



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v11i3.4461>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Selection of an electric bus, through simulation and energy determination, an urban transport route, to promote sustainable mobility in the city of Riobamba

Seleção de um autocarro elétrico, através de simulação e determinação de energia, uma rota de transporte urbano, para promover a mobilidade sustentável na cidade de Riobamba

Ángel José Quevedo-Ríos ^I
angel.quevedo@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-2304-018X>

Fabián Celso Gunsha-Maji ^{II}
fabian.gunsha@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5637-1052>

Edgar Fabián Sánchez-Carrión ^{III}
esanchez_c@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8027-2799>

Paúl Alejandro Montúfar-Paz ^{IV}
paul.montufar@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9062-8704>

Joffre Bryan Chávez-Zambrano ^V
cryan792@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-5352-8338>

Correspondencia: angel.quevedo@esPOCH.edu.ec

***Recibido:** 10 de mayo de 2025 ***Aceptado:** 19 de junio de 2025 ***Publicado:** 15 de julio de 2025

- I. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), EC060155, Ecuador.
- II. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), EC060155, Ecuador.
- III. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), EC060155, Ecuador.
- IV. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), EC060155, Ecuador.
- V. Investigador Independiente, Ecuador.

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Resumen

Este estudio evalúa la viabilidad de la electrificación del transporte público en Riobamba, abordando los desafíos urbanos como el aumento demográfico, la contaminación y el consumo de combustibles fósiles, y enmarcado en la Ley de Eficiencia Energética de Ecuador. La investigación se centró en un análisis comparativo de la demanda energética entre autobuses eléctricos y diésel, utilizando una metodología On-Board para la recolección de datos en tiempo real. Aunque inicialmente se analizó la ruta 14, se identificó la línea 5 como la de mayor demanda energética, lo que permitió un estudio detallado del modelo BYD K9 G. Los hallazgos confirman la eficiencia de estos vehículos, destacando su menor consumo energético y contribución a la reducción de emisiones, lo que representa un avance significativo hacia la sostenibilidad urbana y la mejora de la calidad de vida en Riobamba. Se enfatiza la necesidad de desarrollar infraestructura de carga y normativas de seguridad para una implementación exitosa.

Palabras clave: Buses eléctricos; sostenibilidad urbana; demanda de energía; reducción de emisiones; transporte urbano.

Abstract

This study evaluates the feasibility of electrifying public transport in Riobamba, addressing urban challenges such as population growth, pollution, and fossil fuel consumption, within the framework of Ecuador's Energy Efficiency Law. The research focused on a comparative analysis of energy demand between electric and diesel buses, using an on-board methodology for real-time data collection. Although Route 14 was initially analyzed, Line 5 was identified as having the highest energy demand, allowing for a detailed study of the BYD K9 G model. The findings confirm the efficiency of these vehicles, highlighting their lower energy consumption and contribution to emission reduction, representing a significant advance toward urban sustainability and improving the quality of life in Riobamba. The need to develop charging infrastructure and safety regulations for successful implementation is emphasized.

Keywords: Electric buses; urban sustainability; energy demand; emission reduction; urban transport.

Resumo

Este estudo avalia a viabilidade da eletrificação dos transportes públicos em Riobamba, abordando desafios urbanos como o crescimento populacional, a poluição e o consumo de combustíveis fósseis,

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano. para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

no âmbito da Lei de Eficiência Energética do Equador. A investigação centrou-se numa análise comparativa da procura energética entre autocarros elétricos e a diesel, utilizando uma metodologia de bordo para a recolha de dados em tempo real. Embora a Rota 14 tenha sido inicialmente analisada, a Linha 5 foi identificada como a que apresenta maior exigência energética, permitindo um estudo detalhado do modelo BYD K9 G. Os resultados confirmam a eficiência destes veículos, destacando o seu menor consumo energético e o seu contributo para a redução das emissões, representando um avanço significativo no sentido da sustentabilidade urbana e da melhoria da qualidade de vida em Riobamba. Salienta-se a necessidade de desenvolver infraestruturas de recarga e normas de segurança para uma implementação bem-sucedida.

Palavras-chave: Autocarros elétricos; sustentabilidade urbana; procura energética; redução de emissões; transporte urbano.

Introducción

El transporte público en todo el mundo constituye base de la movilidad de personas en la zona urbana, siendo en la actualidad un factor fundamental en el desarrollo económico y social de las ciudades a nivel mundial. La ciudad de Riobamba se encuentra ubicada en la región Sierra del Ecuador a una altura de 2750 msnm. La movilidad de las personas en la zona urbana es en autobuses propulsados por motor de combustión interna, este trabajo considera un recorrido diario de una línea de autobús para la determinación del ciclo real de conducción. Un ciclo de conducción representa un patrón típico de velocidad que realizan los vehículos de una ciudad en el tiempo, esto se representa mediante una gráfica de velocidad versus tiempo, y se utiliza para estimar las emisiones contaminantes y consumo de combustible de los automotores bajo diferentes condiciones de circulación de un lugar específico. El ciclo de conducción WLTC (Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycle), el cual representa un modo más real de conducción que nace a partir de la base de datos de conducción procedentes de todas partes del mundo y cubre todas las posibles realidades que se dan en el uso del automóvil. La obtención de ciclos de conducción no tiene una metodología estándar, sin embargo, se deben utilizar métodos basados en procesos validados y elaborados en diferentes partes del mundo, en donde para obtener un ciclo de conducción, es necesario fijar una ruta de estudio y utilizar un método confiable de recolección y procesamiento de datos mediante un análisis estadístico que permita la construcción de los ciclos de conducción. [1]

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

En una ciudad, la variabilidad de las condiciones de tráfico presentes durante el día, generan diferentes gráficas que representan el patrón de conducción de cada vehículo. Par realizar el estudio de una ruta que recorre un autobús, por ejemplo, es conveniente emplear los ciclos de conducción que deberían ser obtenidos de acuerdo con las condiciones de cada ciudad, estos ciclos permiten estandarizar las condiciones de prueba, en el caso de la medición de emisiones contaminantes y consumo de combustible. En Ecuador, los autobuses de transporte masivo urbano son importados, por ende, el diseño del tren de potencia no está basado en el uso de ciclos de conducción exclusivos, sino más bien, son diseñados empleando el Ciclo Transiente Pesado Europeo (ECE – 15 + EUDC y ECE-49), según menciona la norma con la cual se homologan los autobuses en el país INEN 2207 e INEN 2202:002. Es necesario establecer un ciclo real de conducción local de autobuses urbanos en rutas fijas, mediante una metodología que considere las condiciones reales de operación en las cuales el autobús va a desempeñarse [2].

En respuesta a los desafíos ambientales y de movilidad de Riobamba, una ciudad ecuatoriana con 16 parroquias este estudio evalúa la introducción de buses eléctricos en su sistema de transporte público. Esta iniciativa se alinea con la meta de Ecuador de reducir las emisiones de GEI en un 9% para 2025 y la descarbonización del sector automotor, siguiendo el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035 y la Ley Orgánica de Eficiencia Energética, que exige que para 2025 todos los nuevos vehículos de transporte público sean eléctricos. Ciudades como Guayaquil, Loja, Cuenca, Quito y Galápagos ya han implementado electromovilidad [3].

La investigación consideró la construcción de ciclos de conducción a partir de recorridos urbanos para evaluar el consumo, emisiones y demanda energética de vehículos de transporte público. Se estableció el marco teórico, tipologías y características de buses eléctricos. La Metodología se basó en la recolección de datos mediante observación directa en rutas y estaciones, complementada con investigación bibliográfica. Se centró en la modelación del tren motriz del autobús BYD K9 G mediante simulaciones en Matlab-Simulink, utilizando datos de ciclos de conducción reales. Se determinó que el BYD K9 G puede satisfacer las demandas de la Línea 5, la ruta más exigente, mostrando mejoras significativas en consumo y autonomía gracias a la regeneración de energía y gestión del estado de carga. Finalmente, se evaluó la viabilidad técnica, operativa y económica de adoptar buses eléctricos en Riobamba, enfatizando la necesidad de especificaciones técnicas y políticas de apoyo para una implementación exitosa. [4]

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

BYD	
Atributo	Valor
Proveedor	BYD
Modelos	K9G-S, K9G-I
Capacidad de pasajeros K9G-S	32 sentados, 49 de pie
Capacidad de pasajeros K9G-I	32 sentados, 44 de pie
Autonomía (Km)	251
Velocidad Máxima (Km/h)	100,5
Potencia (kW)	300
Tiempo de Carga (h)	2-mar
Capacidad de baterías (kWh)	324
Torque máx. (Nm)	1.100
Pendiente máx. por vencer (%)	17



Figura 1. Datos técnicos operativos del autobús BYD modelo K9G

Parámetros para la determinación de la demanda de energía

Al diseñar vehículos eléctricos, es crucial determinar la potencia necesaria para su funcionamiento óptimo, teniendo en cuenta factores como la velocidad, la aceleración y las demandas específicas del tráfico urbano. Para estudiar el consumo energético de un vehículo, es fundamental entender las fuerzas que actúan sobre él. Nos basamos en la segunda ley de Newton para analizar su dinámica. Al crear un diagrama de cuerpo libre, podemos visualizar todas las fuerzas que enfrenta el autobús, que son, en esencia, las resistencias que debe superar para moverse [5]. Para resolver estas ecuaciones dinámicas con precisión, es necesario definir parámetros específicos. Esto incluye variables propias del vehículo, de su operación, del tren motriz y del entorno. Todos estos elementos se agrupan y se consideran esenciales para comprender el movimiento del vehículo.

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Tablas 1 Parámetros

Parámetros del vehículo	Parámetros ambientales	Parámetros Operacionales
Área frontal [m ²] Masa [m] Radio dinámico [m] Coeficiente de arrastre [-] Coeficiente de resistencia a la rodadura [-]	Densidad del aire [kg/m ³] Gravedad [m/s ²]	Velocidad [km/h] Pendiente [%-rad] Tiempo [s] Aceleración [m/s ²] Potencia [kW] Torque [Nm] Energía [Kw] Eficiencia [η]

Elaborado por: Autores

Fuente: Parámetros del vehículo

Ciclos de conducción

Se trabajó con ciclos de conducción transitorios, aplicando una técnica de recolección de datos directa, mediante el método On-Board.

Tabla 2. Métodos de obtención de ciclos de conducción

Técnica	Ventajas	Limitaciones
On-Board	Recolección directa de datos de conducción.	Elevado costo de instrumentación (Equipo de datos por cada vehículo).
	Desarrollo de perfiles de conducción representativo.	Estudio de las características de conducción de un solo conductor.
	Adecuado para países donde el comportamiento de conducción es irregular y agresivo.	Requiere de una muestra grande para asegurar la representatividad de la base de datos.
	Este método se puede mantener económicamente si se seleccionan las rutas representativas utilizando una base de datos de tráfico posible.	Demanda de mucho tiempo para el levantamiento de datos.
Persecución de vehículo	Estudio de las características de conducción de diferentes conductores en un solo recorrido.	Violación de límites de velocidad.
	Bajo costo de instrumentación.	Percepción por parte del conductor del vehículo objetivo.
	Recopilación de patrones de conducción de algunos vehículos en un solo recorrido.	Recolección indirecta de datos y con margen de error alto.
	Representatividad de la muestra.	Los equipos láser pierden su efectividad al pasar baches, pendientes y curvas.
	Se emplea un solo vehículo para levantar datos de conducción.	Diferencias de comportamiento de conducción entre el vehículo caza y el vehículo estudiado. El vehículo caza puede perder con facilidad el vehículo estudiado cuando su comportamiento de conducción es agresivo.

Elaborado por: Autores

Fuente: Métodos para recolección de datos

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Levantamiento de muestras en las rutas de la ciudad

La recopilación de datos se llevó a cabo en las rutas urbanas, considerando tanto días normales como aquellos con una afluencia inusual de pasajeros. Se registraron datos considerando el PBV del autobús para despreciar la variable del volumen de pasajeros, por lo tanto, fue constante el PBV del autobús.

