UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Metodología para la configuración energética de un bus eléctrico

Casos de estudio: Líneas 27 y 100 del sistema de transporte público de la ciudad de Cuenca – Ecuador.

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ

Nombre del autor:

WILLIAM MANUEL GUIÑANSACA CHINCHILIMA

Nombre del director:

DANIEL CORDERO-MORENO

CUENCA – ECUADOR

2020

Dedicatoria:

A mis padres, mis queridas hermanas Jenny y Priscila, que han sido pilar fundamental a lo largo de mi vida personal como profesional. De igual manera, quiero dedicar esta tesis a Anita y Janneth, quienes no solo me han brindado todo su apoyo durante este trayecto, sino también me han demostrado lo grandioso del ser humano. A todos ellos, mi mayor admiración.

William Guiñansaca

Agradecimiento:

A todos los profesores que conforman la escuela de ingeniería mecánica automotriz, y de manera especial, a los miembros de la junta académica y miembros de ERGON por su apoyo incondicional en todo momento durante el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA: ii
AGRADECIMIENTO: iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS iv
INDICE DE FIGURAS v
INDICE DE TABLAS v
RESUMEN vi
ABSTRACT vii

I. INTRODUCCIÓN 1
II. MATERIALES Y METODOS 3
A. Definir parámetros del vehículo 3
B. Definición de parámetros del modelo 4
C. Características de la simulación. 6
D. Evaluación de distintos buses eléctricos. 6
III. RESULTADOS 7
A. Simulación del bus eléctrico BYD K9 7
B. Validación del modelo 9
C. Selección de bus que minimice el consumo 9
IV. CONCLUSIONES 10
V. RECONOCIMIENTO 10
VI. REFERENCIAS 10
VII. Anexos 11

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Diagrama de fuerzas que actúan sobre el bus 2
Fig. 2 Bus eléctrico de baterías BYD K9 3
Fig. 3 Pruebas de capacidad de aceleración 3
Fig. 4 Curva de torque BYD K9 4
Fig. 5. Mapa de Eficiencia del motor eléctrico 4
Fig. 6. Modelo de simulación energética en Simulink 6
Fig. 7. Energías y PDA de la ruta B-R 7
Fig. 8. Energías y PDA de la ruta R-B 8
Fig. 9. Energías y PDA de la ruta S-B 8
Fig. 10. Energías y PDA de la ruta B-S 8
Fig. 11 Coeficiente de determinación sin considerar ciclos muertos 9
Fig. 12 Coeficiente de determinación considerando los ciclos muertos 9
Fig. 13. Rendimiento de buses eléctricos en la (a) Línea 100 y (b) Línea 27 9
Fig. 14. Consumo energético a media carga en ambas rutas 10

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones del bus eléctrico BYD K9 3
Tabla 2. Características de los ciclos de conducción y perfil de altitud 4
Tabla 3. Parámetros usados en la simulación 5
Tabla 4. Parámetros usados para los buses eléctricos Volvo 7900, Kamaz y Tata 7
Tabla 5. Resultados obtenidos con la simulación energética 8
Tabla 6. Resumen de jornada de trabajo 10

Metodología para la configuración energética de un bus eléctrico.

Caso de estudio: Líneas 27 y 100 del sistema de transporte público de la ciudad de Cuenca – Ecuador.

RESUMEN

Debido al calentamiento global, los buses eléctricos de baterías están incorporándose a las flotas de transporte. Como sus homónimos, los buses diésel, estos deben satisfacer las exigencias en ruta del día a día. En este proyecto se desarrolló una metodología para la correcta implementación de buses eléctricos de transporte urbano, a través del análisis energético en condiciones reales de operación. Con la ayuda de un modelo de simulación desarrollado en Matlab/Simulink, se determinó la metodología para evaluar el desempeño energético de la configuración de cualquier vehículo eléctrico, es decir, se evaluó el consumo de energía, el rendimiento, la regeneración de energía y el estado de carga. Para validar el modelo, el bus eléctrico BYD K9 fue empleado como caso de estudio durante su estancia en la ciudad de Cuenca-Ecuador. Los datos de consumo energético diario, medidos por la Universidad de Cuenca, fueron usados para compararlos con los resultados obtenidos a través de la simulación. El coeficiente de determinación que se obtuvo es de 0.8356, el cual cuantifica el ajuste del modelo. Además, se evaluó cuatro tipos de buses eléctricos: Volvo 7900, Kamaz y Tata junto al modelo BYD K9 para seleccionar el vehículo que minimice el consumo energético, demostrando que por su autonomía, el bus eléctrico BYD K9, tiene el mejor rendimiento.

Palabras clave. – Bus eléctrico, análisis energético vehicular, servicio de transporte urbano.

Ing. Robert Rockwood

Director de Escuela

Daniel Cordero – Moreno

Director del trabajo de titulación

William Guiñansaca

Autor

Methodology for the energy configuration of an electric bus

Case studies: Buses lines 27 and 100 from Cuenca - Ecuador transport public service

ABSTRACT

Battery electric buses are joining the transportation fleets due to global warming. These electric buses must satisfy the day-to-day demands just as diesel buses do. In this project, a methodology was developed for the correct implementation of electric urban transport buses, carrying out an energy analysis in real operating conditions. The methodology to evaluate the energy performance of the configuration of an electric vehicle was determined using the MatLab / Simulink software, where, energy consumption, performance, energy regeneration, and state of charge were evaluated. The BYD K9 electric bus was used to validate the computational model during its stay in the city of Cuenca-Ecuador. The daily energy consumption data measured by the University of Cuenca were compared with the results of the computational model. The coefficient of determination obtained is 0.85, which shows an optimal fit of the model. In addition, four types of electric buses were evaluated: Volvo 7900, Kamaz, Tata, and BYD K9 to select the vehicle that minimizes energy consumption. BYD K9 electric bus has the best performance due to its autonomy and consumption.

Keywords. **–** Electric bus vehicle, vehicle energy analysis, urban transport service.

Ing. Robert Rockwood

Director de Escuela

Daniel Cordero – Moreno

Director del trabajo de titulación

Translated by

William Guiñansaca

Autor

Language Unit

Trabajo de titulación.

William Manuel Guiñansaca Chinchilima

Noviembre, 2021

Metodología para la configuración energética de un bus eléctrico.

Caso de estudio: Líneas 27 y 100 del sistema de transporte público de la ciudad de Cuenca – Ecuador.

INTRODUCCIÓN

Los buses eléctricos representan el futuro del transporte y es necesario que estos puedan satisfacer las necesidades de operación en ruta, de la misma manera que los buses diésel. Por ello, es de vital importancia que la configuración del bus eléctrico sea óptima y examinada a través de un proceso estandarizado. Por tanto, la presente investigación tiene como objetivo desarrollar una metodología para la configuración energética de un bus eléctrico, con la ayuda de un modelo de evaluación energética con el software Matlab Simulink. Es necesario validar este modelo a través de pruebas de operación en ruta del bus eléctrico de baterías BYD K9 en las líneas 27 y 100 del servicio de transporte urbano de la ciudad de Cuenca en Ecuador.

Metodología para la configuración energética de un bus eléctrico.

Caso de estudio: Líneas 27 y 100 del sistema de transporte público de la ciudad de Cuenca – Ecuador.

Guiñansaca Chinchilima William Manuel

Universidad del Azuay, Facultad de Ciencia y Tecnología,

Escuela de Ingeniería Automotriz,

Av. 24 de mayo 7-77 y Hernán Malo, Cuenca, Ecuador

william.guinansaca@es.uazuay.edu.ec

Resumen.

Debido al calentamiento global, los buses eléctricos de baterías están incorporándose a las flotas de transporte. Como sus homónimos, los buses diésel, estos deben satisfacer las exigencias en ruta del día a día. En este proyecto se desarrolló una metodología para la correcta implementación de buses eléctricos de transporte urbano, a través del análisis energético en condiciones reales de operación. Con la ayuda de un modelo de simulación desarrollado en Matlab/Simulink, se determinó la metodología para evaluar el desempeño energético de la configuración de cualquier vehículo eléctrico, es decir, se evaluó el consumo de energía, el rendimiento, la regeneración de energía y el estado de carga. Para validar el modelo, el bus eléctrico BYD K9 fue empleado como caso de estudio durante su estancia en la ciudad de Cuenca-Ecuador. Los datos de consumo energético diario, medidos por la Universidad de Cuenca, fueron usados para compararlos con los resultados obtenidos a través de la simulación. El coeficiente de determinación que se obtuvo es de 0.8356, el cual cuantifica el ajuste del modelo. Además, se evaluó cuatro tipos de buses eléctricos: Volvo 7900, Kamaz y Tata junto al modelo BYD K9 para seleccionar el vehículo que minimice el consumo energético, demostrando que por su autonomía, el bus eléctrico BYD K9, tiene el mejor rendimiento.

