

Diseño del sistema de propulsión eléctrico para medio de transporte tipo metro

Design of an electric propulsion system for a subway-type means of transport

PhD. Walter Naranjo Lourido¹, Esp. Danna Alejandra Ávila Cohecha¹,
Esp. Yand David Quevedo Turriago¹, Msc. Javier Eduardo Martínez Baquero¹

¹Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Especialización en Instrumentación y Control Industrial, Villavicencio, Meta, Colombia.

Correspondencia: jmartinez@unillanos.edu.co

Recibido: 30 enero 2025. Aceptado: 25 junio 2025. Publicado: 01 julio 2025.

Cómo citar: W. Naranjo Lourido, D. A. Ávila Cohecha, Y. D. Quevedo Turriago, y J. E. Martínez Baquero, «Diseño del sistema de propulsión eléctrico para medio de transporte tipo metro», RCTA, vol. 2, n.º 46, pp. 58–67, jul. 2025.
Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/3550>

Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.



Resumen: Este documento presenta el diseño de un sistema de propulsión eléctrico para un transporte tipo metro. Para este diseño se planteó una ruta que evalúa la demanda energética de la movilidad de pasajeros en la ciudad de Villavicencio (Colombia). Lo anterior permite elegir las características técnicas necesarias para satisfacer la calidad de servicio brindado. Para esto se expuso un modelo matemático de la dinámica longitudinal del vehículo que estudia las fuerzas de interacción mediante la ecuación de Gillespie, permitiendo obtener información relevante de su comportamiento frente a su operación, lo anterior se determina mediante una simulación computacional. El estudio energético realiza la lectura de los datos de altimetría de la ruta elegida, junto con los ángulos de inclinación, por medio de la variación de alturas y distancias. La simulación diseñada ejecuta los diferentes datos del tren elegido junto a su respectivo remolque, siguiendo la trayectoria de la ruta elegida, con el fin de cuantificar las fuerzas, potencia y energía necesarias para realizar el recorrido total.

Palabras clave: diseño, eficiencia energética, electrificación vehicular, sistema propulsión, transporte sostenible.

Abstract: This document presents the design of an electric propulsion system for a metro-type transport. For this design, a route was proposed that evaluates the energy demand of passenger mobility in the city of Villavicencio (Colombia). The foregoing allows choosing the technical characteristics necessary to satisfy the quality of the service provided. For this, a mathematical model of the longitudinal dynamics of the vehicle was exposed, which studies the forces of interaction through Gillespie simulation, obtaining relevant information on its behavior compared to its operation, the above is determined by means of a computer simulation. The energy study performs the reading of the altimetry data of the chosen route, together with the inclination angles, through the variation of heights and distances. The simulated simulation executes the different data of the chosen train together

with its respective trailer, following the trajectory of the chosen route, in order to quantify the forces, power and energy necessary to carry out the total route.

Keywords: design, energy efficiency, vehicle electrification, propulsion system, sustainable transport.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el transporte global de carga y de pasajeros ha aumentado principalmente en áreas urbanas [1], [2], generando una alta congestión del tráfico y baja eficiencia energética. Por lo anterior, diferentes estudios intentan buscar una sostenibilidad energética dentro de los sistemas de propulsión de los automotores [3]. La industria automotriz es una de las industrias que más consume energía, por lo que últimamente investigaciones intentan encontrar soluciones asequibles, sostenibles y confiables dando alternativas al uso de combustibles derivados del petróleo [4], [5].

El servicio de transporte es uno de los mayores consumidores de energía y productores de emisiones de gases de efecto invernadero [6], [7]. Para lograr reducir estos altos consumos y emisiones, se necesitan diseñar modelos estratégicos para la intervención tecnológica, como lo es la electrificación de los motores usados [8], [9], y mejoras en la dinámica longitudinal de los vehículos, con el fin de optimizar estándares de rendimiento durante su funcionamiento [10], [11].

Buscando opciones más eficientes en movilidad de pasajeros, se tiene uno de los más antiguos y usados, como lo es “el tren”, debido a la posibilidad de transportar grandes pesos en carga y dando una opción energéticamente viable en el transporte masivo de pasajeros [12], [13]. A través del tiempo este tipo de transporte ha tenido mejoras tecnológicas especialmente en su fuente de energía, utilizando energía eléctrica como se muestran en [14], [15].

Un antecedente importante se da con el proyecto presentado en Portland Oregón, en el cual se tomaron datos para el modelado del consumo de energía de un tren eléctrico tomando en cuenta la eficiencia de frenado regenerativo instantáneo. Se encontró que la recuperación de energía reduce el consumo total de energía en un 20% mejorando así la eficiencia energética del sistema [16].