Instrumentación del vehículo

El autobús HINO AK de la serie 500 es un modelo clave en el sistema de transporte urbano de Riobamba [6]. Este vehículo cuenta con un motor diésel turboalimentado de 6 cilindros con inyección directa y un intercooler, además de una configuración OHC. Utiliza neumáticos de tamaño 11/R 22.5/16 o 295/80/22.5, con una presión de 110 PSI y una cilindrada de 7.684 cm. El VBOX Sport GPS [7] es un registrador de datos portátil que se utilizó en diversos vehículos y entornos. Permitió la medición en tiempo real del rendimiento, incluyendo la captación de datos como tiempo, velocidad, trayectorias y otros parámetros vehiculares importantes.



Figura 1. VBox GPS

Tabla 3. Descripción de las líneas de autobuses urbanos de la ciudad de Riobamba

Línea	Descripción de la ruta	Nº Buses	Tiempo de recorrido	Distancia recorrida	Nº ciclos al día	Ángulo Max de pendiente
[-]	[-]	[-]	[h-min-s]	[km]	[-]	[°]
1	Santa Anita – Bellavista	13	1:23:00	180.8	8	6.1
2	24 de Mayo – Bellavista	13	1:23:00	163.2	8	9.5
3	El Carmen – Camal – Mayorista	10	1:32:00	150	6	9.1
4	Licán – Bellavista	9	1:29:00	176.8	8	7.7
5	Corona Real – Bellavista	11	1:45:00	189.6	6	8.1
6	Miraflores – Bellavista	9	1:31:00	161	7	9.3
7	Inmaculada – El Rosal	14	1:55:00	198.6	6	10.2
8	Yaruquies – Las Abras	14	1:32:00	136.5	7	8.7
9	Cactus – Licán	9	1:45:00	163.2	6	9.2
10	Pinos – San Antonio	8	1:36:00	159	6	6.5
11	Terminal Interparroquial – Mayorista	12	1:20:00	148	8	9.8

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

12	San Gerardo – El Batan	9	1:30:00	131.4	6	7.7
13	Sixto Duran – San Miguel Tapi	17	1:46:00	159.25	6.5	7.2
14	Libertad – 24 de Mayo	18	2:01:00	187.2	6	10.4
15	Lican – ESPOCH – UNACH	10	1:26:00	143.5	7	8.5
16	Calpi – La Paz	10	1:30:00	156.1	7	11.7

Elaborado por: Autores

Fuente: Datos operativos de las líneas de transporte

Rutas establecidas para ser analizadas y el consumo relacionado de combustible, esta información se obtuvo de la hoja de rentabilidad proporcionada por la administración del sistema de transporte urbano de la ciudad, como se evidencia la Línea 5, es la más demandante en cuanto al consumo de combustible.

Tabla 4. Descripción de las líneas de autobuses urbanos de la ciudad de Riobamba

Línea	Nombre	Gastos Diésel	Galones (gatos de diésel /1,75\$ precio del gl)
5	Corona Real-Bellavista	40 \$	22,9 gl
7	Inmaculada-El Rosal	37 \$	21,1 gl
14	San Luis- San Miguel de Tapi	40 \$	22,9 gl
16	Calpi-La Paz	35 \$	20 gl

Elaborado por: Autores

Fuente: Datos de consumo de combustible

Parámetros de rutas preestablecidas

El análisis experimental para determinar la demanda de energía existente en las líneas de transporte urbano representativas de la ciudad de Riobamba permite desarrollar un análisis y comparar el funcionamiento que tendría un autobús eléctrico, demostrando la viabilidad del estudio y la operación del autobús, contemplando las características existentes actualmente en la ruta más demandante.

Ruta 5 (CORONA REAL – BELLAVISTA)

Tabla 5. Descripción de las líneas de autobuses urbanos de la ciudad de Riobamba

Características Ruta 5 Corona Real – Bellavista	Parámetros	
Distancia	32,58	[km]
Tiempo	5760,00	[s]
	1:36:00	[h-m-s]
Velocidad promedio	6,16	[m/s]

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

	22,16	[km/h]
Pendiente Max	8	[%]
Altitud Max	3150	[msnm]
Horario	6:20 a 20:30	[horas]
Frecuencia de trabajo	10	[min]

Elaborado por: Autores

Fuente: Datos operativos Línea 5

Ruta 7 (INMACULADA – EL ROSAL)

Tabla 6. Descripción de las líneas de autobuses urbanos de la ciudad de Riobamba

Características de la Ruta 7 Inmaculada – El Rosal	Parámetros	
Distancia	31,73	[km]
Tiempo	5820,00	[s]
	1:54:36	[h-m-s]
Velocidad promedio	6,05	[m/s]
	21,78	[km/h]
Pendiente Max	9,6	[%]
Altitud Max	2934	[msnm]
Horario	6:20 a 19:00	[horas]
Frecuencia de trabajo	10	[min]

Elaborado por: Autores

Fuente: Datos operativos Línea 7

Ruta 14 (LIBERTAD – 24 DE MAYO)

Tabla 7. Descripción de las líneas de autobuses urbanos de la ciudad de Riobamba

Características de la Ruta 14 Libertad – 24 de Mayo	Parámetros	
Distancia	33,12	[km]
Tiempo	7231	[s]
	2:00:31	[h-m-s]
Velocidad promedio	5,78	[m/s]
	20,82	[km/h]
Pendiente Max	9,6	[%]
Altitud Max	2934	[msnm]
Horario	6:20 a 19:00	[horas]
Frecuencia de trabajo	10	[min]

Elaborado por: Autores

Fuente: Datos operativos Línea 14

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Ruta 16 (CALPI – LA PAZ)

Tabla 8. Descripción de las líneas de autobuses urbanos de la ciudad de Riobamba

Características de la Ruta 16 Calpi – La Paz	Parámetros	
Distancia	28,13	[km]
Tiempo	5725,69	[s]
	1:22:27	[h-m-s]
Velocidad promedio	6,37	[m/s]
	23,54	[km/h]
Pendiente Max	11,7	[%]
Altitud Max	3143	[msnm]
Horario	6:20 a 19:00	[horas]
Frecuencia de trabajo	10	[min]

Elaborado por: Autores

Fuente: Datos operativos Línea 16

Determinación de los parámetros del autobús urbano

En el siguiente apartado se definen los parámetros propios del modelo de autobús analizado, considerando que en la actualidad existen 18 unidades que cubren diariamente el trayecto de la línea 5, el modelo de autobús analizado es el HINO AK8JRSA. Los parámetros del autobús necesarios para la determinación del consumo de energía demandada en rueda son los siguientes:

- Masa del autobús [M]
- Radio dinámico [r_d]
- Área frontal del autobús [A_f]
- Coeficiente de arrastre [C_d]
- Coeficiente de resistencia a la rodadura [f_r]

Masa del autobús

De acuerdo con la ficha técnica del modelo de autobús HINO AK8JRSA, el peso bruto vehicular es 14200 kg, es el máximo peso que soporta el chasis del autobús, lo cual incluye la carrocería y el peso total de los pasajeros. Se utilizará este valor para evitar variaciones con respecto a la demanda de pasajeros y analiza la demanda en su máximo requerimiento.

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Radio dinámico

El radio dinámico, es el radio del neumático que se encuentra deformado por el peso y el giro de este. De acuerdo con la ficha técnica del autobús HINO AK8JRSA las dimensiones del neumático son 295/80R/22.5, el radio dinámico se calcula con la ecuación (1):

$$r_d = An * Al + \emptyset \tag{1}$$

Donde; An es el ancho de la banda de rodadura del neumático en [mm], Al es la altura de la cámara del neumático en [%] y \emptyset es el diámetro del aro del neumático en [in].

Los valores de los parámetros del área frontal [m^2], coeficiente de arrastre, coeficiente de resistencia a la rodadura y densidad del aire [kg/m^3] en la ciudad de Riobamba, fueron tomados de la literatura y se muestran en la tabla 9. La masa del autobús se muestra a plena carga, media carga y en vacío en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros del autobús utilizado para determinar la demanda energética

Parámetros del autobús	Simbología	Valor	Referencia
Área frontal [m^2]	$[A_f]$	7.73	[6]
Coeficiente de arrastre	$[C_d]$	0.8	[7]
Coeficiente de resistencia a la rodadura	$[f_r]$	0.009	[8]
Masa del autobús [kg]	$[M]$	14200, 11750, 9300	Ficha técnica (HINO, AK8JRSA)
Radio dinámico [m]	$[r_d]$	0.52	Ficha técnica (HINO, AK8JRSA)
Parámetros ambientales			
Densidad del aire [kg/m^3]	$[\rho_a]$	0.843	[9]
Gravedad [m/s^2]	[g]	9.81	[10]

Elaborado por: Autores

Fuente: Parámetros calculados para el autobús Hino AK

Determinación de las variables del recorrido del autobús

Modelo de la dinámica longitudinal del autobús

En lo habitual un vehículo se desplaza a través de carretera llana, debe ascender y descender pendientes, así como tomar curvas. En este trabajo se realizará una modelización del movimiento del vehículo, se considerará un modelo que incluya parámetros operativos, ambientales y físicos. La determinación de la demanda energética se fundamenta en la dinámica de vehículos, la cual a su vez parte de la segunda ley de Newton. En la figura 3, se muestra el diagrama de cuerpo libre en el cual se expresan las fuerzas resistivas que el vehículo debe ser capaz de vencer para poder moverse.

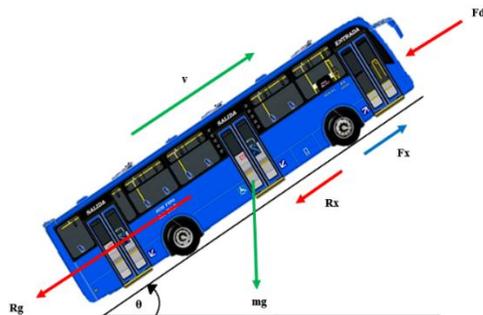


Figura 3. Diagrama de fuerzas que actúan sobre un autobús

A continuación, se describen las fuerzas que se oponen al movimiento del autobús. En la ecuación (2), se muestra la relación entre la aceleración del vehículo y las fuerzas que actúan sobre el mismo.

$$m * a = F_t - F_w - F_g - F_r \quad (2)$$

Donde m es la masa del vehículo [kg], a es la aceleración del vehículo [m/s^2], F_t es la fuerza de tracción [N], F_w es la fuerza de resistencia aerodinámica [N], F_g es la fuerza de resistencia a la pendiente [N] y F_r es la fuerza de resistencia a la rodadura [N], [8].

Resistencia aerodinámica

Al desplazarse un vehículo el aire que fluye sobre su carrocería genera una presión normal y una tensión de cizallamiento en el cuerpo del vehículo. La resistencia aerodinámica está en función del coeficiente de resistencia aerodinámica el cual depende de la forma de la carrocería, también está en función del área frontal del vehículo, la ecuación (3), representa la resistencia aerodinámica [8].

$$F_w = \frac{1}{2} \rho * A * C_d * V^2 \quad (3)$$

Donde; ρ es la densidad del aire [kg/m^3] y V es la velocidad del vehículo [m/s].

Resistencia a la pendiente

Al desplazarse un vehículo hacia arriba o hacia debajo de una pendiente, la acción de la gravedad genera una fuerza dirigida hacia abajo, como se indica en la figura 6, esta fuerza es contraria al movimiento del vehículo durante el ascenso de una pendiente y a favor del movimiento del vehículo al descender una pendiente. En la ecuación (4), se muestra la resistencia a la pendiente [8].

$$F_g = m * g * \sin(\theta) \quad (4)$$

Donde; θ es el ángulo de la pendiente [rad] de la carretera, m es la masa del vehículo [kg], y g es la aceleración de la gravedad [m/s^2].

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Resistencia a la rodadura

Al desplazarse el vehículo se genera la resistencia a la rodadura, debido a la histéresis del neumático en la zona de contacto con la calzada. La resistencia a la rodadura contribuye a frenar o desacelerar al vehículo en su movimiento. La ecuación (5), representa la fuerza de resistencia a la rodadura. Donde; F_z es la fuerza normal [N], f_r es el coeficiente de rodadura y θ es el ángulo de la pendiente [rad] de la carretera.

$$F_r = F_z * f_r * \cos(\theta) \quad (5)$$

Las ecuaciones (2), (3), (4), (5) permiten determinar la dinámica longitudinal del vehículo y calcular variables tales como la fuerza [N], el torque [N.m], la potencia [kW] y energía en rueda [kW.h]. El torque en rueda (T_t) se determinó con la ecuación (6), la potencia en rueda (P_t) con la ecuación (7) y la energía en rueda (E_t) con la ecuación (8).

$$T_t = F_t * r_d \quad (6)$$

$$P_t = F_t * v \quad (7)$$

$$E_t = P_t * \Delta_t \quad (8)$$

Donde; (r_d) es el radio dinámico [m] de las ruedas, (v) la velocidad del vehículo [m/s] y (Δ_t) es la variación de tiempo [s].

Con los parámetros obtenidos se determina la Energía de resistencia aerodinámica (E_{ef}), Energía de resistencia rodadura (E_g), Energía de resistencia a la pendiente (E_i) y la Energía Total E_T .

$$E_{ef} = F_w * v * \Delta_t \quad (9)$$

$$E_g = F_g * v * \Delta_t \quad (10)$$

$$E_i = m * a * v * \Delta_t \quad (11)$$

$$E_T = E_{ef} + E_t + E_g + E_i \quad (12)$$

Se considero para el análisis la ruta con el mayor consumo de energía, a continuación, se muestran los porcentajes de energías demandadas en cada viaje que se realizó en la línea 5, de acuerdo con el método estadístico de las mínimas diferencias ponderadas se determinó el viaje con el ciclo más representativo, a continuación, se evidencia en la tabla 3 el viaje más representativo, el número 13.

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Tabla 10. Energías demandadas en cada viaje de la línea 5

Numero de viajes	Energía Fd	Energía Rx	Energía Rg	Energía Ri	Total Energía	Sumatoria
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]
1	1,61	12,88	33,31	52,21	100,00	1,72
2	1,66	11,96	31,71	54,67	100,00	0,93
3	1,41	15,86	39,10	43,63	100,00	8,34
4	1,62	14,32	36,40	47,66	100,00	5,12
5	1,71	11,21	31,40	55,68	100,00	1,48
6	1,57	12,40	34,05	51,98	100,00	2,14
7	1,80	13,17	28,35	56,68	100,00	2,38
8	1,76	12,58	27,51	58,15	100,00	3,51
9	1,65	13,80	31,35	53,20	100,00	0,51
10	1,54	16,53	39,07	42,87	100,00	8,83
11	2,24	13,62	31,17	52,97	100,00	0,57
12	1,47	14,11	33,88	50,55	100,00	2,76
13	1,45	13,31	31,34	53,90	100,00	0,22
14	1,51	14,36	33,28	50,85	100,00	2,45
15	1,78	14,29	24,15	59,78	100,00	5,37
16	1,98	13,37	8,11	76,55	100,00	19,30
17	1,65	13,80	31,35	53,20	100,00	0,51

Elaborado por: Autores

Fuente: Ponderación mínima de muestras realizadas en la Línea 5

Por último, se consideró los datos operativos del tiempo, velocidad, altitud, aceleración y distancia para la simulación en Matlab, a partir del ciclo de conducción se dimensiono utilizando un modelo matemático de regresión lineal, donde se calcula la Fuerza neta [N] ecuación (13)(14), potencia mecánica [W] ecuación (7), potencia eléctrica [W] (15), energía de batería que ingresa, ósea en carga y energía de batería que sale, cuando se descarga [Kwh] (16)(17).

$$Fnt = \epsilon\gamma m * m * a \quad (13)$$

El coeficiente (γ) utilizado para la fuerza de inercia se puede expresar como una función de las relaciones de transmisión (ξ_0) del mando final y ξ_{gb} de la caja de cambios.

$$\gamma m = 1.04 + 0.0025(\epsilon_j * \epsilon_d)^2 \quad (14)$$

La potencia eléctrica se calcula empleando la potencia mecánica y la eficiencia que posee el motor eléctrico utilizando donde P_t es la potencia mecánica en [W], y η_t es la eficiencia del motor eléctrico [adimensional].

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

$$P_{Elec} \frac{P_t}{\eta_t} \quad (15)$$

El SOC (State Of Charge) o estado de carga por sus siglas en inglés hace referencia a la cantidad de energía que se encuentra almacenada en la batería de tracción o cualquier acumulador de energía siendo un indicador porcentual que cuantifica la energía donde a carga completa denota el 100 % y 0 % completamente descargada. Donde, f_{dc} es la energía que ingresa (carga), f_c es la energía que sale (descarga), t es el tiempo en [s], E_0 es el voltaje nominal en [V], K es la constante de polarización, i es el corriente de la batería en [A], i es la corriente de la batería con un filtro pasa-bajas ($\tau = 10$ s), Q es la capacidad máxima de la batería en [A – h], α es el voltaje exponencial, y β es la capacidad exponencial.

$$f_{dc} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} i - K \frac{Q}{Q-it} it + \alpha e^{-\beta it} \quad (16)$$

$$f_c = E_0 - K \frac{Q}{Q+0.1*Q} i - K \frac{Q}{Q-it} it + \alpha e^{-\beta it} \quad (17)$$

En el backward-facing simulation, los datos operativos definen el ciclo de conducción. se utilizan las ecuaciones empíricas para determinar la Fuerza neta necesaria de la rueda, así se simplifica ya que no se necesita un modelo para controlar la transmisión [9].

Resultados y Discusión

Obtención del ciclo real de conducción

El ciclo típico de conducción se determinó con 68 viajes completos para todas las rutas 17 viajes por ruta, con una duración del recorrido de aproximadamente hora y media para la línea 5, con una distancia aproximada de 30.5 km, velocidad promedio de 6.6 m/s y la velocidad máxima de 18.36 m/s, cada autobús de la línea 5 realiza 6 viajes al día, frente a las condiciones normales del servicio se espera aceleraciones y desaceleraciones producto de las paradas no programadas.

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Tabla 11. Energías demandadas en el ciclo representativo de la línea 5

Número de viaje	E_{ef} [%]	E_t [%]	E_g [%]	E_i [%]	E_T [%]	Sumatoria
13	1,45134974	13,3087073	31,338869	53,9010739	100.00	0,2220322

Elaborado por: Autores

Fuente: Percentiles de energías en las fuerzas de arrastre

En la figura 4, se muestra el perfil de velocidades que corresponden al ciclo típico de conducción de la línea 5.

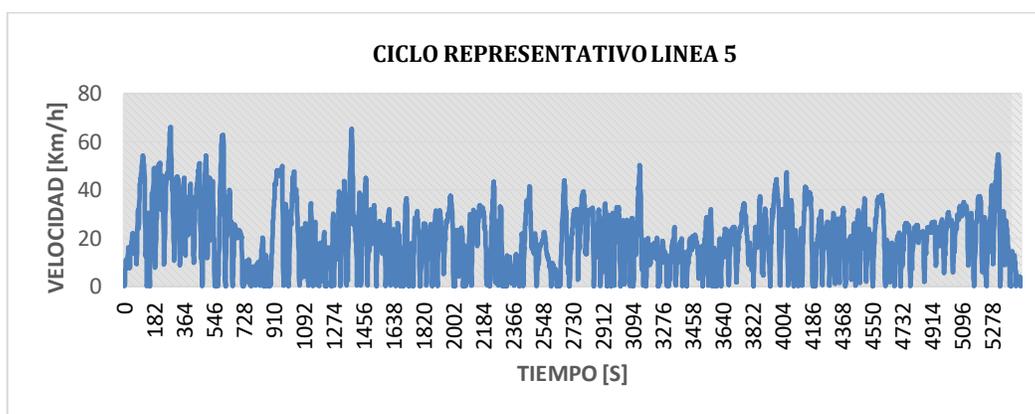


Figura 4. Ciclo típico de conducción de los buses urbanos de la línea 5, Riobamba

En la figura 5, se presenta el perfil de altitud de la mencionada ruta de los autobuses urbanos de la línea 5.

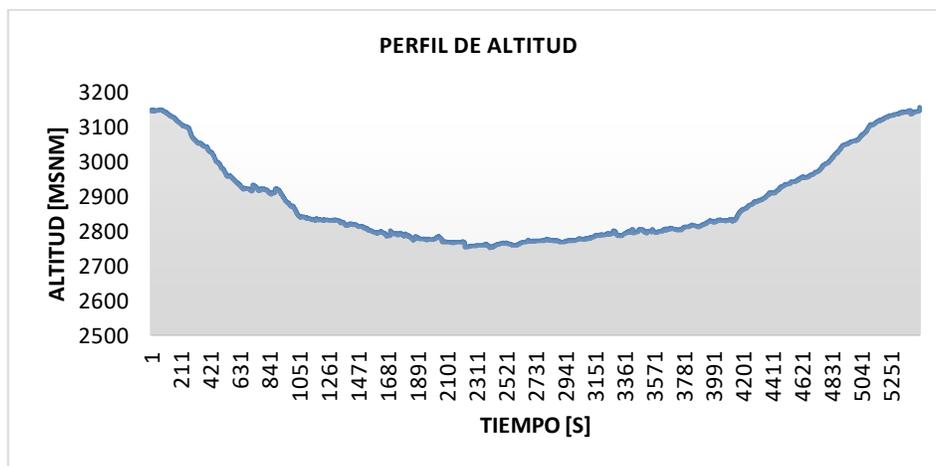


Figura 5. Perfil de altitud de la ruta de la línea 5, Riobamba

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Con los datos operativos recolectados del VBox GPS, se analizan en el software Circuit VBox y los datos CSV en Excel, se filtran en varias etapas datos atípicos, por qué se llegan a obtener valores de pendientes que superan el 20%, esto deriva en mayor demanda energética, proporcionando resultando de potencias en rueda que superan la potencia máxima del motor de combustión interna, por este motivo requieren ser suavizados mediante el reglamento de la Unión Europea (UE) 2016/646 [10], que detalla el procedimiento para el suavizado de los datos de altitud y por consiguiente del perfil de pendiente. En la figura 6, se muestra el perfil de pendientes que se origina durante el recorrido de los autobuses de la línea 5. La pendiente máxima que se genera suavizados los datos es de 8.1%, es preciso recalcar que, a mayor tiempo de pendiente, la demanda energética será mayor.

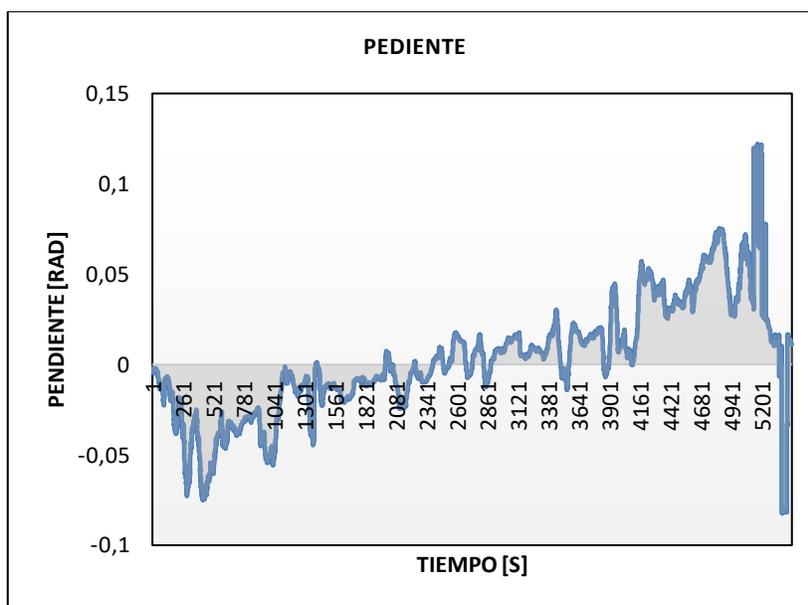


Figura 6. Perfil de pendientes suavizadas de la ruta de la línea 5, Riobamba

Se indica la gráfica con el valor de consumo de energía 40.83 [kWh], obtenido después del filtrado de datos y la rectificación de ganancia de altitud positiva.

