



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TITULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Aproximación al análisis comparativo del desempeño de buses eléctricos y de combustión interna en las condiciones de carga y orografía de Loja.

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTORA: Arciniega Aguilar, Karen Belén

DIRECTOR: Ing. Castro Mendieta, José Raúl, PhD.

LOJA – ECUADOR

2020



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NC-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2020

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

PhD.

José Raúl Castro Mendieta

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: “Aproximación al análisis comparativo del desempeño de buses eléctricos y de combustión interna en las condiciones de carga y orografía de Loja” realizado por Arciniega Aguilar Karen Belén, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, mayo 2020

f.).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo Arciniega Aguilar Karen Belén declaro ser autora del presente trabajo de titulación: “Aproximación al análisis comparativo del desempeño de buses eléctricos y de combustión interna en las condiciones de carga y orografía de Loja”, de la Titulación de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, siendo José Raúl Castro Mendieta director del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.).....

Autora: Arciniega Aguilar Karen Belén

Cédula:1104191059

DEDICATORIA

A Dios.

A mis padres y hermana.

Karen Belén Arciniega Aguilar

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios. A mis padres por brindarme su apoyo y amor incondicional a lo largo de mi vida. A mi hermana por ser mi compañera en todo momento. A mi familia. A mis amigos.

Karen Belén Arciniega Aguilar

INDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|-----------|
| CAPITULO 1. | 5 |
| 1. Marco legal del Ecuador. | 6 |
| 1.1. Ley Orgánica de Eficiencia Energética..... | 6 |
| 1.2. Normas de los autobuses..... | 6 |
| CAPITULO 2. | 8 |
| 2. Autobuses eléctricos. | 9 |
| 2.1. Autobuses eléctricos a nivel mundial..... | 9 |
| 2.2. Mecanismo del autobús eléctrico. | 11 |
| 2.3. Baterías para vehículos eléctricos..... | 12 |
| 2.4. Sistema de carga..... | 14 |
| 2.5. Freno Regenerativo..... | 14 |
| CAPITULO 3. | 16 |
| 3. Autobús de combustión interna a diésel. | 17 |
| 3.1. Fases de funcionamiento. | 17 |
| 3.2. Sistema de inyección de diésel..... | 18 |
| 3.3. Sistema de alimentación motor diésel..... | 18 |
| 3.4. Filtrado de combustible..... | 19 |
| 3.5. Ralentí..... | 19 |
| CAPITULO 4. | 21 |
| 4. Dinámica Vehicular. | 22 |
| 4.1. Modelo matemático..... | 22 |
| 4.2. Dinámica de los vehículos..... | 22 |
| 4.3. Resistencias y Fuerzas..... | 23 |
| 4.4. Velocidad..... | 24 |
| 4.5. Parámetros. | 28 |
| 4.5.1. Parámetros del Autobús..... | 28 |
| 4.5.2. Coeficiente de arrastre. | 28 |
| 4.6. Parámetros ambientales..... | 31 |
| 4.6.1. Densidad del aire. | 31 |
| 4.6.2. Validación del MMA. | 32 |
| 4.7. Pendiente..... | 35 |
| CAPITULO 5. | 36 |
| 5. Obtención de Resultados. | 37 |
| CONCLUSIONES | 41 |
| RECOMENDACIONES | 42 |
| BIBLIOGRAFÍA | 43 |

ÍNDICE DE FIGURAS.

| | |
|--|-----------|
| Fig. 1 Diagrama de un autobús eléctrico | 12 |
| Fig. 2 Autobús eléctrico K9G..... | 14 |
| Fig. 3 Autobús de combustión interna Mercedes Benz..... | 20 |
| Fig.4 Dinámica Vehicular | 23 |
| Fig. 5 Fuerza de arrastre..... | 24 |
| Fig. 6 Fuerza de resistencia de pendiente..... | 25 |
| Fig. 7 Fuerza de rodadura | 26 |
| Fig. 8 Sumatoria de fuerzas..... | 27 |
| Fig. 9 Bloque de fuerza y potencia..... | 28 |
| Fig. 10 Sistema del freno regenerativo | 32 |
| Fig. 11 Sistema ralentí..... | 32 |
| Fig. 12 Sistema MMA..... | 33 |
| Fig. 13 Validación del modelo MMA..... | 33 |
| Fig. 14 Validación de la potencia del modelo MMA..... | 34 |
| Fig. 15 Ruta UTPL – Emiliano ortega-UTPL..... | 38 |
| Fig. 16 Ruta-UTPL-Solca_Pitas..... | 39 |

ÍNDICE DE TABLAS.

| | |
|---|-----------|
| Tabla 1. Especificaciones del autobús eléctrico. | 15 |
| Tabla 2. Especificaciones técnicas de motores a Diesel. | 20 |
| Tabla 3. Fuerza de arrastre. | 24 |
| Tabla 4. Fuerza de resistencia a la pendiente. | 25 |
| Tabla 5. Resistencia a la rodadura. | 26 |
| Tabla 6. Coeficientes de tipos de vehiculos. | 29 |
| Tabla 7. Coeficiente de rodadura. | 30 |
| Tabla 8. Pesos del autobús de combustión interna. | 30 |
| Tabla 9. Pesos del autobús eléctrico. | 30 |
| Tabla 10. Densidad del aire. | 31 |
| Tabla 11. Cálculo de la pendiente. | 32 |
| Tabla 12. Validación del modelo MMA. | 34 |
| Tabla 13. Cálculo de la potencia. | 34 |
| Tabla 14. Arrancabilidad en pendiente. | 34 |
| Tabla. 15 Modelos de los autobuses. | 37 |
| Tabla 16. Ruta UTP-L-Emiliano Ortega-UTPL. | 38 |
| Tabla 17. Ruta UTP-L-Solca-UTPL. | 40 |

RESUMEN

A nivel mundial, el transporte es la principal fuente de contaminación generando grandes emisiones de CO₂. El calentamiento global y la contaminación ambiental afectan a la sociedad. Implementar el transporte eléctrico reducirá los problemas ambientales. Los autobuses eléctricos son parte del nuevo mercado. Para su masificación, nuevas políticas y leyes se están creando.

Este trabajo realiza un análisis comparativo del desempeño entre los autobuses eléctricos y de combustión interna basada en identificar la energía necesaria, potencia y rendimiento de los autobuses con un método matemático en función de la carga, velocidad y pendientes de ruta.

PALABRAS CLAVES: Autobús de Combustión interna; Autobús eléctrico; Consumo; Energía; Contaminación ambiental.

ABSTRACT

Globally, transport is the main source of pollution, generating large CO₂ emissions. Global warming and environmental pollution affect society. Implementing electric transportation will reduce environmental problems. Electric buses are part of the new market. For its massification, new policies and laws are being created.

This work performs a comparative analysis of the performance between electric and internal combustion buses based on identifying the necessary energy and power of the buses with a mathematical method based on the load, speed, and road slopes.

KEYWORDS: Internal Combustion bus; Electric bus; Consumption; Energy; Environmental pollution.

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador la Ley Orgánica de Eficiencia Energética en el Art. 14 indica que a partir del año 2025 todos los vehículos que se incorporen al servicio de transporte público urbano e interparroquial deberán ser únicamente de medio motriz eléctrico (Asamblea Nacional & Barrazueta, 2019). El transporte eléctrico es una solución de movilidad sostenible para suplir los altos costos y escasos de combustibles fósiles y contribuir a la protección del medio ambiente. La implementación de nuevas tecnologías de fuente limpia sirve para mitigar el problema de las grandes emisiones de CO₂.

La demanda energética eléctrica en Ecuador va aumentando. A finales del 2019 fue de 27.104 GWh (CONELEC, 2014). La reducción de costos, la disminución de gases de efecto invernadero, el apoyo político, la normalización y el uso de nuevas tecnologías promueven el ingreso de autobuses eléctricos para el tránsito urbano (Ríos, Vargas Guevara, Guamán Molina, & Otorongo Cornejo, 2018; Sanz Arnaiz, 2015; Teoh, Khoo, Goh, & Chong, 2018).

Durante el periodo 2010, a nivel mundial, se empezó con autobuses eléctricos llegando a operar 16 millones de unidades y se espera que aumente a 18 millones de unidades para el año 2020 (Grütter, 2015). El rendimiento de los autobuses eléctricos desde ese periodo hasta la actualidad son mejoras en la disminución de elementos contaminantes producidos por el dióxido de carbono que emiten los autobuses de combustión interna.

Los autobuses eléctricos son parte del nuevo mercado los mismos que han participado en debates y se han convertido en base de creación de políticas y leyes. Para el 2020 se espera una reducción del 30% de las emisiones de gases efecto invernadero y para el 2050 de hasta un 95% (Santamaría Montalvo, 2015). Actualmente el Ecuador cuenta con 9 centros de medición de calidad del aire en línea, sin embargo, a nivel mundial se ubica en el puesto 80 de contaminación atmosférica. Los parámetros que rigen su nivel de contaminación y calidad de aire dan como resultado una calidad aceptable para la región sur del Ecuador ("World's Air Pollution: Real-time Air Quality Index," 2020).

Actualmente la ciudad de Loja cuenta con autobuses de combustión interna los principales causantes de contaminación atmosférica. Emiten gases efecto invernadero como el dióxido de nitrógeno y material particulado principales contaminantes del aire.

Los autobuses a Diesel utilizan la ignición del combustible al ser inyectado en una cámara que contiene aire a una temperatura superior a la temperatura de auto combustión sin necesidad de chispa. Dadas las elevadas comprensiones que se alcanzan estos motores y el gran calor que generan los componentes que los forman están más reforzados y son más pesados.

Este trabajo propone una metodología para calcular la potencia, energía y rendimiento del autobús de combustión interna y el autobús eléctrico en condiciones de carga y orografía de la ciudad de Loja. Se aplica un método directo a través de un modelo matemático el mismo que compara ambos autobuses a través de los parámetros de funcionamiento y las especificaciones de los catálogos de los autobuses. En base a las ecuaciones utilizadas para obtención de la energía, potencia y rendimiento se establece los parámetros de los autobuses incluyendo pendientes y velocidades establecidas en la ciudad de Loja.

CAPITULO 1.
MARCO LEGAL EN EL ECUADOR.

1. Marco legal del Ecuador.

El Ecuador crea la Ley orgánica de eficiencia energética contribuyendo a la protección del medio ambiente y promoviendo el uso de energías renovables de bajo impacto. La ley establece un marco de funcionamiento del Sistema Nacional de Eficiencia Energética y disposiciones específicas para que sean observadas por todos los actores de la sociedad. El incremento de vehículos eléctricos tendrá facilidad de financiamiento para proyectos de eficiencia energética enmarcados en la Ley.

1.1. Ley Orgánica de Eficiencia Energética.

La ley de Eficiencia energética según el Art. 14 prioriza como medida de eficiencia energética en la planificación pública una política especial para el transporte terrestre. A partir del año 2025 todos los vehículos que se incorporen al servicio de transporte público urbano e interparroquial deberán ser únicamente de medio motriz eléctrico(Nº, Hugo, Pozo, & Pichincha, 2019).

1.2. Normas de los autobuses.

La norma INEN 2205(NTE INEN, 2010) establecida para el funcionamiento de cualquier autobús urbano debe proporcionar un nivel de seguridad y comodidad al usuario. La NTE INEN 1668 establece los requisitos que deben cumplir los vehículos de transporte público de pasajeros(Norma INEN 1668, 2016) (Ckd & Ckd, 2018). Los valores que ingresan en estas normas son el largo, ancho, altura del autobús, capacidad de pasajeros y pendiente superable.

La capacidad de los pasajeros establece una clasificación de autobuses urbanos en dos tipos de autobuses. El primero con una capacidad igual o mayor a 60 pasajeros y un minibús con una capacidad menor a 60 pasajeros y debe cumplir con requisitos mínimos de seguridad establecidos en la NTE INEN 034(Inen & Urbano, 2018).

La arrancabilidad en pendiente de un vehículo automotor debe ser como mínimo del 25% entre dos puntos de una pendiente. La misma que se establece en la norma NTE INEN 1668(Norma INEN 1668, 2016). El tren de potencia debe ser capaz de permitirle al autobús alcanzar una velocidad de 40Km/h con un mínimo de 25% en la pendiente (NTE INEN, 2010).

CAPITULO 2.
AUTOBUSES ELÉCTRICOS.

2. Autobuses eléctricos.

La demanda de autobuses eléctricos a nivel mundial se encuentra en un desarrollo exponencial y se espera que ofrezcan un servicio de alta calidad para los distintos clientes. En base a estadísticas a nivel global se puede apreciar que el transporte público busca migrar hacia energías limpias reduciendo de esta manera la mayor cantidad de emisiones de carbono. Actualmente esta tecnología sigue enfrentando desafíos como el desarrollo de sistemas de almacenamiento y cumplir un día de trabajo sin interrupciones (G. G. G. I., 2016).

En este capítulo se describen los autobuses eléctricos y sus características técnicas que manifiesta el fabricante. Estas unidades se comparan con la INEN 1668 y la INEN 2205 que describe un autobús urbano en el Ecuador.

2.1. Autobuses eléctricos a nivel mundial.

La creciente tecnología en autobuses eléctricos es liderada por China con el 99% de los autobuses completamente eléctricos y se espera que los autobuses eléctricos lleguen a un 84% en sus respectivos mercados globales para el siguiente año ("Autobuses eléctricos | Servicio Bloomberg Professional," 2018). El impulso de los autobuses eléctricos en China en los últimos años va en aumento colocado como líder mundial en la utilización de autobuses eléctricos y principal proveedor para diversos países.

BYD uno de los principales distribuidores de autobuses eléctricos distribuyó en (2018) 50,000 autobuses eléctricos se espera que para este año se dupliquen el consumo de autobuses eléctricos. Suecia está impulsando fuertemente la transición a autobuses eléctricos con cero emisiones de CO₂. La nueva planta de electromovilidad de Irizar inaugurada en 2018 revela planes ambiciosos con una creciente demanda de 1000 autobuses por año (Muevecela Alvear, Espinoza Abad, & González Morales, 2019) (Harris, Naim, Palmer, Potter, & Mumford, 2011) (Irizar, 2017).

En la actualidad hay 1600 autobuses eléctricos en Europa y otro pedido se entregará de 9-12 meses. Los autobuses eléctricos ya tienen un costo total de propiedad más bajo durante un periodo de ocho años cuando se incluye factores adicionales como los costos de salud, calidad de aire y ruido. (Sanz Arnaiz, 2015) (Landerl, 2017).

Los pedidos de autobuses eléctricos se duplicaron a 1031 unidades en 2017 según el análisis de la ONG ambiental (Francisco, 2018). En 2018 se incrementó a 1600 unidades en las carreteras europeas. Durante el 2020 se espera que los precios de las baterías bajen y aumente la autonomía de los vehículos eléctricos. También se espera que los gobiernos a nivel mundial sigan apoyando el promover los autobuses eléctricos impulsando de esta manera el crecimiento de energías limpias y disminuyendo la contaminación causada por las emisiones de los autobuses convencionales (Bloomberg, 2020).

Los países bajos, Reino Unido, Francia, Polonia y Alemania representan la mitad del número total de autobuses eléctricos en Europa. La mitad de los autobuses eléctricos provienen de las fábricas BYD, VDL y Solaris (Grütter, 2015; Sanín, 2016; Zumba & Moreno Cordero, 2017)

El comité de medio ambiente del Parlamento Europeo está impulsando un enfoque más fuerte, respaldando un objetivo de ventas que requiere que los fabricantes de autobuses vendan 50% de autobuses urbanos con cero emisiones para el 2025 y 75% para el 2030. Reduciendo así las emisiones de los Gases Efecto Invernadero (GEI) en un 40% en 2030 y para el 2050 en un 80% (Álvarez Pelegry & Menéndez Sánchez, 2017) (Rojas García, 2012).

El Ecuador actualmente se tiene en circulación taxis eléctricos en la ciudad de Loja y autobuses eléctricos en la ciudad de Guayaquil de la fabricante china BYD. Guayaquil, la segunda ciudad más poblada del país, se encuentra en la primera etapa circulando 6 unidades debido a que aún están en desarrollo las bases del concurso para la construcción de una electrolinera en el Parque Samanes.

2.2. Mecanismo del autobús eléctrico.

Los componentes principales del autobús eléctrico son el diseño de carrocería, sistema de propulsión eléctrica, accesorios de alimentación y la carga de la batería (G. G. G. I., 2016).

La carrocería es importante para determinar los coeficientes de balanceo para optimizar el rendimiento del autobús. Las variables que intervienen son área frontal (A_f), coeficiente de arrastre (K), coeficiente de rodadura (f_r), peso y capacidad de pasajeros (C_a).

El sistema de propulsión eléctrica de un autobús eléctrico consta de un sistema mecánico, eléctrico y de control. El sistema mecánico contiene la dinámica longitudinal como la transmisión diferencial y los neumáticos. La parte eléctrica contiene un motor eléctrico, el inversor y la batería. La unidad de control contiene el regulador un par motor y los frenos, según la velocidad de entrada del vehículo.

El tren de potencia consiste en que la batería transforma la energía electroquímica almacenada y alimentada al motor, inversor y a la regeneración de la energía provocando un cambio de energía mecánica en energía eléctrica.

Para el tren de potencia se deben conocer los parámetros del autobús y parámetros ambientales; así como los datos necesarios del motor eléctrico como las curvas de potencia y eficiencia. El desempeño del tren de potencia debe satisfacer características básicas como el par de arranque, baja velocidad en una pendiente, confiabilidad y temperatura.

El motor eléctrico más utilizado y adecuado es el motor de inducción el cual es la simplicidad, fiabilidad, bajo mantenimiento en comparación con el motor de imanes permanentes. Para el sistema de transmisión (AMT) el cual une las dos tecnologías el sistema de automatización con el sistema manual produce que no se necesite embrague ocasionando que la caja de cambios se encargue de las marchas de acuerdo con las necesidades del autobús. El consumo de energía se reduce en un 9% comparado con la transmisión automática a una caja de cambios normal (Am, Latina, Caribe, Para, & Colaboraci, 2018; G. G. G. I., 2016; Landerl, 2017).

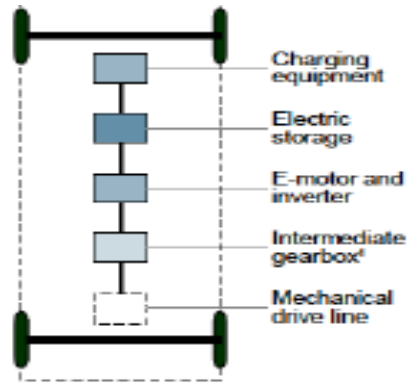


Fig. 1 Diagrama de un autobús eléctrico
Fuente: (Osse, 2015).
Elaborado por: (Osse, 2015).

En los accesorios de alimentación influye el diseño de los componentes para determinar las necesidades del rendimiento del ciclo de conducción que a su vez se ven afectados por la temperatura de funcionamiento, tamaño y peso (G. G. G. I., 2016). En los sistemas de almacenamiento de energía se utiliza almacenamiento por baterías los cuales dependen de la durabilidad, costos, sostenibilidad ambiental y desempeño.

2.3. Baterías para vehículos eléctricos.

La batería consta de dos electrodos, un ánodo y un cátodo en donde se integra un material dominante, el mismo que permite el almacenamiento de la energía eléctrica en energía química. Las baterías para autobuses eléctricos que se comercializan son de níquel-cadmio y las de ion-litio, siendo las de ionlitio las que tienen mayor uso debido a su densidad de energía.

2.4. Batería a Base de Níquel.

Se componen de níquel-cadmio (Ni-Cd), Níquel Zinc (Ni-Zn) e Hidruro metálico de níquel (Ni-MH). El cátodo está en todas las variantes de hidróxido de níquel y estos tienen hidróxido de potasio como el electrolito. El ánodo es una aleación de cadmio, Zinc y metal complejo. Estas baterías tienen una mejora frente al plomo-ácido pero debido a la toxicidad del Cadmio se está eliminando a nivel mundial. La batería de Hidruro metálico de níquel (Ni-MH) muestra una

mejora respecto a la Ni-Cd por mayor vida útil del ciclo y mayor velocidad de descarga ayudando de esta manera al medio ambiente.

Un sistema de Ni-Zn muestra un buen rendimiento en términos de voltaje de celda, capacidad de almacenamiento de carga, pero sufre de crecimiento de dendritas en el ánodo Zn durante el ciclo. Esto causa cortocircuitos internos y pérdida de material con el tiempo (Álvarez Pelegry & Menéndez Sánchez, 2017).(Zumba & Moreno Cordero, 2017).

2.4.1. Batería de Ion-Litio.

Las baterías de ion-litio son las más utilizadas por vehículos eléctricos. Tienen un cátodo compuesto por litio y óxidos fosfatos de metales de transición. El ánodo está basado por carbono y un electrolito compuesto por solventes orgánicos con sales de litio. El avance de las investigaciones en baterías sobre materiales electrolíticos compatibles con alto voltaje es crucial para una aplicación más segura y un mejor rendimiento de las baterías. Estas baterías tienen una potencia específica de 300W/kg, una densidad de energía de 85-200Wh/kg. Tienen un bajo peso y alta resistencia a las temperaturas soportando ciclos de carga y descarga entre 1000-1500 (Tamayo Jiménez, 2018)(Erazo Almeida & Peralvo, 2016).

Los fabricantes recomiendan que una batería funcione entre 10°C y 30° C para lograr una vida útil más larga. Los principales retos para los sistemas de Baterías de Ion Litio (LIB) son poseer una energía específica muy elevada y ofrecer un alto rendimiento a elevadas temperaturas. (Pardo, 2018).

Las baterías que se están utilizando para los nuevos autobuses BYD son de Ion-Litio hierro-fosfato Fe con un tiempo de carga entre 2 y 4 horas con una autonomía alrededor de 180-200Km. Tienen una capacidad de energía almacenada de 300KWh (“Infografías.cl | Desarrollo en información visual - Buses Eléctricos BYD,” 2017).

2.5. Sistema de carga.

La infraestructura de carga transfiere la energía eléctrica a la batería del autobús. En la actualidad el continente asiático cuenta con aproximadamente 5000 estaciones de recarga, Europa posee 4500 estaciones de recarga y América tiene 600 estaciones de recarga. Los sistemas de carga existentes son de tipo conductiva e inductiva.

La conductiva requiere una conexión física entre el autobús eléctrico y la estación de carga. Todos los sistemas utilizan actualmente la tecnología conductora. Los autobuses que tengan paradas largas pueden usar las cargas de oportunidad. Estas cargas son capaces de mejorar las limitaciones de autonomía que tienen los autobuses eléctricos, reduciendo el tamaño de las baterías disminuyendo el peso (Miles & Potter, 2014; Zumba & Moreno Cordero, 2017).



Fig. 2 Autobús eléctrico K9G.

Fuente: (Telégrafo, 2019)

Elaborado por:(Telégrafo, 2019).

2.6. Freno Regenerativo.

El sistema de frenado regenerativo se aplica en los autobuses eléctricos para mejorar la eficiencia de recuperación de energía. La recuperación de energía es del 50%. Para el modelo matemático de los autobuses eléctricos se utiliza una recuperación del 0.5 (Alegre Buj, 2017).

Tabla 1. Especificaciones del autobús eléctrico.

| | |
|---------------------------------------|---|
| Marca | BYD |
| Modelo | K9G |
| Peso bruto vehicular, Kg. | 19500 |
| Dirección | Asistida hidráulica controlado electrónicamente. |
| Velocidad Max, Km/h. | 90 |
| Potencia, kW. | 300 |
| Área del vehículo, Kg. | 8.5 |
| Capacidad de pasajeros | De pie: 49 Sentados:31+1 chofer. |
| Capacidad de energía almacenada, kWh. | 276 |
| Tipo | Motor en llanta sin caja de cambios |

Fuente:(BYD AUTO, 2017).
Elaborado por: Autora.

CAPITULO 3.
AUTOBUSES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

3. Autobús de combustión interna a diésel.

En la actualidad en el Ecuador circulan más de 26.251 autobuses los mismos que funcionan con motor a diésel. El transporte público tiene motores de combustión interna los mismos que son máquinas a presión constante en la cual se obtiene trabajo mediante la combustión de una determinada cantidad de combustible. Un motor diésel usa combustible inyectado de forma pulverizada dentro de los cilindros, los cuales contienen aire comprimido a temperaturas altas. La temperatura del aire debe ser lo suficientemente alta como para permitir la ignición de las partículas del combustible inyectado. Este es el método empleado para realizar la ignición en los motores a diésel (Braun, Pumarino, & Tolvet, 2016; Higuera, ER, & León Cárdenas, 2019).

Los niveles de contaminación que provoca los autobuses a diésel aumentan si las unidades que circulan no cumplen con la norma de emisión vigente. En el Ecuador actualmente se tiene la norma Euro III vigente para autobuses con motor a diésel (EMBARQ, 2013; MT, 2014; Ortiz, 2014).

3.1. Fases de funcionamiento.

El motor a diésel funciona por la quema del combustible al ser inyectado en una cámara de combustión que contiene aire con temperatura superior a la temperatura de autocombustión. El principio de funcionamiento tiene cuatro fases. La primera absorbe el aire hacia la cámara de combustión. La segunda fase es la compresión del aire al comprimirse a una fracción mínima del volumen original calentándose a una temperatura de hasta 440°C. El resultado es la mezcla que se quema ocasionando que el gas contenido en la cámara se expanda y sea impulsada hacia el pistón. La biela transmite este movimiento al cigüeñal cambiando el movimiento lineal del pistón en un movimiento de rotación y la cuarta fase es la expulsión (Castillejo & Tutor, 2014; Puertas, Proaño, & Martínez, 2018; Yolanda, Morales, & Guzmán, 2014).

3.2. Sistema de inyección de diésel.

En la combustión es necesario inyectar la cantidad adecuada de combustible en la cámara de combustión donde se encuentra el aire comprimido. El combustible debe ser inyectado en la cámara de combustión de forma correcta ya que el funcionamiento de un motor Diésel depende de una inyección correcta.

Las condiciones ideales que debe tener la inyección de combustible es el suministro a cada cilindro la cantidad de combustible adecuada en base a las marchas del motor. La combustión debe realizarse de manera correcta y por completo variando el punto de inyección a medida que el régimen del motor y las condiciones de carga varíen.

La bomba de inyección es la encargada de dar combustible a cada inyector con una presión precisa y en el momento adecuado. La presión determina la condición de funcionamiento del motor y los inyectores pulverizando el combustible en el interior de las cámaras sobre aire comprimido (Martinez., 2007; Pacheco, 2007; PAZARLAMA, 2007).

3.3. Sistema de alimentación motor diésel.

Este sistema es necesario para el funcionamiento del circuito de inyección de alta presión y el circuito de baja presión. El circuito de alta presión impulsa combustible a alta presión y finamente pulverizada para llegar a las cámaras de combustión. El circuito de baja presión es el encargado de enviar el combustible desde el depósito hacia la bomba de inyección. El circuito quedaría formado por el depósito de combustible, la bomba de alimentación, filtro, bomba de inyección y los inyectores (Lima & Galvez, 2016; Mi, Stanojevic, & Vasic, 2018; Yolanda et al., 2014).

3.4. Filtrado de combustible.

Su principal función es proteger al motor y sistema de inyección de las impurezas que no se eliminan por completo en el proceso de destilación. Las impurezas suelen estar constituidas principalmente por residuos de combustión, en forma de partículas muy duras. La densidad de las partículas como polvo y arena les permite quedarse en el líquido por cierto tiempo. El filtro de combustible se encuentra entre la bomba de alimentación y la de inyección.

El elemento filtrante suele estar constituido por una especie de cartucho de papel poroso de celulosa especial. Tiene la propiedad de absorber el agua que pueda contener el combustible, procedente de la condensación que puede atacar a las superficies metálicas del sistema de inyección, oxidándolas y deteriorándolas (Bosch, n.d.; Higuera et al., 2019).

Los cartuchos se deben reemplazar periódicamente cada 15.000Km. La eficiencia de los motores diésel en comparación con los de gasolina supera un 40%. Se debe realizar cuidados periódicos los cuales deben ser frecuentes para evitar la contaminación del medio ambiente y el deterioro del autobús.

3.5. Ralentí

El ralentí es la capacidad de funcionamiento de un motor de combustión interna sin la necesidad de una ayuda externa. El autobús puede mantenerse en marcha o pisando el embrague. Los autobuses de combustión interna en las bajas desgastan el 10% de energía al momento de frenar. Para la realización del modelo matemático se utiliza el 0.1 en los autobuses de combustión interna.(Higuera et al., 2019).



Fig. 3 Autobús de combustión interna Mercedes Benz.
 Fuente: ("Buses-UTPL.png (799×419)," 2012).
 Elaborado por: ("Buses-UTPL.png (799×419)," 2012).

Tabla 2. Especificaciones técnicas de motores a Diesel.

| Marca | Mercedes Benz |
|---------------------------|----------------------------------|
| Modelo | 1721 |
| Peso bruto vehicular (Kg) | 17000 |
| Dirección | Hidráulica |
| Velocidad Max, Km/h. | 90 |
| Potencia, kW. | 155 |
| Área del vehículo, Kg. | 8.5 |
| Capacidad de pasajeros | 81 |
| Tipo | Motor con caja de cambios |

Fuente: (Mercedes Benz 1721_Ficha Técnica, 2013)
 Elaborado por: Autora.

CAPITULO 4.
DINÁMICA VEHICULAR

4. Dinámica Vehicular.

4.1. Modelo matemático.

El modelo matemático se crea a partir de la dinámica de vehículos, el porcentaje de las pendientes en las rutas y la velocidad establecida según la ordenanza de la ciudad de Loja.

4.2. Dinámica de los vehículos.

La dinámica de vehículos es el movimiento de traslación descrito en función de las velocidades del sistema con respecto al vehículo. El diseño de la carrocería tiene una importancia en la calidad de su aerodinámica. La estabilidad y adherencia dependen directamente de la forma de su carrocería. En vehículos pesados la mejora de la aerodinámica supone también la reducción de las emisiones de CO₂ y otras sustancias perjudiciales para el medio ambiente (INEN, 2010)(*RTE_INEN_039_10*, 2010).

Los fabricantes de autobuses mejoran su fabricación de vehículos con una resistencia aerodinámica cada vez menor que se traduce en la reducción de los coeficientes de arrastre. La forma ideal es un aproximado de 0.1 para el caso de flujo turbulento. Sin embargo, se modifican y cambian su valor por la intervención de varios componentes como ruedas, espejos, ejes y rejillas (Montero, Vladimir francisco galindo, Vélez Loaiza, 2016).

Los coeficientes de arrastre promedio de los automóviles se acortaron, de 0.70 a 0.30 como resultado de las mejoras en la aerodinámica y la forma de los automóviles. En los autobuses el coeficiente de arrastre puede reducirse mediante el redondeo de los contornos frontales y posteriores mientras se mantenga la longitud global del vehículo (Diaz Marín, 2017).

4.3. Resistencias y Fuerzas.

La aplicación de la fuerza necesaria para desplazarse se opone al avance del vehículo. La suma total de dichas resistencias da como resultado la Fuerza en rueda. Las resistencias permiten calcular el consumo del automóvil, independiente del combustible que se utilice.

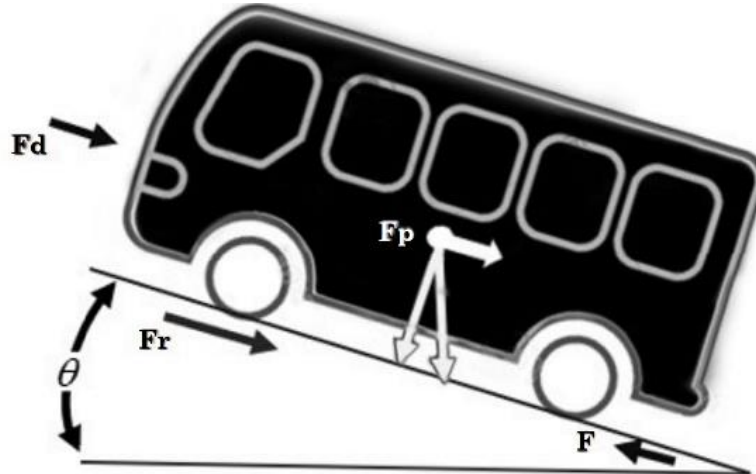


Fig.4 Dinámica Vehicular (D., 1992)(Ramírez Morales, 2017).
Fuente: (D., 1992)(Ramírez Morales, 2017).
Elaborado por: Autora.

Fuerza de arrastre.

La relación dentro del cálculo de fuerza en rueda del vehículo ha llevado a los diseñadores a elaborar modelos capaces para disminuir el impacto a la resistencia sobre el vehículo. El consumo de energía, ruido y dureza se ven afectados por las reacciones aerodinámicas. La fuerza de arrastre depende del coeficiente de arrastre del vehículo varía desde 0.7 hasta 0.49 según simulaciones realizadas sobre diferentes calzadas. El valor que se va a tomar en cuenta para autobuses es de 0.7 (Aguirre Gómez, 2009; Diaz Marín, 2017).

La fuerza de arrastre (F_a) es la multiplicación del coeficiente de arrastre (K), la densidad del aire (ρ_a), área frontal del autobús (A_f) y la velocidad (V). La fuerza de arrastre depende de la velocidad a la cual se desplaza el autobús.

Para la elaboración del modelo se utiliza el software Matlab/Simulink, el mismo que consta de 4 entradas Carga, Velocidad, Pendiente y distancia

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \rho_a \cdot Af \cdot V^2 \quad \text{Ec. 1}$$

Tabla 3. Fuerza de arrastre.

| Simbología | Significado | Unidad |
|------------|--------------------------|------------|
| F_a | Fuerza de arrastre | N |
| K | Coefficiente de arrastre | Constante |
| ρ_a | Densidad del aire | Kg / m^3 |
| Af | Área frontal del autobús | m^2 |
| V | Velocidad | m/s |

Fuente: (Diaz Marín, 2017).
Elaborado por: Autora.

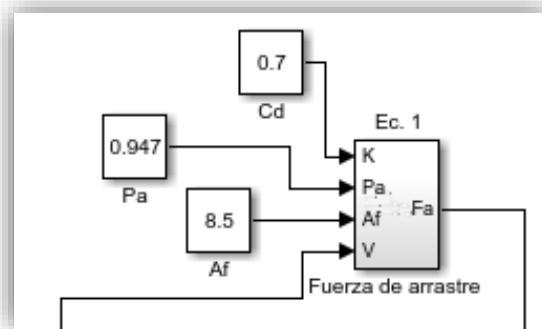


Fig. 5 Fuerza de arrastre.
Fuente: Autora.
Elaborado por: Autora.

4.4. Velocidad.

En la ciudad de Loja, las calles céntricas y secundarias de la urbe la velocidad máxima será de 50Km/h para vehículos livianos y 40Km/h para vehículos pesados y de transporte público. En las avenidas de articulación para automotores de transporte de pasajeros será de 50Km/h y en vías de acceso rápido será de 60K/h (Municipio, 2017). En base a la actualización de la ordenanza se estableció un límite promedio de 35km/h para transporte público.

4.4.1.1. Fuerza de pendiente.

La fuerza debida a la pendiente es una fuerza adicional que se opone cuando el autobús se desplaza de forma ascendente, su fuerza depende del peso del autobús y del perfil de la calzada. Es decir, cuando la pendiente es positiva la fuerza de la pendiente aumenta. Cuando la pendiente es 0 no existe fuerza de pendiente y cuando la pendiente es descendente los valores son negativos; sin embargo, en los autobuses a combustión sigue desgastando energía llamada ralentí su desgaste es del 0.1. En los autobuses eléctricos se recupera un 0.5 por sus frenos regenerativos.

$$F_p = C.g.\sin\theta \quad \text{Ec. 2}$$

Tabla 4. Fuerza de resistencia a la pendiente.

| Simbología | Significado | Unidad |
|--------------|----------------------|-----------|
| F_p | Fuerza de pendiente. | N |
| C | Peso del autobús. | Kg |
| g | gravedad | m / s^2 |
| θ / P | pendiente | % |

Fuente: (Diaz Marín, 2017).

Elaborado por: Autora.

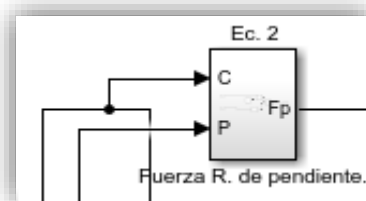


Fig. 6 Fuerza de pendiente.

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

4.4.1.2. Fuerza de rodadura.

La fuerza que resiste al movimiento del autobús que se desliza sobre una superficie denominada fuerza de rodadura. Esta depende de la fuerza normal sobre la huella de la llanta a velocidades bajas. La resistencia de rodadura Ec. 4 es menor a la fuerza de arrastre uno de los factores que influyen es el coeficiente de rodadura y el efecto de la pendiente sobre el peso.

$$F_r = f_r \cdot C \cdot g \cdot \cos \theta \quad \text{Ec. 3}$$

Tabla 5. Resistencia a la rodadura.

| Simbología | Significado | Unidad |
|--------------|--------------------------|--------------|
| F_r | Resistencia de rodadura | N |
| f_r | Coeficiente de rodadura. | Adimensional |
| C | Peso del Autobús | Kg |
| g | Gravedad | m / s^2 |
| θ / P | Pendiente | % |

Fuente: (Diaz Marín, 2017).
Elaborado por: Autora.

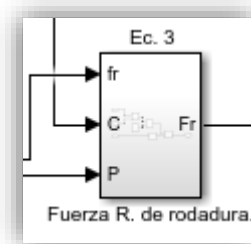


Fig. 7 Fuerza de rodadura.
Fuente: Autora.
Elaborado por: Autora.

4.4.1.3. Fuerza total del Autobús.

La fuerza total es la suma de la fuerza de arrastre, fuerza de pendiente y la fuerza de rodadura. La fuerza cambia dependiendo del tipo de vehículo, condiciones atmosféricas y tipo de carretera.

$$F = F_a + F_p + F_r \quad \text{Ec.4}$$

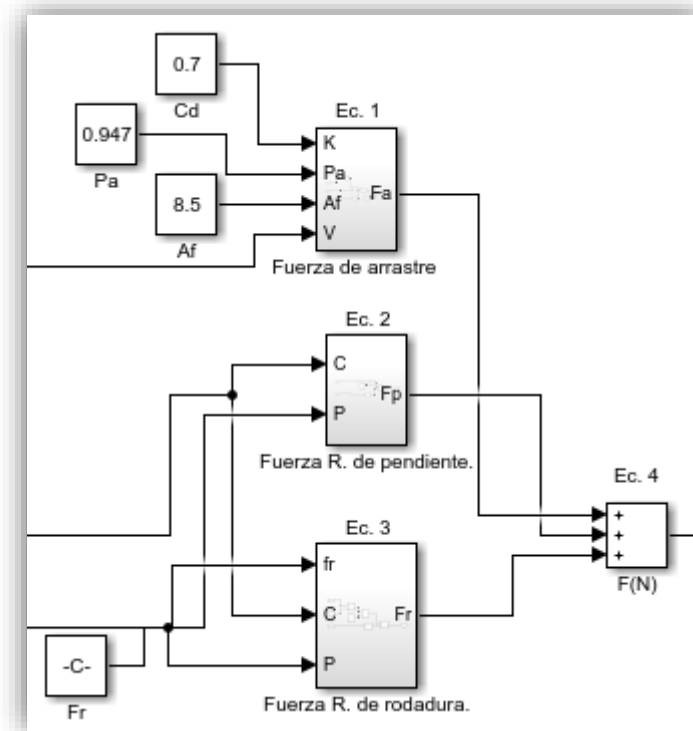


Fig. 8 Fuerza total del Autobús.

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

Para obtener la potencia necesaria se realiza la multiplicación de la Fuerza (F) por la velocidad (V) Fig. 9 y para obtener la energía se multiplica por la distancia.

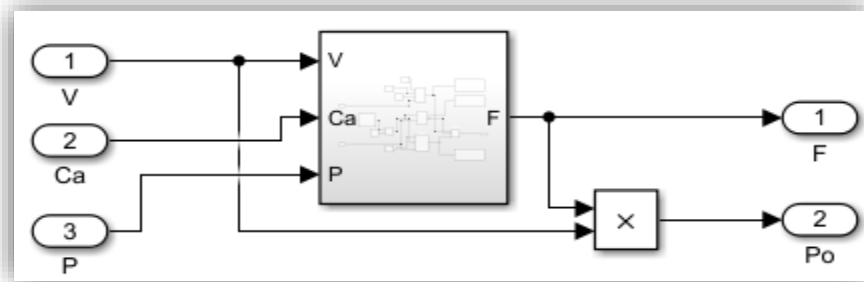


Fig. 9 Bloque de fuerza y potencia.
Fuente: Autora.
Elaborado por: Autora.

4.5. Parámetros.

4.5.1. Parámetros del Autobús.

El autobús fue diseñado para transporte urbano e interurbano con trayecto fijo. Dentro de las características se derivan el coeficiente de arrastre (K), Coeficiente de rodadura (f_r) Área frontal del Autobús (A_f) y el peso del autobús (C).

4.5.2. Coeficiente de arrastre.

El coeficiente de arrastre varia dependiendo de la forma del vehículo y de la aerodinámica. Para los autobuses y camiones el coeficiente puede modificarse y redondearse cuando se optimiza los contornos frontales y posteriores mientras se mantenga la longitud global del vehículo. Para calcular el coeficiente de arrastre se realiza mediante la curva experimental.

Para valores de resistencia aerodinámica el coeficiente para varios tipos de vehículos se toma en cuenta el valor descrito en la Tabla 6 (J.Y, 2012).

Tabla 6. Coeficientes de tipos de vehiculos.

| Tipo de vehículo | Coeficiente de arrastre. |
|-------------------------------|--------------------------|
| Carros de pasajeros | 0.3-0.52 |
| Furgonetas | 0.4-0.58 |
| Autobuses | 0.5-0.8 |
| Tractor-semirremolques | 0.65-1.1 |
| Camiones-remolques | 0.74-1.0 |

Fuente: (J.Y, 2012).

Elaborado por: Autora.

4.5.2.1. Coeficiente de rodadura.

La resistencia a la rodadura es un factor adimensional que expresa los efectos de las propiedades físicas del neumático, temperatura del neumático y tiene efectos significantes en la resistencia experimentada. Existen varias fórmulas para calcular el coeficiente de resistencia a la rodadura dependiendo de la presión de inflado, la velocidad, la temperatura, el material y el diseño.

Para datos más precisos se puede utilizar las siguientes fórmulas que a través de datos experimentales realizado para autobuses, camiones de capas radiales y cargas nominales puede ser calculado a través de la ecuación Ec. 5 o Ec.6. (J.Y, 2012; Montero, Vladimir francisco galindo, Vélez Loaiza, 2016).

$$f_r = 0.0136 + (0.40 \times 10^{-7})(v^2) \quad \text{Ec. 5}$$

Para el neumático de camión diagonal.

$$f_r = 0.0136 + (0.40 \times 10^{-7})(v^2) \quad \text{Ec. 6}$$

El coeficiente de rodadura de los neumáticos de camiones suele ser inferior al de los neumáticos de turismos en superficies de las carreteras. La presión del inflado influye en llantas de camiones. Los valores promedios para (f_r) para diferentes tipos de neumáticos sobre diferentes superficies se resumen en la tabla 7.

Tabla 7. Coeficiente de rodadura.

| Superficie de carretera | | Coeficiente de rodadura |
|-------------------------------|--|-------------------------|
| Llantas de auto | | |
| Asfalto de hormigón | | 0.013 |
| Grava rodada | | 0.02 |
| Tarmacadam | | 0.025 |
| Carretera sin asfaltar | | 0.05 |
| Campo | | 0.1-0.35 |
| Neumáticos de camiones | | |
| Hormigón/Asfalto | | 0.0098 |

Fuente: (J.Y, 2012).

Elaborado por: Autora.

El área frontal del autobús y la masa del mismo son valores adquiridos del catálogo del fabricante. Para este trabajo se toma en cuenta el autobús mercedez Benz 2012(*Mercedez Benz 1721_Ficha Técnica*, 2013) y BYD K9G (BYD, 2017). Para el peso del autobús se toma en cuenta tres escenarios tablas 8 y 9.

Tabla 8. Pesos del autobús de combustión interna.

| Peso del autobús a Diesel | | |
|---------------------------|-------|---------------|
| PAV, Kg. | 17000 | sin pasajeros |
| Media Carga, Kg. | 19870 | 41 pasajeros |
| Carga Completa, Kg. | 22670 | 81 pasajeros |

Fuente: Autora

Elaborado por: Autora

Tabla 9. Pesos del autobús eléctrico.

| Peso del autobús Eléctrico | | |
|----------------------------|-------|---------------|
| PAV, Kg. | 19500 | sin pasajeros |
| Media Carga, Kg. | 22370 | 41 pasajeros |
| Carga Completa, Kg. | 25170 | 81 pasajeros |

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

4.6. Parámetros ambientales.

4.6.1. Densidad del aire.

La densidad depende de la temperatura del aire y la presión atmosférica. Para determinar la densidad del aire se resuelve la ecuación de estado de gas ideal. Ec. 7 (Landi Degl’Innocenti & Landi Degl’Innocenti, 2019). La densidad (ρ_a) se expresa en masa sobre volumen, por tanto, al desarrollar la ecuación en función de la presión atmosférica (P), constante universal de los gases ideales(R) y la temperatura (T) quedando como ecuación final la Ec. 8.

$$Pv = mRT \quad \text{Ec. 7}$$

$$\rho_a = \frac{P}{RT} \quad \text{Ec. 8}$$

Los datos obtenidos para la ciudad de Loja se tomaron de la estación Loja-La Argelia (“Red de Estaciones Automáticas | INAMHI,” 2019) dando como resultado tabla 10.

Tabla 10. Densidad del aire.

| Datos | | Unidades | |
|----------|-------|--------------------------------|-------------------------|
| ρ_a | 0.947 | Densidad del aire | Kg / m^3 |
| P | 78.96 | Presión atmosférica | kPa |
| R | 0.287 | Constante de los gases ideales | $kPa.m^3 / Kg^{\circ}K$ |
| T | 17.15 | Temperatura | $^{\circ}K$ |

Fuente: (“Red de Estaciones Automáticas | INAMHI,” 2019).
Elaborado por: Autora.

4.6.2. