación en el ánodo y reducción en el cátodo, separando el agua en iones de hidrógeno y oxígeno, en el caso más habitual. Actualmente, existe una gran variedad de equipos diseñados con tales propósitos llamados electrolizadores, que dependiendo del tipo poseen distintos electrolitos y catalizadores, permitiéndoles usar distintos reactivos y, asimismo, generando diferentes productos. La escogencia de un tipo de electrolizador u otro depende de las temperaturas de operación, tipo de reactivo, presupuesto, caudal de hidrógeno resultante y más [153], pero no es parte de este trabajo indagar en un método de selección y dimensionamiento de tipos de electrolizadores.

En la literatura se tiende a encontrar la producción de hidrógeno relacionada a una alternativa de almacenamiento para hacer gestionable las energías renovables, basándose en producirlo para almacenarlos en tanques presurizados para luego generar energía eléctrica mediante celdas de combustible. Sin embargo, el hidrógeno puede producirse para cualquier aplicación de interés (refrigerante industrial, combustible para quemar o generar electricidad, vehículos de hidrógeno, etc.) así como el oxígeno.

Basado en la premisa de generar hidrógeno para gestión de energía o almacenamiento, hay varios autores que integran los electrolizadores junto a energía solar y otros medios de almacenamiento. Nashed *et al.*, [154] sugiere una instalación aislada compuesta por un arreglo de paneles solares, un convertidor DC-DC, un electrolizador de membrana, un tanque de almacenamiento y una celda de combustible para seguir la demanda impuesta por una carga; Nafeh [155] simula un sistema similar, pero enfocado en los productos de la electrolisis y en el control del seguimiento de máxima potencia del panel solar mediante redes neuronales artificiales cuyas entradas son la temperatura de las celdas del panel y la irradiación; Allouhi [156] analiza, energética y económicamente, la primera implantación de un sistema de gestión del exceso de energía producida por una instalación fotovoltaica 104 kWp de un edificio comercial para producir hidrógeno mediante 5 electrolizadores alcalinos en Marruecos. El autor considera la variabilidad de la carga y estima el flujo de potencia del arreglo fotovoltaico a la edificación mediante redes neuronales artificiales de tres entradas, diez capas ocultas, una capa de salida y una salida, además genera arbitrariamente, con Matlab, radiación global, temperatura del viento y velocidad del viento para alimentar al modelo predictivo.

Allouhi [156] destaca la posibilidad de que el acople de electrolizadores para aprovechamiento de excedentes de energía sea más eficiente con sistemas híbridos en donde distintas tecnologías de generación y almacenamiento se integren. Consecuentemente, se visualiza la integración del frenado regenerativo para generación de hidrógeno, es un esquema similar al de la Figura 61. La catenaria se derivaría y se conectara al enlace de continua en donde estaría conectado el electrolizador y cualquier otra tecnología por considerar. No necesariamente tiene que haber una conexión saliente para alimentar a cargas o para conectarse a una red aledaña.

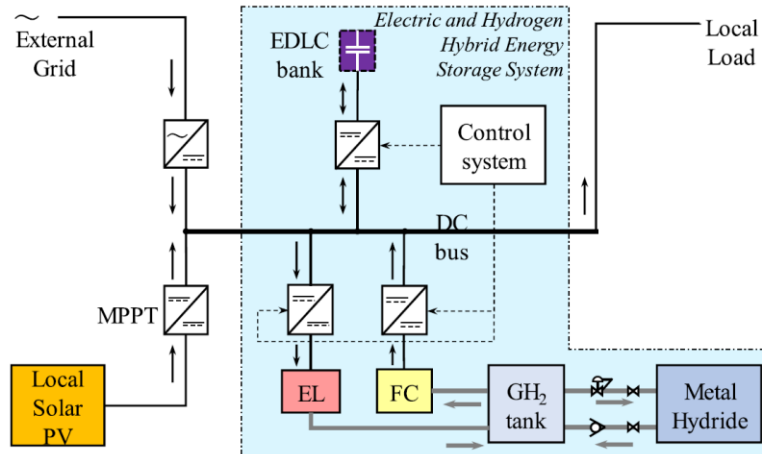


Figura 61. Esquema general de integración de un sistema híbrido de almacenamiento de energía con hidrógeno, energías renovables y conectado a la red. Fuente: Zhang [157].

Continuando el mismo enfoque de concentrar toda la energía del frenado en un solo punto con miras a un dimensionamiento límite y realizar una primera estimación del aprovechamiento del recurso, se consideran los 8MWh promedios nominales que se pudieran producir en un día y se calcula el equivalente en hidrógeno. Basándose en la recopilación de L. Beites [153], la equivalencia de 1kg de hidrógeno a 1 Nm³ y a 1 L son de 1:11.12 y 1:14.12, respectivamente; y de acuerdo con el estudio de Vicente [158] y Fundación Naturgy [159] para producir 1 Kg de hidrógeno mediante electrólisis son requeridos de 51 kWh a 55 kWh. Estableciendo dichas relaciones, es posible conseguir 145 kg, en el panorama más pesimista; esto equivale a **1.62 kNm³** de hidrógeno gaseoso en

condiciones normalizadas y a **2.05 m³** (2050 L) de hidrógeno líquido a presión atmosférica y a una temperatura menor a 20.39 K.

Similar al modo de aprovechamiento anterior, para hacer un diseño apropiado habría que conocer el posible perfil de demanda. Debido a esto, como primera estimación se podría seleccionar sistemas de almacenamiento a temperaturas criogénicas para almacenar el hidrógeno líquido, que a su vez ya está en condiciones apropiadas para aplicaciones industriales. De acuerdo con la Fundación Naturgy [159], el 90% del hidrógeno comercial en Estados Unidos se transporta en estado líquido mediante cisternas, así se reduce el costo de tuberías y se aumenta la densidad energética, aunque este método exige un consumo eléctrico de 13 kWh/kg. Ajeno a esto, un sistema de capacidad mínima de 2050 L, empleando un electrolizador que reforme agua, como los electrolizadores de tipo membrana, proveniente de colectores pluviales

El electrolizador en cuestión pudiera estar acoplado al mismo enlace de continua que el medio de almacenamiento del aprovechamiento anterior mediante un convertidor tipo Buck, controlado para proveer las condiciones óptimas de funcionamiento del electrolizador. Dicho convertidor, deberá tener la capacidad para soportar los picos de potencia y acoplar la tensión de la catenaria (1500 V) a la nominal del electrolizador. Si se considera nuevamente el enfoque de aprovechamiento por subestación, similar al del aprovechamiento anterior, se obtienen los resultados recopilados en la Tabla 12:

Tabla 12. Aprovechamiento diario por subestación de acuerdo con la repartición de la energía del frenado: Producción de hidrógeno verde.