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

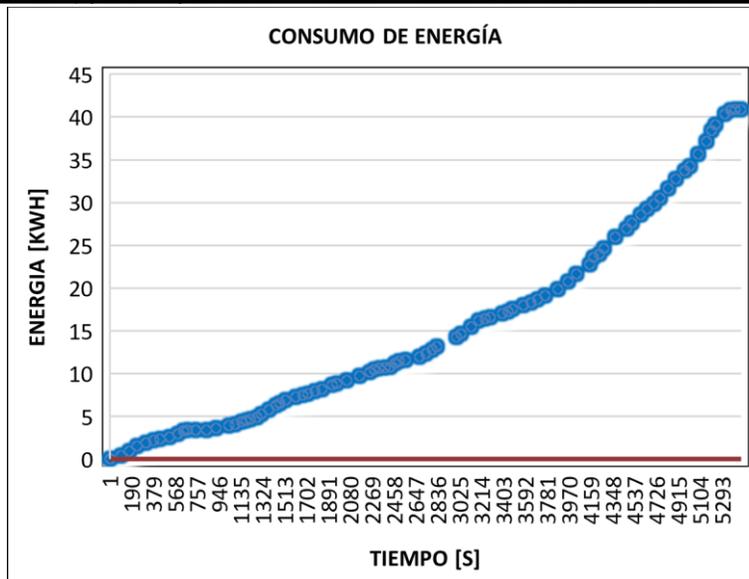


Figura 7. Perfil de pendientes suavizadas de la ruta de la línea 5, Riobamba

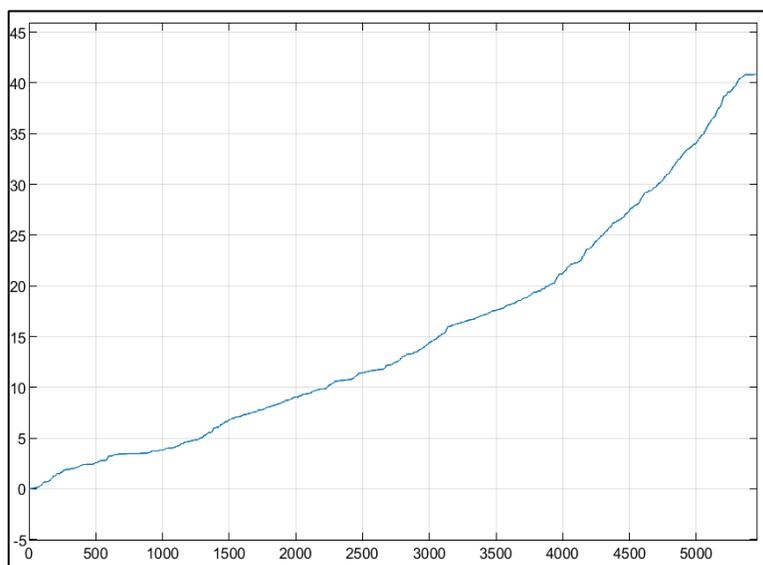


Figura 8. Perfil de pendientes suavizadas de la ruta de la línea 5, Riobamba

En la tabla 5, se muestran las características del ciclo típico de conducción de la ruta de la línea 5. Es importante señalar que la potencia máxima obtenida en rueda en el ciclo típico es de 188 kW que corresponde a 252 HP, en la tabla de las especificaciones técnicas se detalla que la potencia máxima del autobús HINO AK8JRSA es 260 HP a 2500 RPM.

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Tabla 12. Resultados del ciclo típico de conducción de la línea 14 de autobuses

Distancia total	30,41	[km]
Vel. Máx	18,36	[m/s]
Vel. Promedio	5,57	[m/s]
Acc. Máx	1,74	[m/s ²]
Acc. Mín	-2,63	[m/s ²]
Tiempo total	5456,00	[s]
	1:30:56	[h-m-s]
Acc. (+) promedio	0,428	[m/s ²]
Acc. (-) promedio	-0,53641	[m/s ²]
Potencia máx	188,00	[kw]
Torque máx	14654,48	[N.m]
Energía positiva total	40,83	[kWh]
Energía negativa total	23,45	[kwh]
% Regeneración	57,43	%
Rendimiento	0,74	[Km/Kwh]
Detenido	0,00	[%]
Velocidad. cte	0,33	[%]
Aceleración	55,43	[%]
Desaceleración	44,24	[%]
TOTAL:	100,00	[%]
[a*V] (+) promedio	2,33	[m ² /s ³]
[a*V].máx	15,90	[m ² /s ³]