Por otra parte, en Ucrania se realizó la modernización sobre locomotoras de maniobras diesel, a las cuales se reemplazó un generador de

corriente continua por un motor de tracción asíncrono eléctrico, permitiendo reducir el consumo energético, mejorando la eficiencia y reduciendo los impactos negativos del sistema ferroviarios en el medio ambiente [17].

Con el sistema ferroviario urbano en China, más de 35 ciudades se ampliaron con nuevas líneas de metro [18]. El primer tranvía de energía con condensador eléctrico de doble capa (EDLC) se dió en Guangzhou Metro Corp, realizado por Zhuzhou Electric Locomotive CO, generando eficiencia energética y rendimiento en la red. En éste se generó el diseño de una estación de carga estacionaria para vehículos ferroviarios urbanos con el sistema de almacenamiento (EDLC).

La estación de carga estacionaria está diseñada con dos pequeños cargadores en paralelo. La topología del circuito de cada cargador está simplificada, optimizando costos y mejorando la confiabilidad. A futuro se pretende realizar una estación de carga híbrida lo cual requiere una mayor investigación [19].

Se han realizado estudios sobre las ventajas de tener vehículos híbridos, dando posibilidad de tener mayor oportunidad en el mercado automotriz [20], [21]. Lo anterior permite generar menores costos de mantenimiento, y a su vez, mejorar el impacto ambiental que generan la emisión continua de gases particulados de los vehículos totalmente a combustión como los vistos en [22]-[24].

Existen diversas herramientas de software y hardware que modelan el funcionamiento del accionamiento eléctrico, en donde se puede llevar a cabo un análisis computarizado del comportamiento de los diseños hechos, con el fin de obtener un diseño más eficiente, como el demostrado [25]-[27], un sistema de suministro eléctrico subterráneo se describe un modelo para un sistema de control de motores de tracción, así realizando diferentes cálculos con cargas diferentes, esto con el fin de hacer un mejor uso de la potencia [28]-[30].

En el año 2016, el congreso internacional de ingeniería industrial, aplicaciones y fabricación, presentó un artículo donde se proyectó un simulador en tiempo real, demostrando los diferentes modelos

matemáticos con diferentes tipos de accionamiento eléctrico para una locomotora de maniobras [31].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de la información de un fabricante de trenes con excelente trayectoria en movilidad, se definió por optar la búsqueda de un tren que cumpliera con las especificaciones de un motor diésel, con el objetivo de ver un cambio cuando se realice la transición a un sistema eléctrico. En la Tabla 1 se presentan todas las especificaciones y características técnicas de la serie elegida del tren.

Tabla 1: Especificaciones técnicas

| FICHA TECNICA (SERIE 9000) | |
|----------------------------------|-------------------|
| CONSTRUCTORES | |
| Partes mecánicas | Alsthom |
| Motor Diesel | S.A.C.M |
| Transmisión | Alsthom |
| Freno | Jourdain-Monneret |
| DATOS GENERALES | |
| Tipo de la Locomotora | BB 48 t |
| Potencia Nominal (ruedas) | 625 CV |
| Diámetro de Ruedas | 950 mm |
| Freno Neumático | Aire y Vacío DUAL |
| Freno Dinámico | No Tiene |
| Areneros (número) | 4 |
| Sistema de Hombre Muerto | tipo Hollande |
| Mando Múltiple | Hasta 2 |
| Registrador de Velocidad | Teloc |
| TRACCION | |
| Velocidad Máxima | 70 km/h |
| Esfuerzo de Tracción Arranque | 11.500 Kg |
| Esfuerzo de Tracción Continuo | 11.000 Kg |
| Esfuerzo de Tracción a Vel. Máx. | 2.400 Kg |
| MOTOR DIESEL | |
| Cantidad | 1 |
| Constructor | S.A.C.M. |
| Tipo | MGO V 12 ASHR |
| Número de Tiempos | 4 |
| Número de Cilindros | V 12 |
| Potencia Nominal | 925 CV |
| Velocidad Nominal | 1.500 rpm |
| Potencia de Utilización | 850 CV |

Dentro de la ficha técnica del tren se escogió al fabricante Alstom para la transmisión y partes mecánicas, en motor Diesel la empresa S.A.C.M. Estas fábricas tienen reconocimiento a nivel mundial en sus respectivas áreas.

2.1. Trayecto y dimensiones

En esta fase del proyecto se procede a la definición y establecimiento detallado de los requisitos fundamentales que guiarán el desarrollo del prototipo, los cuales se clasifican en cuatro categorías:

1. **Los de usuarios:** Se centran en las necesidades y preferencias específicas de los usuarios finales del sistema, asegurando una experiencia intuitiva y satisfactoria
2. **Funcionales:** Detallan las funciones y operaciones específicas que el sistema debe realizar para cumplir con su propósito principal
3. **De calidad:** Establecen criterios y estándares que garantizarán la eficiencia, confiabilidad y seguridad del sistema
4. **De implementación:** Abordan consideraciones prácticas y técnicas esenciales para la exitosa ejecución del proyecto

Este proceso de definición de requisitos sienta las bases para un desarrollo estructurado y orientado a resultados, alineado con las expectativas y necesidades clave identificadas.