Reparto del aprovechamiento en las subestaciones			
Subestaciones	Energía (MWh)	Masa (kg)	Líquido (L)
S1	0.5234	10	134
S2	0.885	16	227
S3	0.9756	18	250
S4	1.1827	22	304
S5	1.1469	21	294
S6	1.1703	21	300
S7	1.4407	26	370
S8	0.6754	12	173
Total		145	2050

Aunque usualmente no es producto considerado en la electrolisis del agua, la producción de oxígeno también podría ser valioso para aplicaciones médicas, industriales o comercio en general. De acuerdo con la fórmula química del agua, la producción de moléculas de oxígeno estable mantiene una relación molar de 0.5 respecto a la de agua e hidrógeno. Por lo tanto, se produciría **0.81 kNm³** de oxígeno gaseoso con 8 MWh/día, que podrían satisfacer la demanda de oxígeno de los hospitales de la localidad ubicados entre la subestación 6 y 7 (Estación San Miguelito, Hospital San Miguel Arcángel) y/o el hospital ubicado próximo a la subestación 3 (Estación/Hospital Santo Tomás). Dichas ubicaciones podrían ser los puntos de suministro de hidrógeno para su comercialización, así como las ubicaciones pasadas de estaciones de carga de vehículos, pero para suministrar hidrógeno.

4.1.3. Abastecimiento alternativo de energía

En el amplio espectro, la inyección de la energía del frenado regenerativo se ha sugerido para el abastecimiento de cargas específicas que realizan trabajos determinados y se definen

de acuerdo sus aplicaciones. Sin embargo, la energía pudiese usarse para alimentar a cualquier carga ajeno a su estatus operativo, tal como Martín *et al.*, [27] que se enfocó a abastecer luminarias y zonas adyacentes a las estaciones de pasajeros. Hong *et al.*, [160] y Hun *et al.*, [161] proponen un diseño de una fuente de alimentación ininterrumpida (UPS) en operación conjunta con una batería, buscando aprovechar las ventajas de ambos sistemas de tal manera que la implementación sea versátil y rentable. La función de la batería es regular la carga, evitar picos de demanda, evitar profundidades de carga no recomendable en la batería del UPS y regulación de tensión en condiciones estables, por lo tanto, la batería actuaría en condiciones normales como en emergencia, otorgando prioridad al UPS en la segunda situación (ver Figura 62).

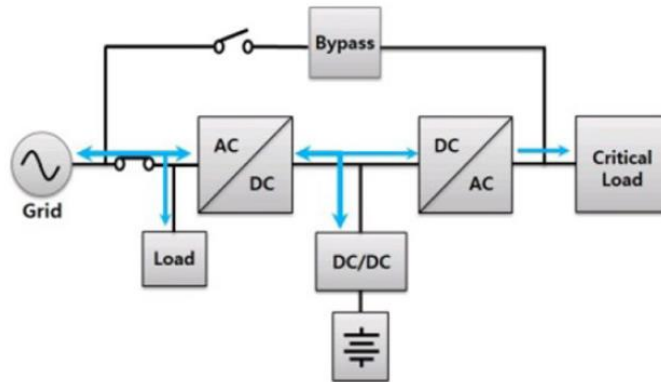


Figura 62. Modelo sugerido de sistema híbrido de alimentación. Fuente: Hun et al., [161]

Dependiendo del tipo de carga y/o carga crítica por abastecer se determinarían las posibles alternativas de topologías. Si se considera la Figura 62 y el sistema de alimentación continua con almacenamiento con supercapacitores e hidrógeno de la Figura 61, se determina que en el enlace de continua se conectaría la derivación proveniente de la catenaria del Metro y ésta los dispositivos de almacenamiento. Si las cargas son edificaciones de oficina, centros universitarios, bancos y consumos regulares, bastaría con implementar algo similar a lo presentado. Si la carga por abastecer son zonas industrializadas, almacenes refrigerados y hospitales, incluir un electrolizador en el enlace de continua permitiría escoger entre uso directo de la energía eléctrica o aprovechar el recurso del hidrógeno para procesos y, especialmente en hospitales, se podría aprovechar el oxígeno de la electrolisis para servicios de cuidados intensivos y urgencias, como comenta Allouhi [156] dentro de las alternativas.

En lo referente a este trabajo, se consideran las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Panamá, ubicada en la Ciudad de Panamá. En las inmediaciones de la línea 1 del Metro no se encuentra ningún campus de la Universidad, pero en el tramo existente de la línea 2 hay una estación frente a la Sede de Tocumen (centros de investigación y talleres), y en la expansión de dicha línea habrá una estación frente al campus central (Victor Levi Sasso). En cualquier caso, según los registros históricos de consumo energético del campus central el máximo consumo promedio diario fue de 25 MWh (costo mensual: \$136 212.00) en el 2016, mientras que el máximo registrado del 2019 es de 21.7 MWh (costo mensual: \$124 723.00). Aunque es notable que el consumo es cerca del triple de la energía del frenado regenerativo en condiciones nominales, el edificio del campus central que alberga las facultades con más ofertas académicas tiene un consumo promedio diario de 5.075 MWh, representando un costo aproximado mensual de \$30 000.00. Inyectar la energía del frenado pudiese representar un ahorro mínimo de **\$360 000.00 anuales**; mientras que, en la Sede de Tocumen, en donde el máximo histórico del consumo diario promedio es 2.5 MWh (costo mensual: \$14 308.06), pudiese suplir lo requerido por **3 días** de operación cotidiana.

Publicaciones asociadas

- **Jesús Araúz**, Aranzazu Berbey-Álvarez, Dafni Mora y Juan de Dios Sanz, “APROVECHAMIENTO DEL FRENADO REGENERATIVO EN EL METRO DE PANAMÁ: ESTIMACION Y EXPLORACION DEL RECURSO.”, publicado en Congreso APANAC 2021. Acceso en http://congreso.apanac.org.pa/wp-content/uploads/2021/06/libro_congresoAPANAC2021.pdf
- **J. Araúz**, F. Henríquez, J. Sanz, A. Berbey-Álvarez, “Tecnologías y enfoques para el aprovechamiento de la energía regenerativa en el transporte ferroviario: una revisión sistemática”, publicado en INGENIO 2021, Congreso Latinoamericano de Ingeniería.

Conclusiones

Partiendo de la realidad mundial actual, que procura mejorar la eficiencia de todos los sistemas industriales, comerciales y residenciales, se reafirma el gran campo de mejoramiento de eficiencia energética presente en los distintos tipos de sistemas ferroviarios; en donde, atendiendo a la topología y al diseño único del sistema, pueden presentar variadas oportunidades de optimización de sus componentes en miras de una eficiencia energética global.

En el estado del arte desarrollado, es posible destacar la factible aplicación de técnicas de almacenamiento o manejo de la energía del frenado regenerativo que proporcionan ahorros energéticos en un alto espectro, sin embargo, es complicado establecer la solución definitiva para un sistema cualquiera, debido a la necesidad individual y específica de estos, y al enfoque de las empresas propietarias. Por lo tanto, la escogencia de una solución de gestión de la energía regenerada no es simplemente un estudio de carácter combinatorio en donde, atendiendo la característica multifactorial de este, se realiza un barrido entre todas las variables y sus respectivos acoples mutuos para llegar a la solución óptima; sino que proyecta un comportamiento permutativo, impuesto por la naturaleza restrictiva de parámetros no necesariamente técnicos como normativas, finanzas, administración, recurso humano, mantenimiento, condiciones climatológicas, etc.