***Palabras clave.* – Bus eléctrico, análisis energético vehicular, servicio de transporte urbano.**

Abstract.

Battery electric buses are joining the transportation fleets due to global warming. These electric buses must satisfy the day-to-day demands just as diesel buses do. In this project, a methodology was developed for the correct implementation of electric urban transport buses, carrying out an energy analysis in real operating conditions. The methodology to evaluate the energy performance of the configuration of an electric vehicle was determined using the MatLab / Simulink software, where, energy consumption, performance, energy regeneration, and state of charge were evaluated. The BYD K9 electric bus was used to validate the computational model during its stay in the city of Cuenca-Ecuador. The daily energy consumption data measured by the University of Cuenca were compared with the results of the computational model. The coefficient of determination obtained is 0.85, which shows an optimal fit of the model. In addition, four types of electric buses were evaluated: Volvo 7900, Kamaz, Tata, and BYD K9 to select the vehicle that minimizes energy consumption. BYD K9 electric bus has the best performance due to its autonomy and consumption.

Keywords. – Electric bus vehicle, vehicle energy analysis, urban transport service.

I. INTRODUCCIÓN

La generación de emisiones de CO_2 debido al uso de combustibles fósiles intensifica la amenaza del cambio climático. Durante el año 2020, los altos niveles de concentración de CO_2 han generado un ascenso de la temperatura mundial cercano a 1°C con respecto a los niveles preindustriales [1]. Es así que, la Organización de las Naciones Unidas, en la convención marco sobre el cambio climático, determinó acciones necesarias para un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono establecidas en el acuerdo de París [2]. El objetivo es mantener la elevación de la temperatura por debajo de los 2°C limitándolo hasta 1,5°C. Por supuesto, para cualquier esfuerzo en cumplir con los objetivos climáticos es fundamental incluir el sector energético que representa el 80% de las emisiones, subrayando la importancia crítica de reducir las emisiones por combustión de combustibles fósiles [3]. El sector transporte durante el año 2018, fue responsable del 37% de las emisiones globales y responsable del 67% de las emisiones en Ecuador durante el mismo año[4]. Además, el sector transporte es el principal consumidor de energía en el país con el 42% de la energía total [5].

Los buses eléctricos están siendo operados en fases de demostración o programas pilotos alrededor del mundo como por ejemplo: China, Europa y Norteamérica [6]. Incluso el

sistema de transporte público de Ecuador, cuenta con una flota de 20 buses eléctricos en la ciudad de Guayaquil, [7] dentro de un parque automotor dominado por unidades de motores a combustión con el 99% de los vehículos matriculados durante el año 2018 [8]. No obstante, las últimas iniciativas gubernamentales como La ley de Eficiencia Energética, demuestra la intención por acentuar el uso de vehículos eléctricos en el país [9]. Benz et al. [10] mencionan que para la implementación de buses eléctricos en cualquier ciudad, es preciso definir parámetros como: el costo inicial, parámetros del vehículo y del tren de potencia, y finalmente, los costos de funcionamiento y mantenimiento. Sin embargo, para una evaluación puramente energética es necesario un análisis de los parámetros del vehículo y tren de potencia que garantice la eficiencia y la productividad del vehículo durante su operación.

El análisis energético se basa en las ecuaciones de la dinámica de vehículos, las cuales se fundamentan en la segunda ley de Newton. Gillespie [11] realiza un análisis cuasi estático del vehículo mediante un diagrama de cuerpo libre, donde expresa matemáticamente todas las fuerzas que se oponen al movimiento; es decir, las resistencias que el vehículo debe ser capaz de vencer para moverse como muestra la Fig. 1. Para dar solución a las ecuaciones es necesario definir todas las variables que intervienen en las mismas. Estas variables se denominan parámetros y se agrupan en parámetros del vehículo, ambientales, de operación y del tren motriz.

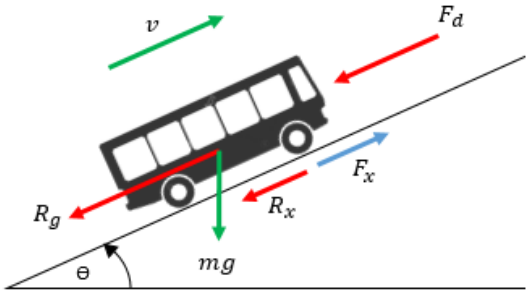


Fig. 1. Diagrama de fuerzas que actúan sobre el bus

Los parámetros del vehículo son: el área frontal (*A*), la masa (*M*), el radio dinámico (*Rd*), coeficiente de arrastre (*cd*) y el coeficiente de resistencia a la rodadura (*fr*). Para la masa del vehículo se plantean 3 escenarios de carga que son con el bus lleno o a plena carga, el bus vacío o baja carga y a media carga, donde se multiplica la mitad de la capacidad total de pasajeros por 70 kg, como indica la normativa ecuatoriana INEN 2205 [12], [13]. El radio dinámico es el radio real del neumático que se encuentra deformado por el peso y el movimiento del mismo y llega a ser el 97% del radio nominal [14]. El coeficiente de arrastre se define como la resistencia de un objeto en un medio fluido como el aire y el coeficiente de resistencia a la rodadura expresa la fuerza opuesta al movimiento por cada unidad de carga soportada [15]. Los parámetros ambientales comprenden la densidad del aire (ρ_a) y la gravedad universal (*g*). Para determinar el valor de la densidad del aire es necesario conocer los valores de presión y temperatura del lugar de operación y finalmente aplicar la ecuación ideal de los gases [12].

Los parámetros de operación vienen dados por el ciclo de conducción y el perfil de altitud. El ciclo de conducción (CDC) se describe mediante una gráfica de velocidad versus tiempo e indica la forma típica de manejo de un vehículo en una región o ruta específica. El perfil de altitud (PDA) describe el perfil topográfico de la carretera [14]. Los parámetros del tren motriz se subdividen en parámetros del motor que son la potencia (*P*), torque (*T*), eficiencia (η_e) y velocidad angular del motor (ω_e). Los parámetros de la transmisión que incluye la relación de transmisión para cada uno de las marchas (N_{td}), el número de marchas, la eficiencia de la transmisión (η_{td}) y la velocidad máxima (v). Finalmente, los parámetros de la batería que son la capacidad de la batería (*Ebatt*), la potencia de carga (P_c) y la autonomía [14].

Para dar solución a las ecuaciones Kulworawanichpong et al. [16] desarrollaron un modelo de simulación de un bus eléctrico en Matlab. La intención es estimar el rendimiento de un bus eléctrico durante su operación, con el objetivo de obtener la capacidad necesaria de la batería a bordo y el rango del motor de tracción. El modelo de simulación empieza por ingresar todas las variables en el tiempo igual a cero para realizar los cálculos de las variables cinéticas como: la fuerza, torque y potencia. Repitiéndose estas operaciones en un bucle hasta que el tiempo de operación se complete. Zumba [12] evaluó distintas configuraciones del tren de potencia de un bus eléctrico de baterías que satisfaga las condiciones de operación en rutas específicas, elaborando un modelo de evaluación energética en Matlab/Simulink. Este modelo permite determinar la demanda de energía en rueda, al mismo tiempo que, el modelo permite ingresar parámetros como la curva de torque, potencia, ciclo de conducción y perfil de altitud. De esta manera, es posible determinar si la configuración del tren de potencia del vehículo analizado, satisface las exigencias en ruta. Sin embargo, ninguno de estos modelos propuestos toma en consideración una de las características más significativas del bus eléctrico de baterías como la regeneración de energía.