Como es sabido, en Colombia se tiene como referencia el metro de la ciudad de Medellín, el cual se tuvo en cuenta para la cantidad máxima de vagones elegidos que tendría el diseño propuesto.

El proyecto se pretende establecer en la ciudad de Villavicencio (Colombia), la cual posee una octava parte de los habitantes de la ciudad de Medellín (531.275). La línea férrea se establece entre el barrio Porfía y el centro de la ciudad, debido a la alta congestión en la movilidad de esta zona. El tren estará diseñado con 2 vagones de tracción y 2 vagones de remolque.

Las dimensiones del tren propuesto están expuestas en la Tabla 2.

Tabla 2: Dimensiones del tren

| DIMENSIONES TRACCION | |
|----------------------|---------|
| Peso | 11.5 Tn |
| Altura | 3.7 m |
| Ancho | 2.8 m |

| | |
|-----------------------------|---------|
| Longitud | 11.36 m |
| DIMENSIONES REMOLQUE | |
| Peso | 6.5 Tn |
| Altura | 3.9 m |
| Ancho | 2.9 m |
| Longitud | 20.49 m |

Fuente: elaboración propia

2.2. Modelo matemático

Para iniciar el modelo matemático, se determinan las cargas o fuerzas sobre el eje del vehículo, siendo fundamental el análisis del rendimiento de aceleración y frenado. Estos análisis determinan las cargas por eje y esfuerzo de tracción que afecta la aceleración, la pendiente, la velocidad máxima y el esfuerzo de la barra de tiro. En la Fig. 1 se observa el diagrama de cuerpo libre del tren completo.

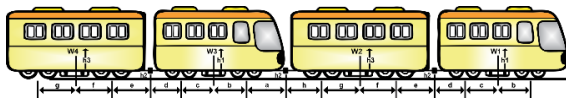


Fig. 1. Diagrama de cuerpo libre tren completo

Con el objetivo de hallar las ecuaciones para la capacidad en pendientes, primero se realiza el análisis de cuerpo libre de cada uno de los vagones (remolque y tracción) con el objetivo de encontrar las fuerzas. En la Fig. 2 se presenta el diagrama de cuerpo libre vagón 1 (tracción).

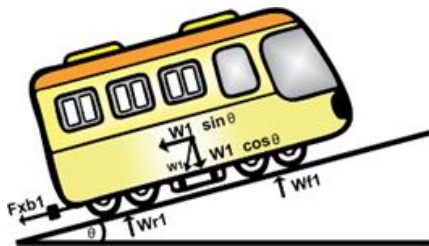


Fig. 2. Diagrama de cuerpo libre vagón 1 (tracción)

Tomando los momentos sobre el punto de contacto del neumático trasero, como se muestra en la ecuación (1), se obtiene:

$$\sum Ty = 0 = W1h1sin\theta - W1Ccos\theta + Fxb1h2 + Wf1(b + c) \quad (1)$$

Por otra parte, los momentos sobre el eje delantero del vagón de tracción se obtiene usando la ecuación (2):

$$\sum Ty = 0 = W1h1sin\theta + W1bcos\theta + Fxb1h2 + Wfr1(b + c) \quad (2)$$

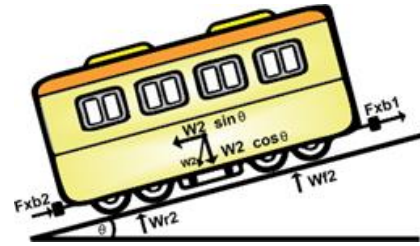


Fig. 3. Diagrama de cuerpo libre vagón 2 (Remolque)

En cuanto a los momentos sobre el punto de contacto del neumático trasero del vagón de remolque, se obtiene la ecuación (3). En la Fig. 3 se presenta el diagrama de cuerpo libre vagón 2 (remolque).

$$\sum Ty2 = 0 = W2h3sin\theta - W2gcos\theta - Fxb2h3 - Fxb1h3 + Wf2(g + f) \quad (3)$$

Los momentos sobre el eje delantero del vagón 2 (remolque), se obtiene la ecuación (4):

$$\sum Ty2 = 0 = W2h3sin\theta + W2fcos\theta - Fxb2h2 - Fxb1h3 + Wfr2(g + f) \quad (4)$$

Como se muestra en la ecuación (5), se obtiene el equilibrio de fuerzas a lo largo del eje longitudinal del remolque del tren. La Fig. 4 presenta el diagrama de cuerpo libre vagón 3 (tracción).