Elaborado por: Autores

Fuente: Resultados de la Línea 5

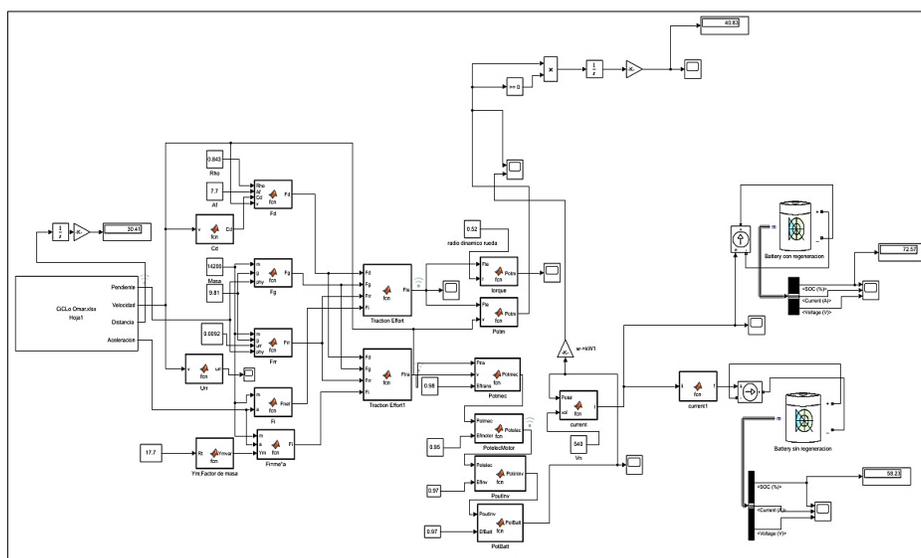


Figura 7. Modelo de simulación en Matlab

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

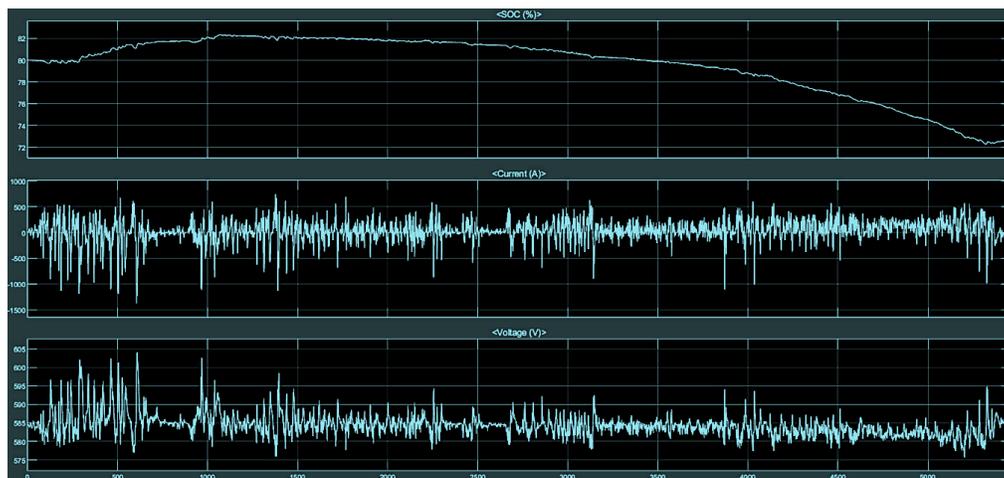


Figura 8. Modelo de simulación en Matlab, SOC y consumo de Energía con regeneración

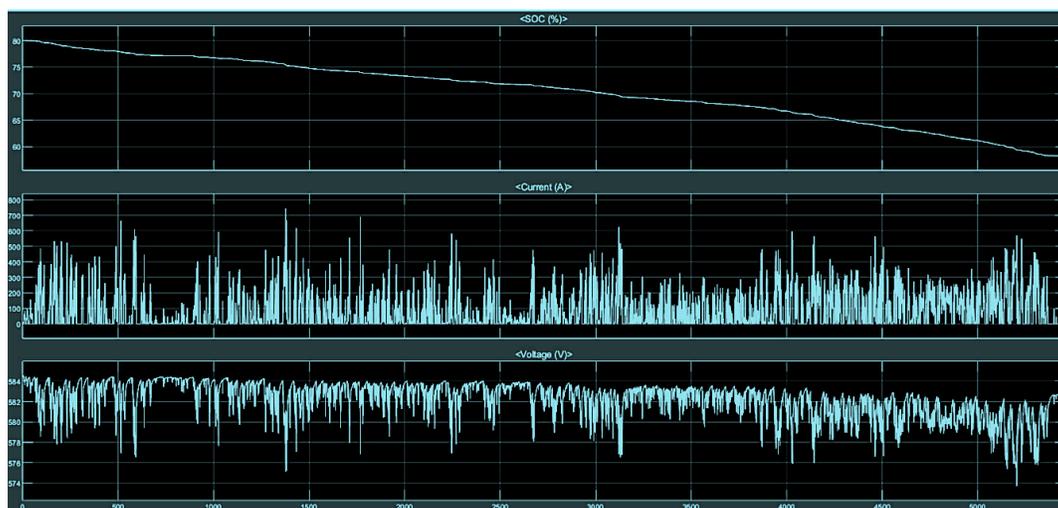


Figura 6. Modelo de simulación en Matlab, SOC y consumo de Energía

Conclusiones

- El autobús recorre uno de los trayectos urbanos de mayor duración ya que recorre de acuerdo con el ciclo típico de conducción en promedio 125.05 minutos.
- La demanda de energía en rueda necesaria para que el autobús realice un viaje completo es 40.83 kWh, considerando que el autobús realiza a diario 6 viajes completos, la energía promedio requerida en rueda cada día sería en promedio 244.98 kWh.
- Los porcentajes de consumo de energía generados por las fuerzas que se oponen al movimiento del autobús indican que el estilo de conducción de los choferes de las unidades

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano. para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

de transporte es agresivo, debido a que la energía necesaria para superar la resistencia a la inercia es en promedio 54 kWh.

- Los parámetros calculados a partir del ciclo real de conducción, como el torque, potencia porcentaje de regeneración, entre otros que se muestran en la tabla 5, permiten estimar el rendimiento del sistema motriz del autobús analizado, también permiten establecer los requerimientos necesarios para una selección técnica de unidades de transporte con sistemas alternativos de propulsión.

Referencias

1. D. Espimbera, "Estudio de los ciclos de conducción para determinar parámetros de manejo en condiciones reales de operación mediante la metodología mirco-trip," Trabajo de titulación, Universidad Tecnológica Equinoccial, Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias, Carrera de Ingeniería Automotriz, Santo Domingo de los Tsáchilas-Ecuador, 2018, p. 48. Accedido en: Dic. 26, 2023.
2. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS, "Balance Energético Nacional (BEN), 2021," Quito, 2022. Disponible en: www.recursosyenergia.gob.ec
3. F. T. F. Adrián Rodríguez Cubillo, "SIMULACIÓN MEDIANTE SIMULINK DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL HÍBRIDO EN UN CICLO WLTC," 2020.
4. D. Cordero-moreno, D. Davalos, and M. Coello, "PROPOSED CRITERIA TO DETERMINE TYPICAL VEHICULAR DRIVING CYCLES USING MINIMUM WEIGHTED DIFFERENCES," no. March 2018, 2017, doi: 10.2495/UT170281.
5. L. Valencia, "Catálogo FT-BUS-AK8JRSA-T," 2020. Accedido en: Oct. 10, 2023. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/515989919/Ft-Bus-Ak8jrsta-t>
6. RACELOGIC, "Grupo Álava Tecnología Industrial," 2023. Accedido en: Ago. 5, 2023. Disponible en: <https://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/velocidad-por-gps-vbox/>
7. A. Emadi, Advanced Electric Drive Vehicles. Ontario, 2014.
8. D. Cordero y W. Guiñansaca, "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 de pregrado, Universidad Del Azuay, Facultad De Ciencia Y Tecnología, Escuela De Ingeniería Mecánica Automotriz, Cuenca -

Selección de un autobús eléctrico, mediante la simulación y determinación de energía, una ruta del transporte urbano, para impulsar movilidad sostenible en la ciudad de Riobamba

Ecuador, 2020, pp. 48-59. Accedido en: Dic. 18, 2023. [En línea]. Disponible en:
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/11361>

9. J. Urgil and S. I. Urgil, “Aplicación del método de diferencias mínimas ponderadas para la obtención de un ciclo de conducción en una ruta urbana de un autobús. Caso de estudio : Azogues , Ecuador,” vol. 1, no. 2, pp. 48–52, 2021.

©2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).