El vehículo eléctrico es capaz de convertir energía cinética en electricidad recargando la batería durante el frenado. Gao et al. [17] elaboraron un modelo que asume que la regeneración debido al frenado ocurre cuando la aceleración no excede un valor de -3 m/s² y la velocidad no ha caído debajo de 5 m/s. Estas restricciones son usadas para distinguir eventos de frenado rápido (frenado de emergencia) o para evitar una regeneración muy baja. Los datos del ciclo de conducción son tomados de varios buses que cumplen una misma ruta durante un año, por tanto los datos son representativos de las condiciones reales de operación de buses diésel.

Una vez realizado el modelo de evaluación energética es necesario validarlo, y para ello, durante el año 2019 gracias a la gestión de la Alcaldía de Cuenca, la Universidad de Cuenca y la empresa BYD; el bus eléctrico de baterías BYD K9 realizó recorridos en la ciudad de Cuenca (mirar Fig. 2 y Tabla 1.) ofreciendo servicio de transporte urbano en las rutas de las líneas 100 y 27 establecidas por la Cámara de Transporte de Cuenca [18]. Donde, la Universidad del Azuay, fue participe del análisis técnico llevado a cabo, donde se realizaron algunas pruebas como: capacidad de aceleración (alcanza una

velocidad de 40 km/h en 6.41s) Fig. 3, pruebas coast down (obtención de coeficiente de arrastre y coeficiente de resistencia a la rodadura). Además, se tomó datos para la construcción de los distintos CDC y PDA. Cabe recalcar, el uso de los valores de consumo de energía medidos por la Universidad de Cuenca para contrastarlos con los valores de consumo energético simulados mediante el modelo computacional.

Fig. 2. Bus eléctrico de baterías BYD K9

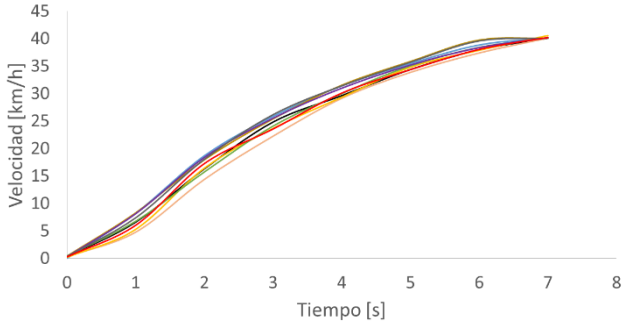


Fig. 3. Pruebas de capacidad de aceleración

Tabla 1. Especificaciones del bus eléctrico BYD K9

Dimensiones	
Largo x ancho x alto	12540 mm x 2550 mm x 3411 mm
Distancia entre ejes	6150 mm
Saliente delantero / trasero	2700 mm / 3690 mm
Angulo de aproximación	8.5°
Número de puertas	3
Radio de giro	≤ 12 m
Peso en vacío	≤13850 kg
Max peso	≤19500 kg
Capacidad	80 pasajeros
Rendimiento	
Rango de operación	300 km
Velocidad máxima	50 km/h
Tiempo de aceleración	≤ 22 s
Gradeabilidad	20%
Motor	BYD AC motor síncrono de imanes permanentes
Modelo de motor	BYD - 2912TZ - XY - A
Max. Potencia de motor	300 kW - 402 HP
Torque máximo	1100 Nm
Carga y batería	
Capacidad de la batería	324 kWh
Potencia de carga	80 kW
Tiempo de carga	4 - 5 h
Tensión de carga y frecuencia	440 V - 60 Hz

Los buses eléctricos representan el futuro del transporte y es necesario que estos puedan satisfacer las necesidades de operación en ruta, de la misma manera que los buses diésel. Por ello, es de vital importancia que la configuración del bus eléctrico sea óptima y examinada a través de un proceso estandarizado. Por tanto, la presente investigación tiene como objetivo desarrollar una metodología para la configuración energética de un bus eléctrico, la cual tiene como caso de estudio las líneas 27 y 100 del servicio de transporte urbano de la ciudad de Cuenca en Ecuador.

II. MATERIALES Y METODOS

A continuación se presenta el proceso llevado a cabo para realizar la evaluación energética y, por tanto, se describe cada uno de los pasos para realizar la simulación computacional. El siguiente apartado consta de: definir los parámetros del vehículo que se analiza, definir los parámetros del modelo de simulación, las características de la evaluación energética y el análisis de distintos buses eléctricos.

A. Definir parámetros del vehículo

Algunas de las variables que se definieron al contar con el bus eléctrico dentro de los parámetros del vehículo son: el área frontal que se obtuvo a partir del cálculo del área de una fotografía del bus mediante AutoCAD. El radio dinámico se obtuvo a partir de la ecuación [12]:

$$Rd = \frac{2 * an * alt + Ø * 25{,}4}{2000} * 0.97\ [m] \qquad (1)$$

la cual usa las medidas del neumático (295/80R22.5), donde an es el ancho de la banda de rodadura en [mm]; alt es la altura de la cámara en [%]; $Ø$ es el diámetro del aro en [pulg].La masa del vehículo se toma desde la ficha técnica para sus valores en vacío y a plena carga, además, el valor de la masa a media carga se calcula con el bus con la mitad de los pasajeros que puede llevar. De esta manera, se obtiene 3 escenarios de carga distintos para la simulación. Los valores del cd y el fr, fueron tomados de la literatura debido a la dispersión de los datos calculados tras el análisis de las pruebas Coast Down [12], [15], [17], [19]–[22]. La prueba Coast Down consiste en que el vehículo llegue a la más alta velocidad posible en una carretera con una pendiente cero y esperar que este se detenga por acción del aire y los neumáticos. En lo referente a los parámetros ambientales, se usa la constante universal de la gravedad y la densidad se obtuvo a partir de la ecuación ideal de los gases, con los valores de presión (68560 Pa) y temperatura (16,05°C) medidos en Cuenca [23].

$$\rho_a = \frac{Pr}{RT} \quad (2)$$

Donde Pr es la presión; R es la constante universal de los gases; T es la temperatura. García [24] determina los parámetros de operación a través de la toma de datos con un dispositivo GPS, de donde se obtiene el tiempo, la velocidad, latitud y longitud necesarios para la construcción del CDC y el PDA. Las rutas analizadas pertenecen a las líneas 27 y 100 del servicio de transporte urbano de Cuenca. La línea 27 cumple con el trayecto Sinincay (S) – Baños (B) – Sinincay, mientras que la línea 100 cumple con la trayectoria Ricaurte (R) – Baños – Ricaurte. Sin embargo, con el motivo de ajustar al máximo la validación entre la simulación y la realidad, se analiza ambas rutas por la mitad, es decir, se generan cuatro CDC y PDA que comprenden las paradas S-B y B-S para la línea 27 y las paradas R-B y B-R para la línea 100. También se define el CDC y PDA desde el lugar de almacenamiento y carga del bus BYD K9, en el laboratorio de micro redes de la Universidad de Cuenca (UC), hasta el lugar de inicio de la ruta en B, R y S. Y desde el lugar de finalización de las rutas en B, R y S hasta el laboratorio de micro redes de la UC. Estas breves rutas se denominan ciclos muertos y durante todo el tiempo de operación van solamente con el conductor a bordo. El resumen de las características de los CDC se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1. Características de los ciclos de conducción y perfil de altitud

	100	**27**	**Ciclos muertos**			
Descripción	**R-B-R**	**S-B-S**	**UC-B**	**UC-R**	**B-UC**	**R-UC**
Tiempo [s]	7934	9435	997,33	1512,50	1483,00	1764,00
Tiempo Paradas [s]	2647	3267	166,33	309,25	269,00	427,70
Tiempo Movimiento [s]	5287	6168	831,00	1203,25	1214,00	1336,30
Número de paradas	133	154	10,00	13,75	22,00	18,10
Distancia [km]	35.57	42,8	7,30	10,90	9,17	10,90
Velocidad máxima [Km/h]	53.8	53.92	53,70	64,05	49,89	54,00
Velocidad promedio Total [Km/h]	16.14	16.34	26,77	26,30	22,25	22,78
Velocidad promedio en movimiento [Km/h]	23.96	24.81	31,57	33,00	26,77	29,43
Aceleración máxima [m/s²]	2.16	2.49	2,06	1,91	1,51	2,07
Aceleración promedio positiva [m/s²]	0.4	0.41	0,46	0,28	0,37	0,31
Aceleración promedio negativa [m/s²]	-0.41	-0.41	-0,49	-0,33	-0,39	-0,31
Pendiente máxima [%]	0.12	0.18	0,09	0,13	0,07	0,08
Pendiente mínima [%]	-0.11	-0.12	-0,15	-0,08	-0,09	-0,14
Pendiente promedio positiva [%]	0.02	0.04	0,03	0,03	0,02	0,03
Pendiente promedio negativa [%]	-0.02	-0.04	-0,03	-0,02	-0,03	-0,03

Los parámetros del motor como la potencia y la velocidad angular máxima vienen dados por la ficha técnica del vehículo, la curva de torque junto al mapa de eficiencia se obtiene a partir de la literatura y se indican en la Fig. 4 y Fig. 5 respectivamente. [25], [26]. Además, es necesario establecer la velocidad máxima del vehículo, la eficiencia de la transmisión, cuantas marchas tiene y la relación de transmisión entre estas. Finalmente, los parámetros de la batería como la capacidad, la potencia de carga y la autonomía se obtuvieron de la ficha técnica. La Tabla 3 resume los parámetros.