$$\sum Fx = 0 = Fxb1 + fxb2 - W2sin\theta \quad (5)$$

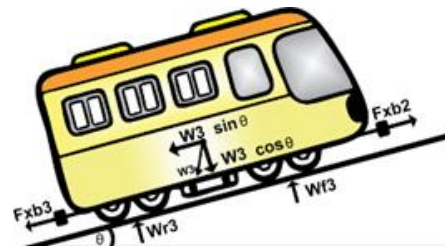


Fig. 4. Diagrama de cuerpo libre vagón 3(tracción)

Tomando momentos sobre el punto de contacto del neumático trasero del vagón 3 de tracción, se obtiene la ecuación (6):

$$\sum Ty3 = 0 = W3h1sin\theta - W3Ccos\theta + Fxb3h2 - fxb2h2 + Wf3(b + c) \quad (6)$$

Los momentos sobre el eje delantero del vagón 3 de tracción, se obtiene la ecuación (7) y en la Fig. 5 se presenta el diagrama de cuerpo libre vagón 4 (remolque).

$$\sum Ty3 = 0 = W3h1sin\theta + W3bcos\theta + Fxb3h2 + fxb2h2 + Wfr3(b + c) \quad (7)$$

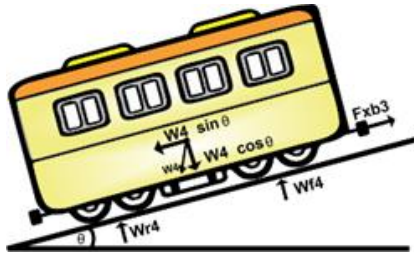


Fig. 5. Diagrama de cuerpo libre vagón 4 (Remolque)

Tomando momentos sobre el punto de contacto del neumático trasero del vagón 4 de remolque, se obtiene la ecuación (8):

$$\sum T_{y4} = 0 = W4h3\sin\theta - W2g\cos\theta - Fxb3h3 + Wf2(g + f) \quad (8)$$

Finalmente, los momentos sobre el eje delantero del vagón 4 de remolque, se obtiene mediante la ecuación (9):

$$\sum T_{y4} = 0 = W4h3\sin\theta + W2f\cos\theta - Fxb3h3 + Wfr2(g + f) \quad (9)$$

Usando la ecuación (10) se obtiene el equilibrio de fuerzas a lo largo del eje longitudinal del vagón 4 (remolque).

$$\sum F_x = 0 = fxb3 - W4\sin\theta \quad (10)$$

Es esencial comprender la importancia de la dinámica de los vehículos. Thomas D. Gillespie planteó la ecuación (11) que proporciona una expresión de la fuerza de tracción que puede obtenerse del motor.

$$Max = \frac{W}{g} ax = Fx - Rx - DA - Rhx - W \sin\theta \quad (11)$$

Donde:

- M = Masa del vehículo - W/g
- ax = Aceleración longitudinal (metros/seg²)
- Fx = Fuerza de tracción en el suelo
- Rx = Fuerzas de resistencia a la rodadura
- DA = Fuerza de resistencia aerodinámica
- Rhx = Fuerzas de enganche (remolque)
- Ø = Angulo de inclinación de la ruta

2.3. Altimetría

De acuerdo a la trayectoria definida para la simulación del proyecto, se utiliza como herramienta computacional Google Earth, para

tomar la altura y distancia de la ruta, presentados en la Fig. 6 y Fig. 7. Estos datos se organizan en una tabla de Excel para su análisis en Matlab®, donde se procede más adelante a calcular el ángulo.



Fig. 6. Ruta trazada



Fig. 7. Altura y distancia de la ruta

2.4. Estaciones

De lo anterior, se realizó la proyección de la primera línea del metro, teniendo una distancia total de 9 km, según el recorrido preestablecido, seleccionando 10 estaciones durante el recorrido con una separación entre éstas de 1 km, las cuales se listan a continuación:

1. Ciudad Porfía
2. Glorieta entrada Ciudad Porfía
3. Samán de la Rivera
4. Montecarlo sector 3
5. Estación de Gasolina Gazel
6. Serramonte 1
7. Fundadores
8. Llanocentro
9. Unicentro
10. Parque bomberos

2.5. Topología

Para este sistema de propulsión eléctrica, se optó por una topología inversora trifásica convencional, con el fin de convertir la energía suministrada por la catenaria o baterías a los motores AC, como se muestra en la Fig. 8. El inversor convencional bidireccional de tres fases, permite transformar la potencia desde la fuente de corriente alterna y viceversa, aprovechando de esta manera los momentos donde se presentan en la regeneración debido a las potencias negativas durante el recorrido del metro en los diferentes tramos entre estaciones.

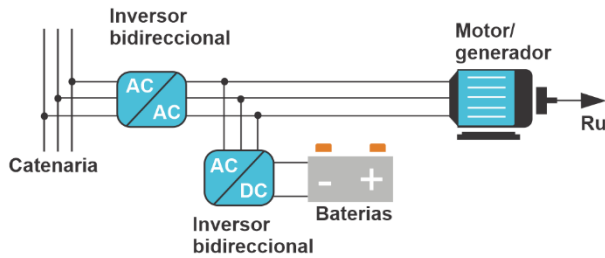


Fig. 8. Topología del inversor bidireccional que maneja el motor AC

3. RESULTADOS

De acuerdo con los datos obtenidos del tren, además de los datos de la altimetría se organizó y se ingresó al programa escogido, en este caso Matlab®. De lo anterior se obtienen diferentes resultados que fueron obtenidos siguiendo la metodología expuesta a continuación:

Se ingresaron los datos de altimetría a Matlab®, realizando una interpolación para obtener un mayor número de muestras a la original ingresada, de 163 datos a 936 datos, que se muestran en la Fig. 9.

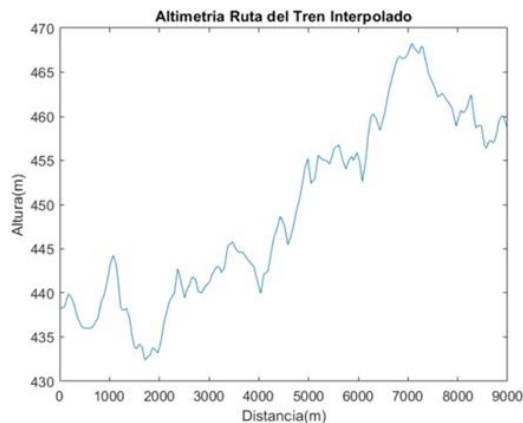


Fig. 9. Altimetría de la ruta preseleccionada para la línea del metro

De acuerdo a lo anterior, se procedió hallar los diferentes ángulos durante el recorrido por medio de la función trigonométrica tangente inversa. Para lograr esto, se dividen los ángulos para cada tramo con el fin de analizar el denominado ciclo de conducción. Como cada estación tiene en promedio una distancia de 1 km, el ciclo de conducción es estándar para cada tramo. En la Fig. 10 se muestra el ciclo de conducción con respecto al tiempo por tramo recorrido, siendo la velocidad máxima de 70 km/h.

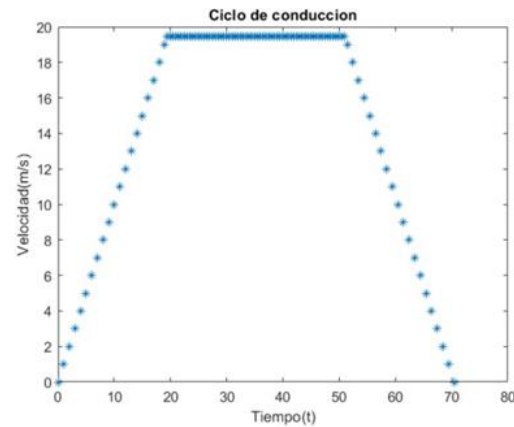


Fig. 10. Ciclo de conducción

Por otra parte, se hallaron las fuerzas ejercidas del tren en cada tramo mediante la ecuación (11), de la cual se obtuvo que durante el recorrido en el tramo 1 (ubicado entre la estación Ciudad Porfía y la estación Glorieta entrada Ciudad Porfía) se tiene una mayor fuerza aplicada de 16.1 kNm, como se evidencia en la Fig. 11. La fuerza es mayor debido a la necesidad que el tren supere un trayecto con mayor grado de inclinación.

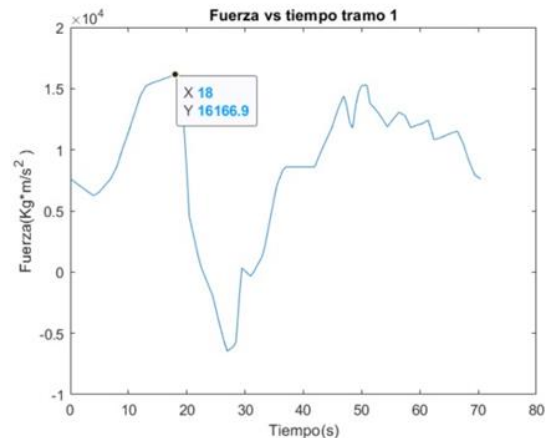


Fig. 11. Mayor fuerza obtenida ruta preseleccionada, tramo 1

De igual modo, se analiza el tramo donde el metro tiene la mayor fuerza total consumida durante el recorrido, gastando 959.04 kNm (desde la Estación de Gasolina Gazel hasta Estación Serramonte 1), como resultado de superar la altimetría para acelerar el tren. Ver Fig. 12.

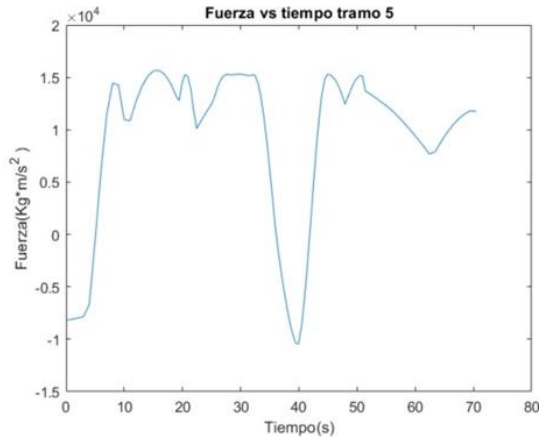


Fig. 12. Mayor fuerza consumida en un tramo de ruta. Tramo 5

Con lo anterior se procede a calcular las diferentes potencias consumidas durante el recorrido por las estaciones, utilizando la ecuación (12), teniendo como referente el ciclo de conducción mostrado en la Fig. 10.

$$P = F * V \quad (12)$$

Por otra parte, se determina la potencia máxima (Pmax) consumida por el metro durante el desplazamiento. Este alto consumo ocurre entre la estación Ciudad porfía y Estación Glorietta entrada Ciudad Porfía, con un valor de 301 kW. Este parámetro permite seleccionar los motores de propulsión. En la Fig. 13 se muestra el tramo mencionado anteriormente.

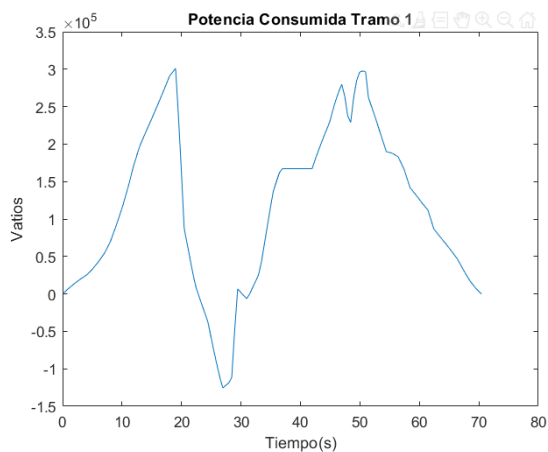


Fig. 13. Tramo de mayor potencia consumida en ruta. Tramo 1

Por criterios de diseño, la potencia de los motores se debe sobredimensionar en un 10%, lo cual es calculado anteriormente. Por lo tanto, se requiere que los cuatro motores ejerzan en sumatoria una potencia de 331.1 kW, permitiendo un rendimiento idóneo durante el ciclo de conducción. Después de

hallada la potencia necesaria para el desplazamiento del metro, se integra para cuantificar el consumo de energía en cada tramo, según la ecuación (13).

$$E_{total} = \int_0^t P dt \quad (13)$$

Cuando se calcula la energía total consumida por tramo, se determina que el valor máximo es de 4.45 kW/hora correspondiente al tramo 5 (ubicado desde la Estación de G0asolina Gazel hasta Estación Serramonte 1). Posteriormente, realizando un análisis del consumo medio de energía entre estaciones, se determina la autonomía de un sistema de almacenamiento de energía para 500m. De lo anterior se obtiene un requerimiento de 2.23 kWh.

4. CONCLUSIONES

Una de las ventajas de este sistema de propulsión eléctrico, sistema de conversión y BESS (Battery Energy Storage System), es que cuenta con una mayor eficiencia energética que un vehículo a combustión, cercana al 70%. Para el caso del metro, tendrá una vía exclusiva sin afectaciones en el tráfico diario. La ventaja anterior se puede reflejar en una disminución de estrés causado por la congestión vehicular y experiencias en el servicio público, volviendo a Villavicencio una ciudad más sostenible y con mejor calidad de vida.

La selección de la primera línea del metro se estableció como futura estrategia de movilidad, entre los sectores de Ciudad Porfía y el centro de la ciudad de Villavicencio. Con esto se pretende mejorar la movilidad de aproximadamente 15.000 viajeros en la jornada de servicio del metro (5 am a 11 pm), tomando un promedio de 18 minutos entre estaciones. Es importante resaltar que la demora en el tráfico vehicular convencional (no en motocicleta) sería de aproximadamente 30 minutos.

El proyecto propone cuatro motores por vagón, siendo el motor Weg con referencia SD125363CQA el seleccionado. Estos cuatro motores suman una potencia total 480 kW para darle servicio al metro con un consumo máximo de 330 kW.

La topología elegida, inversor trifásico convencional, permite el aprovechamiento de las potencias negativas derivadas de la altimetría del terreno y de su cinética, aprovechándose de la bidireccionalidad del flujo energético.

En caso de una falla eléctrica, se opta por realizar un sistema de baterías cuya autonomía es de 500 m,

tomando como referencia el tramo de mayor energía consumida para el cálculo necesario de su almacenamiento. Se elige una batería con una capacidad que logre 2.23 kWh, a 12V y 200A. La referencia seleccionada es la batería de LiFePO UU-200Gp.

Ambas rutas, Ciudad Porfía - Centro y viceversa, fueron simuladas, de las cuales se obtiene que el consumo energético es menor (18,55 kWh) entre las estaciones Centro a Porfía, comparado con los 26,32 kWh entre Ciudad Porfía y el Centro debido a su altimetría es descendente. Lo anterior permite cuantificar un 29,5% menos de energía para ese trayecto.

Como recomendación a futuros proyectos orientados a la electromovilidad masiva de pasajeros, se recomienda un análisis de materiales del metro que permitan disminuir su peso, volviéndolo un vehículo más liviano.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad de los Llanos y a la Especialización en Instrumentación y Control Industrial por su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] ABBEL, “Global mobility trends and analyses: The impact of COVID-19 on mobility,” netherlands, 2021. [Online]. Available: <https://www.government.nl/documents/reports/2021/12/31/global-mobility-trends-and-analyses-the-impact-of-covid-19-on-mobility>
- [2] T. Denne and L. Wright, “Public and Passenger Transport: historical trends and drivers of demand,” New zealand, 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/315695317%0APublic>
- [3] J. W. Detlev Mohr, Vadim Pokotilo, “Urban Transportation Systems of 25 Global Cities,” Nueva York, 2021. [Online]. Available: https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business_functions/operations/our_insights/building_a_transport_system_that_works_new_charts_five_insights_from_our_25_city_report_new/elements-of-success-urban-

- transportation-systems-of-25-global-cities-july-2021
- [4] D. Liyuan, Q. Yue, W. Wenjing, and Q. Guoliang, “Current situation of energy saving and emission reduction of urban public transportation and green development suggestion,” in *International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City, ICITBS 2016*, 2017, pp. 14–17. doi: 10.1109/ICITBS.2016.17.
- [5] C. Di Palma, V. Galdi, V. Calderaro, and F. De Luca, “Driver Assistance System for Trams: Smart Tram in Smart Cities,” Madrid, Spain, 2020. doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160780.
- [6] M. Jacyna, M. Wasiak, K. Lewczuk, and G. Karoń, “Noise and environmental pollution from transport: Decisive problems in developing ecologically efficient transport systems,” *J. Vibroengineering*, vol. 19, no. 7, pp. 5639–5655, 2017, doi: 10.21595/jve.2017.19371.
- [7] R. Borck, “Public transport and urban pollution,” *Reg. Sci. Urban Econ.*, vol. 77, pp. 356–366, 2019, doi: 10.1016/j.regsciurbeco.2019.06.005.
- [8] M. P. Carter *et al.*, “Energy and Environment,” in *PUBLIC TRANSPORTATION American Public Transportation Association Vice Presidents*, 55th ed., no. Marzo, American Public Transportation Association, 2004, pp. 26–27.
- [9] M. Kubański, “Prospects for the Use of Electric Vehicles in Public Transport on the Example of the City of Czechowice-Dziedzice,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 44, no. 2019, pp. 110–114, 2020, doi: 10.1016/j.trpro.2020.02.016.
- [10] V. Ferencey and M. Omachelová, “Mathematical modelling of the motion dynamics in the longitudinal direction of the electric vehicle,” in *2016 Cybernetics and Informatics (k&I)*, 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/CYBERI.2016.7438632.
- [11] D. Vosahlik, T. Hanis, and M. Hromcik, “Vehicle longitudinal dynamics control based on LQ,” in *2019 22nd International Conference on Process Control (PC 19)*, 2019, pp. 179–184. doi: 10.1109/PC.2019.8815044.
- [12] Vukan R. Vuchic, “Streetcars/Tramways,” in *Urban Transit*, Copyright, Ed. New