Dentro de las soluciones de eficiencia energética, que también pudieran mejorar la integridad de los parámetros de operación del sistema ferroviario en cuestión, se visualizó la tendencia en usar sistemas de almacenamiento abordo respecto de soluciones estacionarias o estaciones reversibles. Esto se debe a los precios de los productos accesibles en el mercado y no a la superioridad técnica ni operativa de estos respecto de los demás enfoques. Las soluciones estacionarias, almacenamiento o subestaciones reversibles, presentan un aprovechamiento de la energía más sutil, sin afectar a la dinámica propia de los trenes, pero involucran mayores costos, siguen requiriendo en igual forma la catenaria y pudieran comprometer la calidad de la energía en los puntos de suministro (subestaciones reversibles) dependiendo de la tecnología de tiristores utilizados. Asimismo, la complejidad de estudiar la operación de los sistemas influye en las soluciones consideradas. No se encuentra suficiente información de los fabricantes sobre cómo se controlan los convertidores, de tal manera que dificulta la inspección del funcionamiento de éstos y la profundización en técnicas de control más acertadas, como algunas basadas en *machine learning* o en algoritmos con inteligencia artificial que procurar definir los parámetros óptimos de explotación para obtener las mejores prestaciones posibles durante de la operación y en el largo plazo de la inversión. Aun así, y de manera general, el recurso disponible establecerá la correspondencia de la tecnología como solución más favorable al sistema.

Los resultados obtenidos presentan un rango de error mayor al 1.72% y menor al 28.3261%, considerando las distintas condiciones de explotación y consumos de auxiliares, respecto de los consumos reales proporcionados por el Metro de Panamá. Cabe reiterar que se tuvo que hacer ajustes a la data proporcionada debido a la gran varianza de estos, debido a que esta contabilizaba los consumos en las estaciones de pasajeros y a que fue un mes en donde aún las restricciones de movilidad establecidas por la pandemia afectaban a la demanda habitual del Metro. Además, el simulador utilizado realiza los cálculos contemplando la velocidad nominal del material rodante y carga de pasajeros nominal y constante; representando así condiciones máximas de operación y determinando límites para conseguir un dimensionamiento técnicamente apropiado que contemple un factor de seguridad global equivalente. De acuerdo con especialistas en simulación ferroviaria del Departamento de Ingeniería Mecánica, una

excedencia en consumo energético del 30% es tolerable para considerar una simulación válida y provechosa.

En el presente estudio, se obtuvieron fluctuaciones de tensión alrededor de un 1% y una regeneración a condiciones nominales teóricas de 8%. La primera condición descarta la necesidad de una solución en miras a reducir picos de potencia, tal como suelen ser los volantes de inercia o supercapacitores, considerando que la inyección de corriente en la catenaria en aceleración y frenado no son suficientemente grandes ni recorren suficientes distancias para generar grandes caídas de tensión; esto es cónsono con lo comunicado por el Departamento de Mantenimiento del Metro de Panamá, el cual comentó que no se presentan fluctuaciones de tensión considerables que expongan la integridad operacional del metro. La segunda condición descarta la necesidad de considerar almacenamiento para abastecer el consumo de los trenes, tal y como se demuestra en la Tabla 10, la cual expone la alta cantidad de ciclos de circulación y días para abastecer el consumo aproximado de una hora de operación promedio y un día promedio. Indistintamente, podría instalarse algún almacenamiento dimensionado solamente para cargarse ante la energía saliente de los trenes y abastecer el 8% del siguiente ciclo de circulación, así como un convertidor para redireccionar la energía a las estaciones de pasajeros, pero no representaría mucha energía aprovechable respecto a otros sistemas ferroviarios donde es posible recuperar y aprovechar más del 30% de la energía consumida; esto es debido a la favorable coordinación en la entrada y salida de los trenes a las estaciones (Figura 40) y al poco distanciamiento entre subestaciones de tracción (Tabla 3).

La cantidad de energía recuperable no es suficiente para crear otra fuente rentable y eficiente de suministro a la catenaria. Esta situación proporciona un punto de partida para aprovechar la energía del frenado regenerativo con un enfoque en donde dicha cantidad recuperable sea más significativa para otras actividades que para el metro. Basándose en el enfoque previamente señalado, se estimó la cantidad recuperable de energía diaria para así utilizarla para abastecimientos alternativos como estaciones de carga de vehículos eléctricos, estaciones electrolizadoras o, sencillamente, para alimentar a edificaciones de interés particular. Es posible, considerando los vehículos eléctricos disponibles en el mercado panameño, cargar más de 150 vehículos diarios; usando datos característicos de electrolizadores considerados en otros proyectos de generación de hidrógeno, se pueden generar más de 2 000 L diarios de hidrógeno líquido; y, de acuerdo con el consumo de instalaciones universitarias, es posible cubrir el 37%, 157.6% y 320% de la demanda energética diaria de tres instalaciones de la Universidad Tecnológica de Panamá: Campus Victor Levi Saso (campus principal), Edificio #1 del Campus Victor Levi Saso y Extensión Universitaria de Tocumen, respectivamente. El Metro podría ser catalogado como un “cogenerador”, de acuerdo con la normativa nacional del Mercado Eléctrico (Ley 6 de 3 de febrero de 1997), el cual vendería la energía del frenado regenerativo al mercado mayorista y podría tener acuerdos bilaterales con otros agentes consumidores participantes en el mercado.

Aunque la Línea 1 del Metro de Panamá no posea un gran excedente de energía regenerada que pueda ser rentablemente aprovechada por las propias instalaciones, sí es más provechoso gestionar la energía para actividades distintas, así aportando un valor agregado a la empresa y dando paso a posibles innovaciones en donde se podría incluir generación distribuida mediante micro redes, tal como se mostró en algunos de los enfoques de aprovechamiento de la energía del frenado, los cuales sugieren aprovechar la infraestructura y la necesidad de su gestión para integrar el sistema de electrificación ferroviaria a otros servicios e inclusive a la red de distribución, en el caso de los sistemas urbanos como el metro, con la cual pudiese participar en la gestión de la demanda y en la definición de redes inteligentes como un participante activo más.

Líneas futuras

El presente trabajo analizó a grandes rasgos el aprovechamiento del frenado regenerativo mediante equipos específicos con datos comerciales. Esto puede ser ampliamente profundizado si se contemplan otros enfoques:

- Determinación del mínimo frenado regenerativo mediante la optimización de los tiempos de operación de los trenes.
- Escogencia de la mejor tecnología para un determinado sistema ferroviario mediante algoritmos de dimensionamiento y posicionamiento.
- Acople óptimo entre sistemas de almacenamiento, horarios de operación y subestaciones reversibles en pro del mejor manejo posible de la energía.
- Aplicación de técnicas de inteligencia artificial para la determinación de los parámetros de operación de los dispositivos de almacenamiento, así como de las estaciones reversibles.
- Interacción “sistema ferroviario-red de electrificación local”, en el cual se estudiaría cómo las instalaciones del ferrocarril, junto a los dispositivos de almacenamiento, pudiesen participar activamente en la regulación de parámetros de la red local sin comprometer su objetivo principal.
- Integración de generación distribuida (generación con energías renovables) en las inmediaciones del ferrocarril y analizar cómo esto pudiera proporcionar un sistema aislado del resto o permitir un comportamiento del ferrocarril como “generador gestionable”.
 - Estudio de la normativa necesaria para cumplir con los requerimientos técnicos para lograr dicho estatus.
- Coordinación del recurso eléctrico del ferrocarril con otros medios de transporte masivo o requerimientos especiales (autobuses/automóviles eléctricos, servicios energéticos de emergencia ante fallas en la red, etc.).