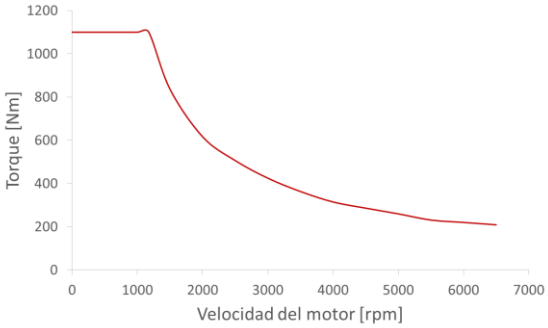


Fig. 4. Curva de torque BYD K9

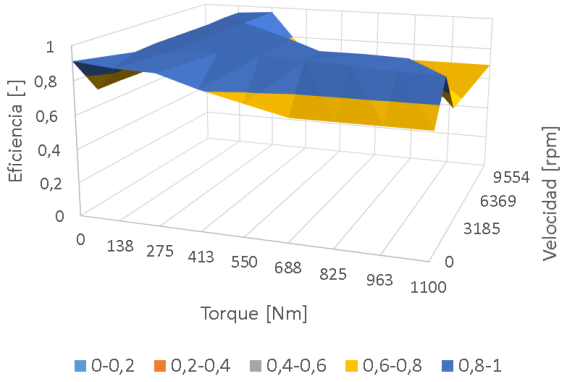


Fig. 4. Mapa de Eficiencia del motor eléctrico

B. Definición de parámetros del modelo

El modelo de simulación se realiza en Matlab Simulink y consta de ocho bloques. El primero de ellos es el diagrama de bloque del ciclo de conducción que permite el ingreso del CDC y además calcula las variables como la distancia y la aceleración como indican las ecuaciones [12]:

$$x = \int_0^t v dt \ [m] \quad (3)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \left[\frac{m}{s^2}\right] \quad (4)$$

Donde x es la distancia; v es la velocidad; a es la aceleración. El segundo diagrama de bloque es del perfil de altitud que permite el ingreso de esta variable y calcula la pendiente [12]:

$$Pendiente = \cos(\Theta)\ [rad] \quad (5)$$

$$Pendiente = sen(\Theta)[rad] \quad (6)$$

Donde el Θ se encuentra en radianes. El tercer bloque denominado diagrama de fuerzas permite el ingreso de los parámetros del vehículo y realiza el cálculo de la fuerza motriz (F_x) analizando las fuerzas que se oponen al movimiento como la fuerza de arrastre (F_d); la resistencia a la rodadura (R_x), la resistencia gravitacional (R_g) y la resistencia a la inercia (R_i) [14]:

$$F_d = \frac{1}{2} * \rho_a * C_d * A * v^2\ [N] \quad (7)$$

$$R_x = f_r * M * g * cos\Theta\ [N] \quad (8)$$

$$R_g = M * g * sin\Theta\ [\mathrm{N}] \quad (9)$$

$$R_i = M * a\ [N] \quad (10)$$

$$F_x = R_x + F_d + R_g + R_i\ [N] \quad (11)$$

El cuarto bloque es el diagrama de demanda energética en rueda y se realizan los cálculos del torque en rueda (T_x) la potencia en rueda (P_x) y finalmente la demanda de energía en rueda (E_x) [14]:

$$T_x = F_x * R_d\ [Nm] \quad (12)$$

$$P_x = F_x * v\ \left[\frac{Nm}{s}\right] \quad (13)$$

$$E_x = \int_0^t P_x dt\ [kWh] \quad (14)$$

Tabla 2. Parámetros usados en la simulación

	Parámetro	Simbología	Valor
Parámetros del vehículo	Área frontal [m²]	[A]	7.14
	Coeficiente de arrastre [-]	[Cd]	0.61
	Coeficiente de resistencia a la rodadura [-]	[fr]	0.0098
	Masa del vehículo [kg]	[M]	13850, 16675, 19500
	Radio dinámico [m]	[Rd]	0.506
	Masa de un pasajero [kg]	[M]	70
	Capacidad de pasajeros	[-]	80
Parámetros ambientales	Densidad del aire [km/m³]	[ρ]	0.83
	Gravedad [m/s²]	[g]	9.81
Parámetros de operación	Velocidad [km/h]	[v]	
	Aceleración [m/s²]	[a]	
	Pendiente [rad]	[Θ]	
Parámetros del motor	Potencia máxima [kW]	[Pmáx]	300
	Torque máxima [Nm]	[Tmáx]	1100
	RPM máxima [rpm]	[-]	10 000
	Eficiencia del motor	[ne]	
Parámetros de la transmisión	Relación de transmisión total [-]	[Ntd]	22
	Número de marchas [-]	[-]	1 (Drive, neutro y retro)
	Eficiencia de la transmisión	[ntd]	0.98
	Velocidad máxima [km/h]	[Vmáx]	50
Parámetros de la batería	Capacidad de la batería [kWh]	[Ebatt]	324
	Potencia de carga [kW]	[Pc]	80
	Eficiencia de la batería	[nbatt]	0.98
	Autonomía [km]	[-]	300

El quinto bloque es el diagrama de caja de cambios y diferencial que permite conocer en qué cambio de marcha se encuentra y la relación de transmisión total de la misma, para ello, es necesario contar con el diagrama de cubrimiento del

vehículo para determinar a qué velocidad se realiza el siguiente cambio de marcha. Además, en este bloque también se realiza el cálculo de la velocidad angular del motor (ω_e) como indica la ecuación [14]:

$$\omega_e = \frac{v * N_{td} * 60}{3.6 * R_d * 2\pi} \ [RPM] \quad (15)$$

Donde N_{td}es la relación de transmisión total de caja y diferencial. En el sexto bloque llamado diagrama de energía de descarga se calcula el torque demandado al motor eléctrico mediante la ecuación:

$$T_e = \frac{T_x}{N_{td}} \ [Nm] \quad (16)$$

Con este torque se determina el porcentaje de carga (PDC) al dividirse para la curva de torque del motor.

$$PDC = \frac{T_e}{T} \ [\%] \quad (17)$$

La eficiencia del motor se encuentra en relación a su velocidad angular y la curva de torque. La potencia de descarga (P_D) del motor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_D = \frac{\omega_e * T_e}{\eta_e} + P_{aux} \ [W] \quad (18)$$

Donde P_{aux} es la potencia de los accesorios y se usa un valor de 6 kW [12]. Finalmente, la energía de descarga (E_D) se calcula mediante la expresión:

$$E_D = \int_0^t P_D dt \ [kWh] \quad (19)$$

En el séptimo bloque denominado diagrama de regeneración de energía se calcula la energía regenerada, la cual tiene que cumplir con cada una de las siguientes condiciones:

$$\forall (P_x < 0) \cap (a > a_{max}) \cap (v > v_{min})$$

Donde la $a_{max} = -3m/s^2$ y $v_{min} = 5m/s$. Estas restricciones sirven para distinguir un evento de frenado de emergencia y cuando la energía que se recupera es demasiado baja [17]. La potencia de carga (P_C) y posterior regeneración de energía (E_{reg}) se calculan a partir de:

$$P_C = -P_{aux} + \frac{|P_x|}{n_{wh} * n_{fd} * n_{gen} * n_{batt}} \quad (20)$$

$$E_{reg} = \int_0^t P_C dt \ [kWh] \quad (21)$$

Donde n_{wh} es la eficiencia del neumático y se usa un valor de 0.99; y n_{gen} es la eficiencia del generador con un valor de 0.88. Finalmente, el último bloque llamado diagrama de energía requerida realiza la resta entre la energía de descarga de la batería y la regeneración de energía para obtener la energía requerida (E_R). Además, aquí se obtiene el estado de carga (SoC) de la batería una vez terminada la ruta [17]. La Fig. 6 muestra un esquema del modelo desarrollado.

$$E_R = E_D - E_{reg} \quad (22)$$

$$SoC = 1 - \int_0^t (P_D - P_C) dt / E_{batt} \quad (23)$$

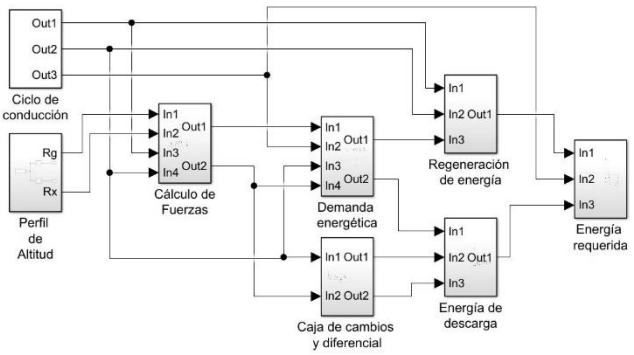


Fig. 5. Modelo de simulación energética en Simulink

C. Características de la simulación.

Durante la operación del bus, el mismo varía continuamente su carga a diferencia del modelo que realiza la simulación en 3 escenarios. Sin embargo, para la validación del modelo se usa una carga media constante para todo el día. De igual manera, es necesario añadir los resultados de la simulación correspondiente a cada uno de los ciclos muertos. Finalmente, al iniciar la jornada el bus eléctrico sale desde el laboratorio de micro redes con el 100% de su carga y no existen cargas esporádicas durante el día, de la misma manera en la que operó el vehículo durante su estadía en Cuenca.

D. Evaluación de distintos buses eléctricos.

Para la simulación de otros modelos de buses eléctricos varios de los parámetros se asumen debido a la falta de información. Los vehículos analizados son: el bus eléctrico sueco Volvo 7900, Kamaz 529943 de procedencia rusa y el bus Tata de la India, los cuales fueron seleccionados para el análisis debido a que entre varios modelos de vehículos, estos son quienes más información técnica brindaban. La Tabla 4 resume sus parámetros.

Tabla 3. Parámetros usados para los buses eléctricos Volvo 7900, Kamaz y Tata

Bus eléctrico de baterías	**Procedencia [-]**	**Suecia**	**Rusia**	**India**
	Marca [-]	Volvo	Kamaz	Tata
	Modelo [-]	7900	52994Ɔ	
Parámetros del vehículo	Masa [kg]	19500	19000	18000
	Cd [-]	0,61	0,61	0,61
	fr [-]	0,0098	0,0098	0,0098
	Área frontal [m²]	7,14	7,14	7,14
	Neumáticos [-]	275/70R22.5	275/70R22.5	275/70R22.6
	Rd [m]	0,46	0,46	0,46
	Ocupantes [-]	95	85	65
Parámetros del motor	Potencia [kW]	200	230	245
	Torque [Nm]	400	850	1145
Parámetros de la batería	Tipo de batería [-]	Ion-Litio	Titanato de litio (LTO)	Ion-Litio
	Capacidad [kWh]	150/200	105	124
	Voltaje [V]	600		
	Autonomía [km]		200	150
Parámetros de la transmisión	Velocidad máx [km/h]	70	75	75
	Número de cambios [-]	2	1	1
	Relación de transmisión [-]	34:1 & 19:1	19	23

III. RESULTADOS

A. Simulación del bus eléctrico BYD K9

La simulación del bus eléctrico BYD K9 se realizó en 3 escenarios de carga: baja, media y plena carga. Además, se analizaron las rutas de las líneas 100 y 27 en los siguientes CDC y PDA: R-B, B-R y S-B, B-S. La ruta que cubre el trayecto R-B recorre una distancia de 18.18 km y el consumo de energía varía entre 32.81 y 39.92 kWh, mientras que en B-R recorre una distancia de 17.79 km con un consumo de 19.47 a 21.57 kWh. La ruta S-B recorre una distancia de 20.87 km con un consumo desde 22.39 a 25.24 kWh, mientras tanto, la ruta B-S recorre 22.14 km con un consumo de 33.92 a 40.26 kWh. Según la jornada de trabajo del bus eléctrico cada día debe cumplir entre 4 a 6 viajes de ida e igualmente para el regreso. Por tanto, para obtener resultados para la jornada completa de trabajo es necesario multiplicar los resultados simulados por el número de recorridos realizados al día.

Para completar la simulación de operación diaria se suma la distancia y consumo de los ciclos muertos, los cuales cubren las rutas: UC-B, UC-R, B-UC, R-UC para la línea 100 y UC-S y S-UC para la línea 27. Estas simulaciones se realizan a baja carga ya que no forman parte de la ruta de operación, es decir, el vehículo transita solamente con el chofer. Los ciclos muertos de la línea 100 recorren entre 7.57 km y 10.94 km cada día con un consumo de energía entre 6 kWh a 12 kWh. Las rutas: UC-S y S-UC, correspondientes a la línea 27, recorren una distancia entre 6.69 km y 6.71 km con un consumo de 16.67 kWh y 3.53 kWh, respectivamente. Por tanto, durante la jornada de trabajo en la línea 100 el bus eléctrico recorre una distancia de 213.48 km con un consumo energético de 326.67 en promedio, y el rendimiento varía desde 0.64 a 0.66 km/kWh. La línea 27 recorre una distancia de 190.67 km y consume 269.8 kWh en promedio; con un rendimiento que varía desde 0.7 a 0.72 km/kWh.

Es importante destacar la regeneración de energía y su comportamiento según el PDA. La regeneración de energía se resta de la energía de descarga de la batería y así se obtiene la energía requerida para su operación. Los siguientes resultados se realizaron a media carga. En la ruta B-R durante los primeros 11 minutos la pendiente permanece negativa, es decir, el vehículo desciende por la carretera y es lo que le permite regenerar 12.8 kWh disminuyendo a su vez el consumo energético de 33.5 kWh como indica la Fig. 7.

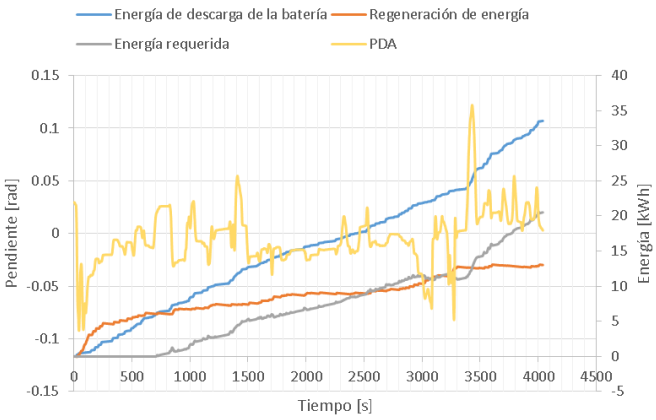


Fig. 6. Energías y PDA de la ruta B-R

En la ruta R-B la pendiente es positiva durante la mayor parte de la ruta lo que significa que la regeneración es mucho menor según la Fig. 8. La regeneracion alcanzada es de 5.9 kWh de los 42.33 kWh demandados.

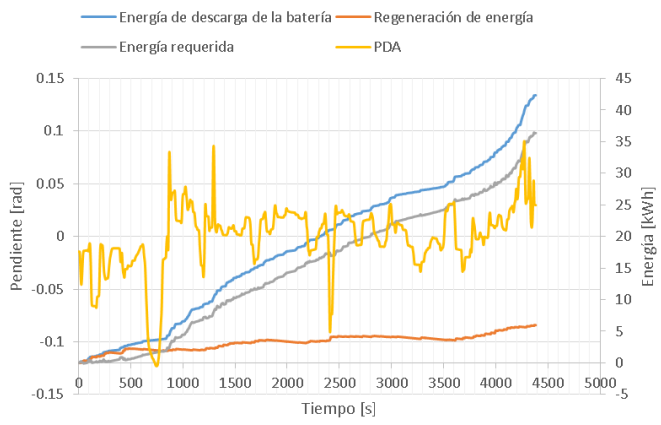


Fig. 7. Energías y PDA de la ruta R-B

La ruta S-B es la de mayor regeneración de energía, con 23.5 kWh de los 48.4 kWh demandados, entre las rutas analizadas como indica la FIg. 9.