- Jersey: Copyright, 2007, pp. 32–38. doi: 10.1201/9781420041217.ch61.
- [13] S. Zieger y N. Niessen, “Opportunities and Challenges for the Demand-Responsive Transport Using Highly Automated and Autonomous Rail Units in Rural Areas,” *2021 IEEE Intell. Veh. Symp.*, pp. 77–82, 2021, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9575561&isnumber=9575130%0A>
- [14] G. S. Zinoviev and S. I. Salva, “Ways of modernization of systems of electro-supply and electric equipment high-voltage electric locomotives of constant voltage,” *IEEE 11th Int. Conf. Actual Probl. Electron. Instrum. Eng.*, pp. 207–210, 2012, doi: 10.1109/APEIE.2012.6629082.
- [15] M. Carmen, R. Lamedica, R. Bartoni, and G. Maranzano, “Energy management in metro-transit systems: An innovative proposal toward an integrated and sustainable urban mobility system including plug-in electric vehicles,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 12, pp. 2127–2138, 2011, doi: 10.1016/j.epsr.2011.08.004.
- [16] J. Wang and H. A. Rakha, “Electric train energy consumption modeling,” *Appl. Energy*, vol. 193, pp. 346–355, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.02.058.
- [17] V. Kuznetsov *et al.*, “Method of Selecting Energy-Efficient Parameters of an Electric Asynchronous Traction Motor for Diesel Shunting Locomotives—Case Study on the Example of a Locomotive Series ChME3 (ЧМЭ3, ČME3, ČKD S200),” *Energies*, vol. 15, no. 1, p. 317, 2022, doi: 10.3390/en15010317.
- [18] W. Wang, W. Du, K. Liu, and L. Tong, “The Evolution of China’s Railway Network (CRN) 1999–2019: Urbanization Impact and Regional Connectivity,” *Urban Rail Transit*, vol. 8, no. 2, pp. 134–145, 2022, doi: 10.1007/s40864-022-00168-9.
- [19] H. Li, J. Peng, W. Liu, and Z. Huang, “Stationary charging station design for sustainable urban rail systems: A case study at zhuzhou electric locomotive co., China,” *Sustain.*, vol. 7, no. 1, pp. 465–481, 2015, doi: 10.3390/su7010465.
- [20] R. León, C. Montaleza, J. L. Maldonado, M. Tostado-Véliz, and F. Jurado, “Hybrid Electric Vehicles: A Review of Existing Configurations and Thermodynamic Cycles,” *Thermo*, vol. 1, no. 2, pp. 134–150, 2021, doi: 10.3390/thermo1020010.
- [21] A. Stanescu, N. Mocioi, and A. Dimitrescu, “Hybrid Propulsion Train with Energy Storage in Metal Hydrides,” IEEE, bucuresti, 2019. doi: 10.1109/EV.2019.8892853.
- [22] Y. Zhang, S. Yu, W. Wang, Y. Fu, and W. Chen, “Fast matching design on fuel cell hybrid system of tram,” in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/ITEC-AP.2017.8080855.
- [23] J. J. Mwambeleko and T. Kulworawanichpong, “Battery and accelerating-catenary hybrid system for light rail vehicles and trams,” in *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/IEECON.2017.8075778.
- [24] Y. Yan, J. Liu, Q. Li, and W. Chen, “Research on hierarchical energy management strategy in fuel cell hybrid tram system,” in *Proceedings - 2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2017, pp. 1630–1634. doi: 10.1109/CAC.2017.8243029.
- [25] A. Y. Zakharov, N. V. Potekhin, and V. V. Korolev, “Simulation of control system for traction electric motors control of subway cars,” in *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2019, pp. 747–751. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656704.
- [26] H. Zhipeng, J. Xin, and S. Haiming, “Analysis of Control Strategies of an AC All Electric Propulsion System without Converters,” in *2022 Power System and Green Energy Conference (PSGEC)*, 2022, pp. 1004–1011. doi: 10.1109/PSGEC54663.2022.9881082
- [27] S. Valadkhani, O. Alkandri, Z. Akhmetov, and Z. Pantic, “Comprehensive Analysis and Modeling of Conventional and Hybrid Electric Ferry Power and Propulsion Systems,” in *2023 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, 2023, pp. 99–106. doi: 10.1109/ESTS56571.2023.10220506.
- [28] W. Wang and P. Bao, “Research on Improving Transient Characteristics of Electric Ship Propulsion System by Using Flywheel Energy Storage System,” in *2023 10th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA)*,

- 2023, pp. 185–189. doi:
10.1109/IFEEA60725.2023.10429231.
- [29] K. M. Sidorov, A. G. Grishchenko, B. N. Sidorov, and V. I. Stroganov, “Electric Propulsion System Simulation as Basis for the Electric Vehicle Digital Twin Development,” in *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2021, pp. 1–6. doi:
10.1109/IEEECONF51389.2021.9416111.
- [30] Y Hong and W Shi, "Impulse Load Energy Supply Strategy of Ship Regional Distribution Power System Based on Flywheel Energy Storage Technology", *Ship Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 103-109, 2023.
- [31] K. E. Nesterov, M. V. Mudrov, and V. I. Zelentsov, “Simulator of the shunting locomotive’s electric drive,” *2016 2nd Int. Conf. Ind. Eng. Appl. Manuf. ICIEAM 2016 - Proc.*, pp. 7–10, 2016, doi:
10.1109/ICIEAM.2016.7911523.