Planificación temporal y presupuesto

Actividades\Meses	Sept. 20	Oct. 20	Nov. 20	Dic. 20	Ene. 21	Feb. 21	Mar. 21	Abr. 21	May. 21	Jun. 21	Jul. 21	Ago. 21	Sept. 21	Oct. 21
Reflexión sobre temas	■	■												
Delimitación del tema		■	■	■	■	■								
Revisión del Estado del Arte			■	■	■	■								
Redacción: Capítulo 1		■	■	■	■									
Redacción: Capítulo 2					■	■								
Simulación en Simulink					■	■								
Redacción: Capítulo 3			■	■	■	■								
Recolección de Data			■	■	■									
Construcción del Modelo						■								
Validación del Modelo						■	■							
Redacción: Capítulo 4							■	■	■	■				
Revisión de los modos de aprovechamiento							■	■						
Estimación del Aprovechamiento								■	■	■				
Conclusiones y Líneas Futuras									■	■	■	■		
Preparación de la defensa												■	■	■
Difusión en congresos								■	■	■	■	■		

Como se aprecia en el diagrama de la distribución de tareas en el tiempo, la realización del TFM estuvo en un espacio temporal mayor a un año, precisamente 383 días totales (Tabla 13) de los cuales 274 días fueron hábiles. Es importante destacar que muchas actividades coinciden en el tiempo, lo que significa que no solamente se realizaron dentro del mismo periodo, sino que también dentro de los mismos intervalos de horas y minutos. Además, el TFM coincidió totalmente con todas las asignaturas del Máster en Ingeniería Eléctrica, esto indica que durante semanas de exámenes finales y pruebas de evaluación continua no se avanzó. Así, es apropiado estimar que de las 12 horas restantes del día (4h de clases promedio por día) se usaba entre 2h a 4h para las actividades del TFM. Consiguientemente, se estima la cantidad de horas considerando una cantidad de días aprovechados de 200 días en vez de 274 días (Tabla 13), esto proporciona un rango de 400h a 800h.

Tabla 13. Distribución aproximada de duración de actividades a lo largo del TFM.

Ítem	Actividades	Inicio	Fin
1	Reflexión sobre temas	15/09/20	15/10/20
2	Delimitación del tema	15/10/20	08/02/21
3	Revisión del Estado del Arte	01/11/20	08/02/21
4	Redacción: Capítulo 1	15/10/20	08/02/21
5	Redacción: Capítulo 2	01/01/21	01/02/21
6	Simulación en Simulink	01/01/21	01/02/21
7	Redacción: Capítulo 3	15/11/20	01/02/21
8	Recolección de Data	15/11/20	31/01/21
9	Construcción del Modelo	08/02/21	28/02/21
10	Validación del Modelo	28/02/21	30/03/21
11	Redacción: Capítulo 4	30/03/21	30/06/21
12	Revisión de los modos de aprovechamiento	30/03/21	30/04/21
13	Estimación del Aprovechamiento	30/04/21	30/06/21
14	Conclusiones y Líneas Futuras	30/05/21	30/08/21
15	Preparación de la defensa	30/08/21	03/10/21
16	Difusión en congresos	01/04/21	15/08/21
Duración bruta total (días)			383
Cantidad de días hábiles (días)			274

Metro de Panamá: estimación y aprovechamiento alternativo de la energía del frenado regenerativo

Esto resulta en un rango de mano de obra de 4000 euros a 8000 euros, suponiendo un salario base de 10 euros/hora para ingeniero junior. Las computadoras utilizadas tienen más de 6 y 5 años, respectivamente; la licencia de Matlab y Office son las de la universidad, la energía eléctrica y el internet tuvieron distintas procedencias (residencia en Panamá, Madrid y ETSII). Si se quisieran considerar esos rubros, podrían declararse 400 euros, 800 euros, 50 euros y 60 a 120 euros, respectiva y aproximadamente [27], además de 1500 euros para la licencia anual de AutoCad, proporcionando un costo medio estimado total de **8440 euros**.

Tabla 14. Estimación del presupuesto medio de la elaboración el TFM.

Rubro	Costo (euros)
Ordenadores	400
Licencia Matlab	800
Licencia Office	50
Licencia AutoCad	1500
Consumo energético	90
Ingeniero	6000
Total	8840

Dicho resultado no contempla el costo de participar en dos congresos (aproximadamente \$300.00) ni todos los gastos relacionados a la movilización entre países, pero esto no es necesariamente una obligación para la finalización del TFM.

Referencias

- [1] Berbey et al., “Informe técnico y financiero. Etapa 1(primer etapa). Proyecto de Reinserción de becaria. Metodologías e índices de desempeño para sistemas de transporte ferroviario. Financiado por SENACYT. 2010.,” Panamá, Republica de Panamá, 2010.
- [2] A. Berbey-Álvarez and R. Caballero-George, “Segundo informe de avance del Proyecto I+D ‘Metodologías e índices de desempeño para sistemas de transporte ferroviario’ 24/02/2011.,” 2011.
- [3] A. Berbey-Alvarez and R. Caballero-George, “Proyecto I+D ‘Metodologías e índices de desempeño para sistemas de transporte ferroviario’, Informe técnico-financiero de la tercera etapa del proyecto de I+D ,” Panama, Republica de Panamá, 2011.
- [4] A. Berbey-Álvarez, J. Guevara-Cedeño, G. Castillo, H. Álvarez, and I. De La Torre-Diez, “Perspectivas de las externalidades socio económicas de la línea 1 del metro de Panamá en la productividad urbana. Perspectives of Socio-economic externalities of the Panama Metro Line 1 in Urban Productivity,” *Trim*, vol. 13, no. January, pp. 37–56, 2017.
- [5] A. Berbey-Alvarez, J. Guevara-Cedeño, H. Alvarez, and J. Sanz Bobi, “Panama Metro Bus System and Metro Line 1: An externalities analysis of CO2 emissions spectre.,” in *Conference: 2017 International Conference in Engineering Applications Track: Energy and Sustainability in Small Developing Economies, At In Funchal, Madeira Island, July 10-13, 2017, Volume: In Funchal, Madeira Island, July 10-13, 2017.*, 2017, p. 2017.
- [6] J. Guevara-Cedeño, J. Aguilar, R. Torabi, and A. Berbey-Alvarez, “Electric mobility in Panama: A review.,” in *ES2DE 2018. International Conference on Energy and Sustainability in Small Developing Economies, Madeira Island, Portugal, July 9th to 12th, 2018.*, 2018.
- [7] Berbey-Alvarez et al., “Grupo de investigación. Panama Railway engineering research group,” *Grupos de investigación. Universidad Tecnológica de Panamá.*, 2009. .
- [8] Secretaría Nacional de Energía, “PLAN ENERGÉTICO NACIONAL 2015-2050 : ‘PANAMÁ, EL FUTURO QUE QUEREMOS,’” Panamá, Panamá, 2015. [Online]. Available: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00467.pdf>.
- [9] Gerencia de Planificación, “Plan de Expansión del Sistema Interconectado Nacional 2018 – 2032,” Panamá, Panamá, 2019. [Online]. Available: https://www.asep.gob.pa/wp-content/uploads/electricidad/consultas_publicas/2017_18/cp_013-2018/anexo_b/tomoI-estudios_basicos2018-2032/tomoI-estudios_basicos2018-2032.pdf.
- [10] SENACYT, “Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Panamá 2040 y Plan Nacional estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación (PENACYT) 2019-2024: Hacia la Transformación de Panamá,” Panamá, Panamá, 2020. [Online]. Available: <https://www.senacyt.gob.pa/wp->

content/uploads/2020/01/GacetaNo_28936b_202001081-1.pdf.