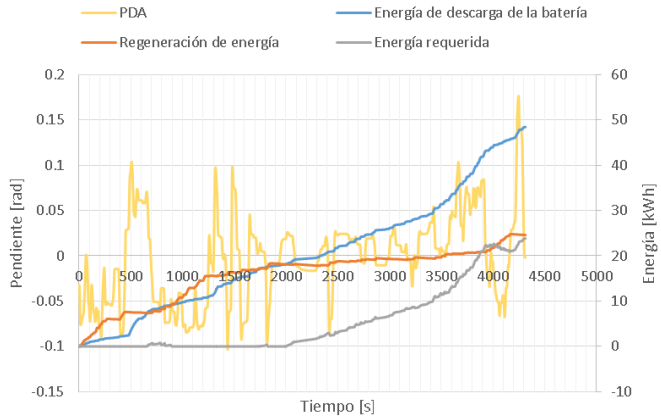


Fig. 8. Energías y PDA de la ruta S-B

Finalmente, la ruta B-S regenera 17.8 kWh y la energía demanda es de 54.9 kWh. El estado de carga para la ruta completa de la línea 100 varía entre 81.6 % al 83.8 % a baja y plena carga mientras que en la línea 27 está entre 79.7 % y 82.5 %. La Tabla 5 presenta un resumen de los resultados.

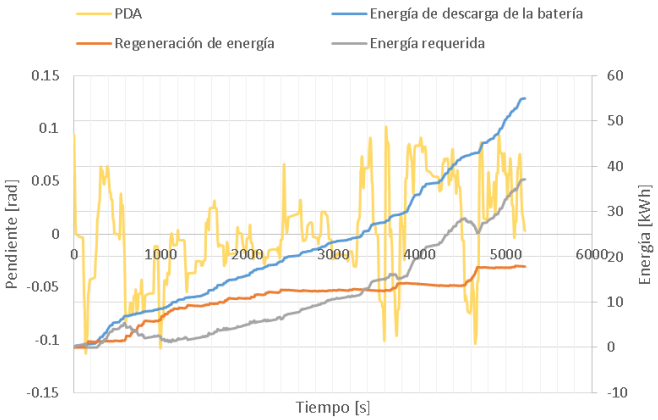


Fig. 9. Energías y PDA de la ruta B-S

Tabla 4. Resultados obtenidos con la simulación energética

	RB			BR			SB			BS		
Carga	**Baja**	**Media**	**Plena**	**Baja**	**Media**	**Plena**	**Baja**	**Media**	**Plena**	**Baja**	**Media**	**Plena**
Distancia [km]	18,18	18,18	18,18	17,79	17,79	17,79	20,87	20,87	20,87	22,14	22,14	22,14
Fuerza en rueda [N]	37370	44980	52600	41660	50140	58630	34150	41100	48050	34280	41260	48240
Torque en rueda [Nm]	18910	22760	26620	21080	25370	29670	172820	20800	24310	17350	20880	24410
Potencia en rueda [kW]	246,6	296,9	346,8	233,3	280,7	328,2	257,4	309,6	361,8	234,4	282,1	329,7
Demanda energética en rueda por viaje [kWh]	27,88	33,46	39,05	21,32	25,6	29,88	32,88	39,48	46,09	36,88	44,29	51,7
Energía de descarga de la batería [kWh]	36,49	42,34	48,19	29,06	33,54	38,02	41,5	48,4	55,29	47,2	54,93	62,67
Regeneración de energía [kWh]	3,68	5,98	8,27	9,6	13,02	16,45	19,11	24,58	30,05	13,27	17,84	22,41
Energía requerida [kWh]	32,81	36,37	39,92	19,47	20,52	21,57	22,39	23,82	25,24	33,92	37,09	40,26
Estado de carga [%]	89,87	88,78	87,68	93,99	93,67	93,34	93,03	92,65	92,21	89,53	88,55	87,57
Torque demandado en motor [Nm]	859,5	1035	1210	958,1	1153	1349	785,4	945,2	1105	788,4	948,9	1109
Indicador km/kWh	0,55	0,50	0,46	0,91	0,87	0,82	0,93	0,88	0,83	0,65	0,60	0,55

B. *Validación del modelo*

Para la validación de los resultados obtenidos, existen datos de distancia y consumo energético medidos por la Universidad de Cuenca de 21 días de operación del bus eléctrico, 17 de ellos en la línea 100 y 4 en la línea 27. Para la validación, se obtiene el rendimiento en km/kWh a partir de los resultados de distancia y consumo energético simulados por una jornada completa de operación. Donde, cabe recalcar que estas simulaciones se calculan a media carga, porque durante la operación real del bus la masa varia continuamente a diferencia del modelo que analiza la ruta con una carga constante; la media carga se da con la intención de obtener un rendimiento más apegado a las condiciones reales de operación del vehículo.

Finalmente, para validar el modelo, se realiza un gráfico de dispersión entre los valores de rendimiento calculados y medidos que varían desde 0.64 y 0.72 [km/kWh] para los rendimientos calculados a través de la simulación, y de 0.62 a 0.87 [km/kWh] para los rendimientos medidos por la Universidad de Cuenca. Con la intención de demostrar la mejora del rendimiento al considerar los ciclos muertos se comparan los coeficientes de determinación sin el análisis de los ciclos muertos, Fig. 8 y viceversa, Fig. 9. Por tanto, el coeficiente de determinación del modelo es de 0.8356, lo que indica que el modelo computarizado dentro de su dominio de aplicabilidad posee un rango de precisión satisfactorio consistente con la aplicación prevista del modelo.

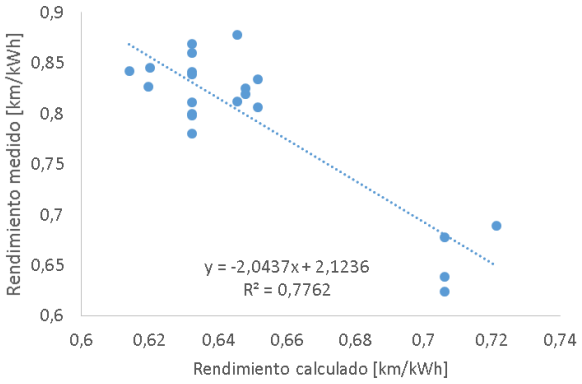


Fig. 10. Coeficiente de determinación sin considerar ciclos muertos

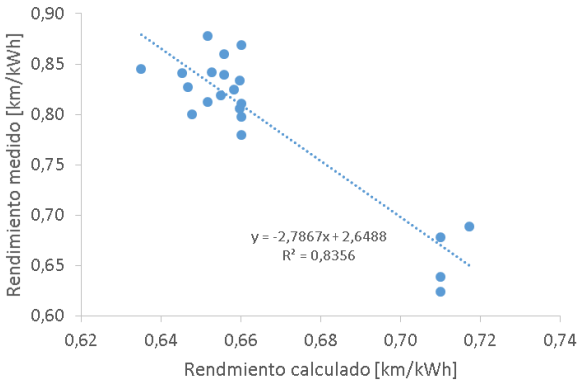


Fig. 11. Coeficiente de determinación considerando los ciclos muertos

C. *Selección de bus que minimice el consumo*

Es necesario aclarar que las simulaciones para la selección del bus eléctrico no se realizan con el modelo ajustado. Por tanto, para la ruta de la línea 100 y 27 los buses eléctricos Tata y Kamaz presentan los mejores rendimientos como muestra la Fig. 10. Igualmente, en cuanto a consumo energético los buses Tata y Kamaz demanda menor energía, Fig. 11. Sin embargo, la capacidad de la batería que tienen estos dos buses apenas les permiten cubrir 2 rutas completas para el modelo Kamaz y 1 para el modelo Tata como indica la Tabla 5. A diferencia del bus eléctrico Volvo que cubre 3 rutas, mientras que el BYD K9 cubre 5 rutas completas antes de requerir recargar sus baterías. Es así que, en el caso de que sea necesario cumplir con 6 rutas diarias y contar con un cargador con una potencia de 80 kW, buses como el modelo Kamaz necesitaría 4 recargas, Tata y Volvo 7900 necesitarían 3 recargas y BYD K9 apenas una.

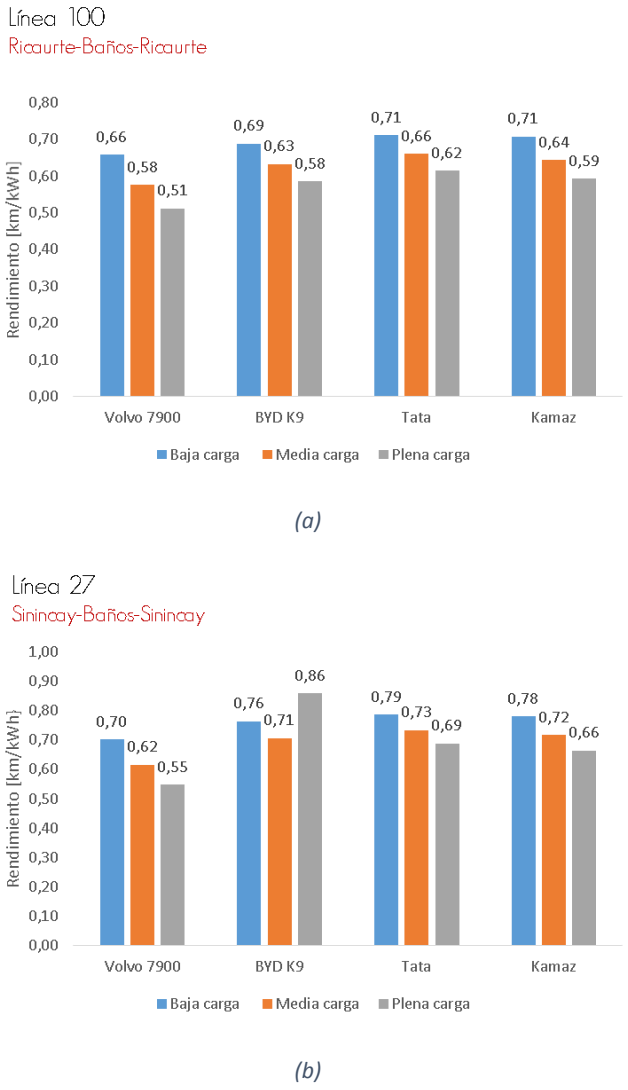


Fig. 12. Rendimiento de buses eléctricos en la (a) Línea 100 y (b) Línea 27

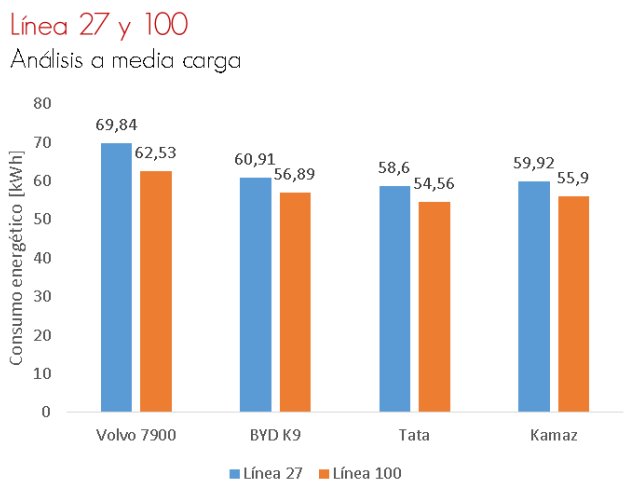


Fig. 13. Consumo energético a media carga en ambas rutas

El tiempo de carga con un cargador de 80 kW variaría desde 1 hora a las 4 horas, la Tabla 6 indica el tiempo necesario de carga. Para un cargador con una potencia de 40 kW el tiempo de carga se duplica. Por tanto, aunque los modelos Tata y Kamaz presentan un mejor rendimiento estos tienen una autonomía limitada que necesita de recargas parciales durante el día para completar su jornada.

Tabla 6. Resumen de jornada de trabajo

	Capacidad [kWh]	Rutas completas [-]	Energía restante [%]	Tiempo de recarga con una potencia de 80 kW [horas]	Tiempo de recarga con una potencia de 40 kW [horas]
Volvo 7900	200	3	6	2,5	5,0
BYD K9	324	5	12	4,1	8,1
Tata	124	2	12	1,6	3,1
Kamaz	105	1	47	1,3	2,6

IV. CONCLUSIONES

La metodología para la configuración energética de un bus eléctrico fue desarrollada, la misma que inicia al definir cada uno de los parámetros del vehículo, ambientales, de operación, del motor, de la transmisión y de la batería. El modelo desarrollado en Matlab/Simulink incluye el análisis de la fuerza de tracción, demanda de energía en rueda y en el motor, regeneración de energía y finalmente la energía requerida y el estado de carga. El perfil topográfico de la ciudad genera que la regeneración energética sea considerablemente alta cuando la pendiente permanece negativa. De igual manera, el consumo de energía es alto cuando el vehículo afronta una pendiente positiva constante y en ascenso. La validación del modelo tiene un ajuste de 0.8356, lo cual demuestra la importancia del análisis de los ciclos muertos. Al tener datos de consumo diario medidos, es importante demostrar que durante un recorrido de 9.42 km en promedio (ciclos muertos), el rendimiento mejora debido a que el bus trabaja a baja carga, solamente con el conductor a bordo.

El análisis de los cuatro modelos diferentes de buses eléctricos demuestra que si bien algunos de ellos al contar con baterías de menor capacidad, es decir, menor masa por el tamaño de la batería, tienen mejor rendimiento. Estos no son capaces de cumplir con el cronograma establecido por la CTC de seis rutas completas diarias. Su poca autonomía genera que estos buses necesiten recargas durante la jornada para cumplir con el cronograma. Recargas que podrían demorar desde una hora en adelante. De esta manera, los buses eléctricos como Kamaz o Tata son descartados. Todos los modelos de buses eléctricos se analizan sin el ajuste del modelo para el consumo de energía, con el ajuste el consumo de energía diario será menor. Por tanto, reducir la capacidad de la batería es atractivo en términos de rendimiento, no obstante, es necesario un análisis que involucre el costo beneficio de adquirir determinado vehículo eléctrico y analice las recargas rápidas junto con el cumplimiento de las jornadas de trabajo. Mientras tanto, el bus eléctrico BYD K9 se adapta mejor a las condiciones de operación de la ciudad de Cuenca por su autonomía y tiene un buen rendimiento medio, entre los buses analizados.

V. RECONOCIMIENTO

Al autor le gustaría reconocer a B. García por su asistencia al usar sus datos de ciclos de conducción del bus eléctrico BYD K9 y al Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (DEET) a cargo de L. Gonzáles y J. Espinoza de la Universidad de Cuenca por el uso de sus datos de consumo energético para la validación del modelo.

VI. REFERENCIAS

[1] NOAA National Centers for Environmental Information, “State of the Climate: Global Climate Report for June 2020,” *published online July 2020*, 2020. https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202006/supplemental/page-1.

[2] Naciones Unidas, “Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático,” *Cop21*, vol. 21930, p. 18, 2015, [Online]. Available: http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf%5Cnhttps://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf.

[3] IPCC, “Proposed outline of the special report in 2018 on the impacts of global warming of 1 . 5 ° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways , in the context of strengthening the global response to the threat of climate cha,” *Ipcc - Sr15*, vol. 2, no. October, pp. 17–20, 2018, [Online]. Available: www.environmentalgraphiti.org.

[4] International Energy Agency (IEA), “CO2 emisions

from fuel combustion," *IEA Publ.*, pp. 1–165, 2019, [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb3b2e8d-28e0-47fd-a8ba-160f7ed42bc3/CO2_Emissions_from_Fuel_Combustion_2019_Highlights.pdf.

[5] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035*. 2017.

[6] Q. Song *et al.*, "Could urban electric public bus really reduce the GHG emissions: A case study in Macau?," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, no. 2018, pp. 2133–2142, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.206.

[7] Redacción Guayaquil, "Primeros buses eléctricos empiezan a rodar en Guayaquil," *El Comercio*, Mar. 12, 2019. https://www.elcomercio.com/actualidad/buses-electricos-guayaquil-transporte-transito.html (accessed Aug. 06, 2020).

[8] INEC Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, "Información Estadística de Transporte," *Anuario de Estadísticas de Transporte 2018*, 2019. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/transporte/.

[9] M. Pacheco, "20 datos que debe saber sobre la Ley de Eficiencia Energética | El Comercio," *El Comercio*, Apr. 09, 2019. https://www.elcomercio.com/actualidad/ley-eficiencia-energetica-energia-medioambiente.html (accessed Aug. 06, 2020).

[10] M. Benz, K. Gürges, and S. Borufka, "Techview Report Electric Buses," p. 45, 2015, [Online]. Available: https://www.imw.fraunhofer.de/content/dam/moez/de/documents/Working_Paper/Working_Paper_Electric_Buses.pdf.

[11] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992.

[12] W. M. Zumba Álvarez, "Evaluación de la demanda energética de buses con motores de combustión interna, en rutas reales; para implementar buses eléctricos," 2018, [Online]. Available: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15032%0Ahttp://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/7609.

[13] NTE INEN 1668, "Vehículos de transporte público de pasajeros intrarregional, interprovincial e intraprovinciales. Requisitos," *Annu. B. INEN*, no. VEHÍCULOS DE TRANSPORTE DE PASAJEROS INTRARREGIONAL, INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIA. REQUISITOS, p. 34, 2015, [Online]. Available: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1668-1.pdf.

[14] D. Cordero Moreno, "Dinámica de vehículos." Cuenca, 2017, [Online]. Available: https://es.slideshare.net/funodaniel/dinmica-de-vehculos.

[15] F. Calderón and J. M. López, "Desarrollo de un modelo de configuración eléctrica de autobús urbano con baterías," pp. 1–102, 2020.

[16] T. Kulworawanichpong and S. Punpaisarn, "Dynamic Simulation of Electric Bus Vehicle," *SIJ Trans. Comput. Sci. Eng. its Appl.*, vol. 02, no. 04, pp. 59–64, 2014, doi: 10.9756/sijcsea/v2i4/0203180401.

[17] Z. Gao *et al.*, "Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service," *Energy*, vol. 122, pp. 588–600, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.01.101.

[18] BYD, "Recorridos en el bus eléctrico de Cuenca para las delegaciones del Foro de Ciudades Intermedias," 2018. https://bydelectrico.com/ec/2018/02/28/recorridos-en-el-bus-electrico-cuenca/.

[19] E. R. Grijalva and J. M. López Martínez, "Analysis of the reduction of CO 2 emissions in urban environments by replacing conventional city buses by electric bus fleets: Spain case study," *Energies*, vol. 12, no. 3, 2019, doi: 10.3390/en12030525.

[20] B. O. Varga and C. Iclodean, "Numerical Investigation of Hybrid Electric Vehicle's Performance," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 822, pp. 272–284, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.822.272.

[21] S. Ruiz, N. Arroyo, A. Acosta, C. Portilla, and J. Espinosa, "An optimal battery charging and schedule control strategy for electric bus rapid transit," *IET Semin. Dig.*, vol. 2018, no. 1, pp. 23–30, 2018, doi: 10.1049/ic.2018.0004.

[22] R. Astudillo Bravo, "Obtención de ciclos de conducción para la flota de buses urbanos del cantón Cuenca," p. 156, 2016.

[23] Instituto Nacional de Meteorologia e Hidrología, "Boletin Climátologico Anual," 2020. https://www.serviciometeorologico.gob.ec/boletines-climaticos-y-agricolas/#.

[24] B. A. García, "Determinación del ciclo típico de conducción para las rutas 100 y 27 de un bus eléctrico en la ciudad de cuenca.," Universidad del Azuay, 2021.

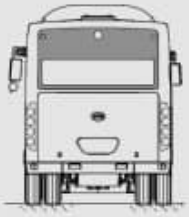
[25] A. Ritari, J. Vepsäläinen, K. Kivekäs, K. Tammi, and H. Laitinen, "Energy consumption and lifecycle cost analysis of electric city buses with multispeed gearboxes," *Energies*, vol. 13, no. 8, 2020, doi: 10.3390/en13082117.

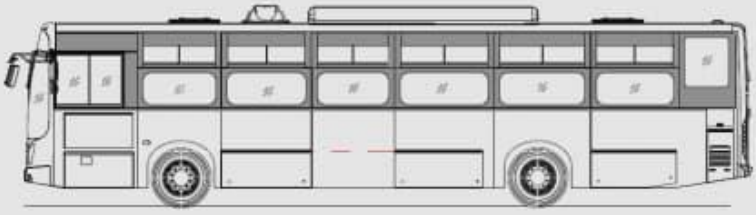
[26] Concejo de Medellín, "BYD Bus Eléctrico," 2015. https://es.slideshare.net/ConcejoMDE/byd-bus-elctrico.

VII. Anexos

BYD AUTO
Build Your Dreams

Especificaciones Técnicas BYD K9G





DATOS DEL PRODUCTO	
Marca	BYD
Modelo	K9G
Tipo	Bus Urbano
Categoría [clase]	M3 (Clase II)
Combustible	Electricidad

MOTOR	K9G-S	K9G-I
Tipo de motor	AC síncrono de imanes permanentes	
Familia y Modelo	BYD-2912TZ-XY-A	
Potencia máxima	150 kW x 2 (201 HP x 2)	
Torque	550 Nm x 2	
Autonomía	300 km	
Velocidad máxima [km/h]	80 km/h	
DIMENSIONES EXTERNAS	**K9G-S**	**K9G-I**
Longitud total [mm]	12540 mm	
Ancho total [mm]	2550 mm	
Alto total [mm]	3411 mm	
Distancia entre ejes [mm]	6150 mm	
Voladizo delantero [mm]	2700 mm	
Voladizo posterior [mm]	3690 mm	
Trocha eje delantero [mm]	2110 mm	
Trocha eje posterior [mm]	1904 mm	

BYD AUTO CO., LTD.
Add.: No.2, Yadi Road, the New-type Industrial Park, Xi'an National Hi-tech Industrial
Sales E-mail:bydautoexport@byd.com Service E-mail:bydautoservice@byd.com Http://www.byd.com

BYD AUTO
Build Your Dreams

Ángulo de aproximación	8.5°	
Ángulo de salida	8.5°	
Altura mínima al suelo [mm]	153 mm	
Radio de giro [mm]	≤ 12000 mm	
PESOS Y CAPACIDADES	**K9G-S**	**K9G-I**
Peso bruto vehicular [PBV] [kg]	19500 kg	19500 kg
Peso en vacío [kg]	13850 kg	14130 kg
Capacidad de carga [kg]	5650 kg	5370 kg
Economía de combustible [km/kWh]	0.93 km/kWh	
Capacidad de pasajeros, de pie y sentados [incluye chofer]	De pie: 49 Sentados: 31 + 1 chofer	De pie: 44 Sentados: 31 + 1 chofer
Área útil disponible para pasajeros de pie [m2]	8 m^2	
TRANSMISIÓN	**K9G-S**	**K9G-I**
Marca	BYD	
Modelo	K9G	
Tipo	Motor en llanta sin caja de cambios	
Nº de marchas	3, Drive, Neutro y Retro	
Tracción	4x2 trasera	
SUSPENSIÓN	**K9G-S**	**K9G-I**
Delantera	Suspensión neumática de cuatro enlaces	
Posterior	Suspensión neumática de cuatro enlaces	
DIRECCIÓN	**K9G-S**	**K9G-I**
Descripción sistema	Sistema de dirección asistida hidráulica controlada electrónicamente	
FRENOS	**K9G-S**	**K9G-I**
Delanteros	Descripción	
Marca	Knorr	
Tipo de Accionamiento	Freno de disco, freno neumático	
Posteriores	Descripción	
Marca	Knorr	
Tipo de Accionamiento	Freno de disco, freno neumático	
De Estacionamiento	Descripción	
Marca	Knorr	
Tipo de Accionamiento	Freno de resorte	
SISTEMAS ESPECIALES	**K9G-S**	**K9G-I**
Ascensor para silla de ruedas	NO	SI

BYD AUTO CO., LTD.
Add.: No.2, Yadi Road, the New-type Industrial Park, Xi'an National Hi-tech Industrial
Sales E-mail:bydautoexport@byd.com Service E-mail:bydautoservice@byd.com Http://www.byd.com