- [11] Alstom, “Soluciones innovadoras de Alstom para el Metro de Panamá,” 2019. <https://www.alstom.com/es/press-releases-news/2019/4/las-soluciones-innovadoras-de-alstom-para-la-linea-2-de-metro-de-panama> (accessed Mar. 16, 2021).
- [12] Metro de Panamá, “Funcionamiento del Metro: Partida Presupuestaria de Enero 2021,” 2021. <https://www.elmetrodepanama.com/wp-content/uploads/2021/02/Funcionamiento-Enero-2021.pdf> (accessed Mar. 16, 2021).
- [13] Agencia Internacional de Energía (IEA), “Railway Handbook 2017,” 2017.
- [14] M. Popescu and A. Bitoleanu, “A review of the energy efficiency improvement in DC railway systems,” *Energies*, vol. 12, no. 6, 2019, doi: 10.3390/en12061092.
- [15] 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,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 92, pp. 181–192, 2017, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.05.008.
- [16] T. Train, J. Feng, J. Xu, W. Liao, and Y. Liu, “Review on the Traction System Sensor Technology of,” *Sensors. MDP*, no. Dc, 2017, doi: 10.3390/s17061356.
- [17] 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*, 2017, doi: 10.3390/s17061457.
- [18] S. Ballesteros, J. de D. Sanz Bobi, and Á. Calvo, ““ Visión de las Smart Grids y las Micro - Smart Grid en el entorno ferroviario .”” Madrid, España, p. 156, 2020.
- [19] I. Villalba, V. Yepes, P. Martínez, and R. Insa, “A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 222, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.037.
- [20] H. Hayashiya and K. Kondo, “Recent trends in power electronics applications as solutions in electric railways,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 15, no. 5, pp. 632–645, 2020, doi: 10.1002/tee.23121.
- [21] S. M. G. Mousavi, F. Faraji, A. Majazi, and K. Al-haddad, “A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 477–490, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.060.
- [22] 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, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908558.
- [23] X. Liu and K. Li, “Energy storage devices in electrified railway systems: A review,” *Transportation Safety and Environment*, vol. 2, no. 3, pp. 183–201, 2020, doi: 10.1093/tse/tdaa016.
- [24] J. Zhang, Y. Li, H. Xie, and B. Li, “Urban Rail Transit Energy Storage Based on Regenerative Braking Energy Utilization,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1549, no. 4, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1549/4/042053.
- [25] 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*

-
- Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2017*, 2017, doi: 10.1109/ITEC-AP.2017.8080771.
- [26] M. Khodaparastan, A. A. Mohamed, and W. Brandauer, “Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 8, pp. 2831–2847, 2019, doi: 10.1109/TITS.2018.2886809.
- [27] C. Martín, 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.
- [28] Adif, “Pliego de Prescripciones Técnicas: Plataforma Sócrates,” 2018. http://www.adifaltavelocidad.es/AdifWeb/descargas/descargarDocumentacion.jsp?file_id=001A64F6276E1ED8988362AE14C579E1&noLogin=true&expediente=3.18/20830.0174.
- [29] Adif, “Proyecto Inverfer,” 2014. http://revistalneas.com/va_ES/compromisos/doc/PT_11-SubestRev.pdf.
- [30] P. Merlín, “Proyecto Merlín,” 2015. <http://www.merlin-rail.eu>.
- [31] E-lobster, “e-lobster: Results and public reports,” 2020. <https://www.e-lobster.eu/results-public-reports/>.
- [32] P. Osiris, “Proyecto Osiris: Objetivos,” 2020. <http://www.proyecto-osiris.com/es/osiris>.
- [33] Adif, “Ferrolinera,” 2014. http://www.adif.es/ca_ES/doc/fichas/Folleto_ferrolinera.pdf.
- [34] Siemens, “Increasing Energy Efficiency From virtuality to reality,” Munich, Alemania, 2011.
- [35] 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, doi: 10.3390/en13071614.
- [36] T. Albrecht, “Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control,” *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 74, p. 10, 2004, doi: 10.2495/CR040881.
- [37] Z. Tian, P. Weston, N. Zhao, S. Hillmansen, C. Roberts, and L. Chen, “System energy optimisation strategies for metros with regeneration,” *Transportation Research Part C*, vol. 75, pp. 120–135, 2017, doi: 10.1016/j.trc.2016.12.004.
- [38] 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.
- [39] J. Van Mierlo and G. Maggetto, “Innovative Iteration Algorithm for a Vehicle Simulation Program,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 401–412, 2004, doi: 10.1109/SPEEDAM.2010.5542099.
- [40] D. Fournier, F. Fages, and D. Mulard, “A Greedy Heuristic for Optimizing Metro
-

- Regenerative Energy Usage,” in *Railways Technology*, 2015, pp. 0–18, doi: 10.4203/ccp.104.240.
- [41] 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, doi: 10.3390/en13092378.
- [42] K. Minaminosono, M. Hashimoto, and T. Yoshinaga, “Study of Potential and Utilization of Regenerative Power in Electric Railway,” in *8th Internacional Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 2019, pp. 164–168, doi: 10.1109/ICRERA47325.2019.8997090.
- [43] 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*, p. 21, 2020, doi: 10.3390/en13236227.
- [44] Y. Krim *et al.*, “Comparative study of two control techniques of regenerative braking power recovering inverter based DC railway substation,” *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2020 ECCE Europe*, pp. 1–9, 2020, doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215770.
- [45] 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 Transactions on Transportation Electrification*, vol. PP, no. c, p. 1, 2019, doi: 10.1109/TTE.2019.2936686.
- [46] J. Liu, Y. Wang, Y. Wu, Y. Li, and X. Wang, “Research and implementation of new-type supercapacitor and battery hybrid energy storage system,” *Journal of Power Electronics*, vol. 20, no. 6, pp. 1395–1404, 2020, doi: 10.1007/s43236-020-00130-7.
- [47] Y. Liu, Z. Yang, F. Lin, and H. Yang, “Energy loss analysis of the stationary battery-supercapacitor hybrid energy storage system,” *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 - Proceedings*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/VPPC46532.2019.8952184.
- [48] 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, doi: 10.1109/SETIT.2016.7939849.
- [49] N. Ghaviha, J. Campillo, M. Bohlin, and E. Dahlquist, “Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 4561–4568, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.980.
- [50] A. Chatzivasileiadi, E. Ampatzi, and I. Knight, “Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 814–830, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.05.023.
- [51] H. Chen, T. Ngoc, W. Yang, C. Tan, and Y. Li, “Progress in electrical energy storage system : A critical review,” *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, 2009, doi: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.
- [52] B. P. Arboleya and U. Armendariz, “Energy Is On Board: Energy Storage and Other Alternatives in Modern Light Railways,” *IEEE Electrification*, vol. 4, no. 3, pp. 30–
-

-
- 41, 2016, doi: 10.1109/MELE.2016.2584938.
- [53] R. Barrero and J. Van Mierlo, “Enhanced Energy Storage Systems for Improved On-Board Light Rail Vehicle Efficiency,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, no. September, pp. 26–36, 2008.
- [54] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, “Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network,” 2010, doi: 10.1243/09544097JRRT322.
- [55] 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, [Online]. Available: https://www.tickettokyoto.eu/sites/default/%0Afiles/downloads/T2K_ER_overview_technologies_web.pdf.
- [56] M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela, “Energy storage system with Ultracaps on board of railway vehicles,” 2007, doi: 10.1109/EPE.2007.4417400.
- [57] 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, [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/1327811>.
- [58] 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, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729152.
- [59] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, and J. P. Powell, “A systems approach to reduce urban rail energy consumption,” *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 509–524, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.01.060.
- [60] F. Lacôte, “Alstom-Future trends in railway transportation,” *Japan Railway & Transport Review*, no. December. Tokyo, pp. 4–9, 2005, [Online]. Available: https://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr42/pdf/f04_lac.pdf.
- [61] M. Meinert, “New mobile energy storage system for rolling stock,” 2009.
- [62] Siemens, “Increasing Energy Efficiency Optimized Traction Power Supply in Mass Transit Systems,” Munich, Alemania, 2011.
- [63] A. González-gil, R. Palacin, and P. Batty, “Sustainable urban rail systems : Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy,” *Energy Conversion and Management*, vol. 75, pp. 374–388, 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2013.06.039.
- [64] 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, doi: 10.1109/ESARS.2012.6387438.
- [65] F. Castro 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, doi: 10.1115/jrc2015-5691.
-

- [66] F. Kiebling and R. Puschmann, *Contact Lines for Electric Railways*. Publicis Corporate Publishing, 2001.
- [67] Almston, “RE-USE Layman’s Report,” 2018.
- [68] D. Cornic, “Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation,” in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2010, p. 9, doi: 10.1109/ESARS.2010.5665264.
- [69] V. Gelman, “Energy Savings With Reversible Thyristor Controlled Rectifier,” in *Proceeding of the 2009 ASME Joint Rail Conference*, 2009, pp. 1–6, doi: 10.1115/jrc2009-63013.
- [70] Siemens, “Sitras TCI–Thyristor Controlled Inverter for DC Traction Power Supply.” Siemens, 2018, [Online]. Available: <https://w3.usa.siemens.com/mobility/us/documents/en/rail-solutions/railway-electrification/%0Aadc-traction-power-supply/sitras-tci-en.pdf>.
- [71] 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, doi: 10.3390/en12214166.
- [72] 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 Transactions on Power Systems*, vol. 8950, no. c, 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.2968108.
- [73] G. Li and D. Görge, “Ecological Adaptive Cruise Control and Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Heuristic Dynamic Programming,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1109/TITS.2018.2877389.
- [74] S. Nazari, J. Siegel, and A. Stefanopoulou, “Optimal Energy Management for a Mild Hybrid Vehicle With Electric and Hybrid Engine,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 4, pp. 3386–3399, 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2898868.
- [75] A. Rezaei, J. B. Burl, B. Zhou, and M. Rezaei, “A New Real-Time Optimal Energy Management Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 27, no. 2, pp. 830–37, 2017, doi: 10.1109/TCST.2017.2775184.
- [76] I. M. Sobol, “Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates,” *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 55, no. 1–3, pp. 271–280, 2001, doi: 10.1016/S0378-4754(00)00270-6.
- [77] 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 Transactions on Industrial Informatics*, vol. 3203, no. c, pp. 1–12, 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2378596.
- [78] C. Zhao, H. Yin, and Z. Yang, “Equivalent Series Resistance-Based Energy Loss Analysis of a Battery Semiactive Hybrid,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 3, pp. 1081–1091, 2015, doi: 10.1109/TEC.2015.2418818.
- [79] 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*
-

-
- Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, no. 4, pp. 432–442, 2016, doi: 10.1109/TTE.2016.2569069.
- [80] H. Lee, J. Kim, C. Lee, and J. Kim, “Novel Cooperative Controller Design of Heterogeneous Energy Storages for Economic Applications in Electric Railway Systems,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 979–987, 2020, doi: 10.1007/s42835-019-00341-4.
- [81] W. Jefimowski, A. Nikitenko, Z. Drażek, and M. Wieczorek, “Stationary supercapacitor energy storage operation algorithm based on neural network learning system,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, vol. 68, no. 4, pp. 733–738, 2020, doi: 10.24425/bpasts.2020.134176.
- [82] P. V. Radu, A. Szelag, 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, doi: 10.3390/en12071291.
- [83] M. Outtara and Y. Gordon, “WMATA Energy Storage Demonstration Project.” Federal Transtir Adm. no 0086, 2015.
- [84] 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 Poer and Propulsion Conference*, 2008, pp. 1–8, doi: 10.1109/vppc.2008.4677491.
- [85] N. Devillers, S. Jemei, M. Péra, D. Bienaimé, and F. Gustin, “Review of characterization methods for supercapacitor modeling,” *Journal of Power Sources*, vol. 246, pp. 596–608, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.07.116.
- [86] D. Iannuzzi and P. Tricoli, “Speed-Based State-of-Charge Tracking Control for Metro Trains With Onboard Supercapacitors,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 4, pp. 2129–2140, 2012, doi: 10.1109/tpel.2011.2167633.
- [87] C. Wu, S. Lu, F. Xue, L. Jiang, and M. Chen, “Optimal Sizing of Onboard Energy Storage Devices for Electrified Railway Systems,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 3, pp. 1301–1311, 2020, doi: 10.1109/TTE.2020.2996362.
- [88] C. Wu *et al.*, “Train Speed Trajectory Optimization With On-Board Energy Storage Device,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. PP, no. Mld, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1109/TITS.2018.2881156.
- [89] T. Ratniyomchai, S. Hillmansén, and P. Tricoli, “Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways,” *IET Electrical Systems in Transportation*, no. September 2013, pp. 9–20, 2014, doi: 10.1049/iet-est.2013.0031.
- [90] 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 Transactions on Industry Applications*, vol. 9994, no. c, pp. 3367–3377, 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2555790.
- [91] 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, doi: 10.3390/en13236271.
-

- [92] Y. Yoshida, H. P. Figueroa, and R. A. Dougal, "Use of Time Series Load Data to Size Energy Storage Systems," *2018 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference, IGESSC 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/IGESC.2018.8745523.
- [93] 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, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125493.
- [94] G. Graber, V. Calderaro, V. Galdi, A. Piccolo, and R. Lamedica, "Techno-economic Sizing of Auxiliary-Battery-Based Substations in DC Railway Systems," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 2, pp. 616–625, 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2825651.
- [95] F. Naseri, E. Farjah, Z. Kazemi, E. Schaltz, T. Ghanbari, and J. L. Schanen, "Dynamic Stabilization of DC Traction Systems Using a Supercapacitor-Based Active Stabilizer with Model Predictive Control," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 228–240, 2020, doi: 10.1109/TTE.2020.2964423.
- [96] 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, doi: 10.3390/en81011618.
- [97] A. Rufer, S. Member, D. Hotellier, and P. Barrade, "A Supercapacitor-Based Energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 629–636, 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2004.824408.
- [98] D. Iannuzzi, F. Ciccarelli, and D. Lauria, "Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks," *Transportation Research Part C*, vol. 21, no. 1, pp. 321–337, 2012, doi: 10.1016/j.trc.2011.11.002.
- [99] X. Zhang, "Impedance Control and Stability of DC/DC Converter Systems, Doctoral dissertation," University of Sheffield, 2016.
- [100] K. Almaksour *et al.*, "Mutual impact of train regenerative braking and inverter based reversible DC railway substation," 2019, doi: 10.23919/EPE.2019.8915517.
- [101] Z. Cabrane, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, "Battery and supercapacitor for photovoltaic energy storage: a fuzzy logic management," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 4, pp. 1157–1165, 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0455.
- [102] 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 Engineering Practice*, vol. 81, no. September, pp. 215–230, 2018, doi: 10.1016/j.conengprac.2018.09.013.
- [103] W. Pan, S. C. Dhulipala, and A. S. Bretas, "A distributed approach for DG integration and power quality management in railway power systems," *Conference Proceedings - 2017 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 1st IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2017*, 2017, doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977714.
-

-
- [104] 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,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER AND ENERGY SYSTEMS*, vol. 68, pp. 52–60, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.046.
- [105] 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.
- [106] 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,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, p. 124086, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124086.
- [107] 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,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, p. 121394, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121394.
- [108] S. Xie, Y. Gao, M. Tian, and Z. Jia, “A novel power supply method for railway stations in Western China based on microgrid,” *Proceedings - 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering, ACPEE 2020*, pp. 1085–1089, 2020, doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136476.
- [109] K. S. Alam *et al.*, “Modeling and computation of a solar-piezoelectric hybrid power plant for railway stations,” *2012 International Conference on Informatics, Electronics and Vision, ICIEV 2012*, pp. 155–159, 2012, doi: 10.1109/ICIEV.2012.6317345.
- [110] Y. Bulatov, A. Kryukov, and G. Arsentyev, “Application of energy routers in railway power supply systems,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 239, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201823901047.
- [111] 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, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.079.
- [112] 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,” *Russian Electrical Engineering*, vol. 88, no. 9, pp. 586–591, 2017, doi: 10.3103/S1068371217090085.
- [113] 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 Electrification Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 12–23, 2020, doi: 10.1109/MELE.2019.2962886.
- [114] Wikipedia, “Línea 1 (Metro de Panamá),” *Línea 1 (Metro de Panamá)*, 2021. [https://es.wikipedia.org/wiki/Línea_1_\(Metro_de_Panamá\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Línea_1_(Metro_de_Panamá)) (accessed Jan. 30, 2021).
- [115] Metro de Panamá, “Panamá festeja el inicio de operaciones de la Línea 1 del Metro,” *Metro de Panamá*, 2014. <https://www.elmetrodepanama.com/panama-festeja-el-inicio-de-operaciones-de-la-linea-1-del-metro> (accessed Jan. 30, 2021).
- [116] Redacción Telemetro, “Inaugura el Metro de Panamá, el primero de Centroamérica,” *Telemetro Nacionales*, 2014.
-

<https://www.telemetro.com/nacionales/2014/04/05/inaugura-metro-panama-primero-centroamerica/1763095.html> (accessed Jan. 30, 2021).

- [117] Metro de Panamá, “Memoria anual 2018,” Panamá, República de Panamá., 2018.
- [118] A. Berbey, V. Sánchez, R. Caballero, and F. Calvo, “Passenger’s flow for a train’s coach and dwelling time using fuzzy logic,” in *In Proceedings of 2014 International Work Conference on Bio-inspired Intelligence (IWOBI), Liberia, Costa Rica, 16–18 July 2014; pp. 30–60.2014.*, 2014, pp. 30–36, doi: 10.1109/IWOBI.2014.6913934.
- [119] Metro de Panamá, “Flota de Trenes complementaria. Compra de trenes y vagones adicionales para la línea 1,” Panama, Republica de Panamá, 2015.
- [120] Metro de Panamá, “Parametros,” *Operaciones. Parámetros*, 2017. <https://www.elmetrodepanama.com/parametros> (accessed Jan. 26, 2021).
- [121] Steer Davies Gleave, “Estudio para la Integración de la Línea 2 del Metro con los servicios de Metro Bus,” Panama, República de Panamá., 2017.
- [122] A. Berbey-Alvarez, R. Caballero, and A. Cogley, “PB-84 Simulaciones Eléctricas de la línea 1 del Metro de Panamá.,” in *XIV Congreso nacional de ciencia y tecnología*, 2012.
- [123] A. Berbey-Alvarez, R. Caballero, and A. Cogley, “PB-85 Simulaciones Mecánicas y Productividad de las Paradas de la Línea 1 del Metro de Panamá.,” 2012.
- [124] A. Cogley-Brown, A. Berbey Álvarez, and R. Caballero-George, ““Estimación de los servicios parciales de la línea 1 del metro de Panamá’.,” in *XII Encuentro Iberoamericano de Mujeres Ingenieras, Arquitectas y Agrimensoras. Perspectiva de la mujer profesional Iberoamericana, ante las tendencias de la ingeniería y arquitectura sostenible*” ISBN-978-9962-698-16-6. Panamá, República de Panamá. 2014., Editorial Tecnológica, Ed. Panamá, República de Panamá: Editorial Tecnológica, 2014.
- [125] A. Berbey-Álvarez, R. Caballero-George, and A. Cogley-Brown, ““Simulación de escenarios operativos nominales de la línea 1 de metro de Panamá’.,” in *XII Encuentro Iberoamericano de Mujeres Ingenieras, Arquitectas y Agrimensoras. “Perspectiva de la mujer profesional Iberoamericana, ante las tendencias de la ingeniería y arquitectura sostenible” 17 al 21 de febrero. Panamá, República de Panamá. 2014.*, Editorial Tecnologica, Ed. Panama, Republica de Panamá, 2014.
- [126] A. Berbey-Alvarez, F. Merchan, J. Guevara-Cedeño, A. Cogley, and R. Caballero, “Caracterización de la línea 1 del Metro de Panamá.,” in *Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, the thirteenth latinamerican and caribbean conference for engineering and technology Santo Domingo, Dominican Republic. 2015.*, 2015.
- [127] A. Berbey-Alvarez, “Proyecto de caracterización de la línea 1 del metro de Panamá. Project characterization of Panama metro rail system.,” Panamá, República de Panamá, 2013.
- [128] Secretaría del Metro de Panamá., “Ingeniería conceptual. Especificaciones funcionales , técnicas y contractuales. Tomo II equipamientos. II.1 Sistemas de vías. II.1.1. Parámetros de diseño geométrico.” Panamá, República de Panamá., pp. 1–28, 2010.
-

-
- [129] H. Alnuman, D. Gladwin, and M. Foster, “Electrical modelling of a DC railway system with multiple trains,” *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/en11113211.
- [130] S. Su, T. Tang, and Y. Wang, “Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an Optimal Train Control Simulation model,” *Energies*, vol. 9, no. 2, pp. 1–19, 2016, doi: 10.3390/en9020105.
- [131] Comité de edición del Manual del ferrocarril Eléctrico, “Manual del ferrocarril eléctrico.” Crown, Tokyo, Japon, pp. 389–390, 394, 2007.
- [132] A. Capasso, R. Lamedica, A. Ruvio, M. Ceraolo, and G. Lutzemberger, “Modelling and simulation of electric urban transportation systems with energy storage,” *EEEIC 2016 - International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2016, doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555480.
- [133] R. Zhang *et al.*, “A study on the open circuit voltage and state of charge characterization of high capacity lithium-ion battery under different temperature,” *Energies*, vol. 11, no. 9, 2018, doi: 10.3390/en11092408.
- [134] N. A. Thong, “Application of Supercapacitor in Electrical Energy Storage System,” 2011.
- [135] M. C. Argyrou, P. Christodoulides, C. C. Marouchos, and S. A. Kalogirou, “Hybrid battery-supercapacitor mathematical modeling for PV application using Matlab/Simulink,” *Proceedings - 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/UPEC.2018.8541933.
- [136] G. Lopez Lopez, R. Schacht Rodriguez, V. M. Alvarado, J. F. Gomez-Aguilar, J. E. Mota, and C. Sandoval, “Hybrid PEMFC-supercapacitor system: Modeling and energy management in energetic macroscopic representation,” *Applied Energy*, vol. 205, no. May, pp. 1478–1494, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.063.
- [137] L. Kong, J. Yu, and G. Cai, “Modeling, control and simulation of a photovoltaic /hydrogen/ supercapacitor hybrid power generation system for grid-connected applications,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 46, pp. 25129–25144, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.097.
- [138] A. B. Cultura and Z. M. Salameh, “Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application,” *Proceedings of the International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications*, vol. 18, no. Cisia, pp. 876–882, 2015, doi: 10.2991/cisia-15.2015.235.
- [139] E. Locorotondo, L. Pugi, L. Berzi, M. Pierini, and G. Lutzemberger, “Online Identification of Thevenin Equivalent Circuit Model Parameters and Estimation State of Charge of Lithium-Ion Batteries,” *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, EEEIC/I and CPS Europe 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/EEEIC.2018.8493924.
- [140] G. Plett, *Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods*. Artech, 2015.
- [141] J. Arribas and J. Najera, “Máster Universitario en Ingeniería Eléctrica-UPM.
-

Apuntes: Vehículos Eléctricos.” Madrid, España, 2020.

- [142] A. Lahyani *et al.*, “Battery / Supercapacitors Combination in Uninterruptible Power Supply (UPS),” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 1509–1522, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2210736.
- [143] Oficina de Delineación Normas y Calidad, “Parque de Material Móvil.” Área de Ingeniería y Proyectos I+D+i, Madrid, España, p. 244, 2015, [Online]. Available: https://www.metromadrid.es/sites/default/files/documentos/PLANO_22500-2015.pdf.
- [144] Á. Muñoz Hernández, “Análisis de los límites de velocidad utilizados en la explotación de metro ligero oeste y propuesta de un perfil optimizado.” Universidad Pontificia de Comillas, Madrid, p. 147, 2015.
- [145] J. Carrasco Reyes, “El ferrocarril de Alta Velocidad,” in *Posibilidades de los servicios ferroviarios nocturnos en la futura red europea de Alta Velocidad*, Madrid, España, 2014, pp. 139–146.
- [146] P. Moreno Torres, “Energías Renovables para el transporte.” Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, p. 71, 2020.
- [147] K. Jhala *et al.*, “Coordinated Electric Vehicle Charging for Commercial Parking Lot with Renewable Energy Sources,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 5008, no. January, pp. 344–353, 2017, doi: 10.1080/15325008.2016.1248253.
- [148] J. . Dominguez-Navarro, J. . Dufo López, J. . Yusta-Loyo, J. . Artal-Sevil, and Bernal-Agustín, “Design of an electric vehicle fast-charging station with integration of renewable energy and storage systems,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 105, no. March 2018, pp. 46–58, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.08.001.
- [149] A. K. Karmaker, R. Ahmed, A. Hossain, and M. Sikder, “Feasibility Assessment & Design of Hybrid Renewable Energy Based Electric Vehicle Charging Station in Bangladesh,” *Sustainable Cities and Society*, p. 29, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.02.035.
- [150] O. Hafez and K. Bhattacharya, “Optimal design of electric vehicle charging stations considering various energ resources,” *Renewable Energy*, p. 31, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.01.066.
- [151] T. Aldhanhani, A. Al-durra, and E. F. El-saadany, “Optimal Design of Electric Vehicle Charging Stations Integrated with Renewable DG,” *2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)*, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2017.8378428.
- [152] Secretaria Nacional de Energía y Ambiente, “Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica de Panamá,” vol. 148, no. 28437. Gaceta oficial, Panamá, p. 6, 2019, [Online]. Available: https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/28090_A/GacetaNo_28090a_20160805.pdf.
- [153] L. Beites, “Máster Universitario en Ingeniería Eléctrica-UPM. Apuntes: Generación Distribuida.” Madrid, España, p. 282, 2021.
- [154] M. N. F. Nashed, M. Eskander, A. M. Sharaf, S. M. Ieee, S. E. Systems, and N.-Canada, “A Stand Alone Robust PV-FC-Electrolyzer Utilization Scheme,”
-

-
- International Journal of Engineering Research*, vol. 5013, no. 4, pp. 145–150, 2015, doi: 319-6890(online),2347-5013(print).
- [155] A. E. A. N. Ñ, “Hydrogen production from a PV / PEM electrolyzer system using a neural-network-based MPPT algorithm,” *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, no. June 2010, pp. 282–297, 2011, doi: 10.1002/jnm.
- [156] A. Allouhi, “Management of photovoltaic excess electricity generation via the power to hydrogen concept: A year-round dynamic assessment using Artificial Neural Networks,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 41, pp. 21024–21039, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.262.
- [157] Z. Zhang, K. Sato, Y. Nagasaki, M. Tsuda, and D. Miyagi, “Continuous operation in an electric and hydrogen hybrid energy storage system for renewable power generation and autonomous emergency power supply,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 41, pp. 23384–23395, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.028.
- [158] V. MARGAIX PIQUER, “Producción de hidrógeno on-site para automoción a partir de energía solar fotovoltaica.” Universidad Politénica de Valencia, Valencia, p. 72, 2016, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10251/59998>.
- [159] J. R. Morante, T. Andreu, G. García, J. Guilera, A. Tarancón, and M. Torrell, *Hidrógeno Vector energético de una economía descarbonizada*, 2da ed. España: Fundación Naturgy, 2020.
- [160] J. Hong *et al.*, “Operation Method for Hybrid UPS with Energy Storage System Function,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, no. 0123456789, p. 10, 2019, doi: 10.1007/s42835-019-00228-4.
- [161] J. Hun *et al.*, “A Novel Design of UPS with Useful Customer Load Management Function,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 569–579, 2019, doi: 10.1007/s42835-018-00060-2.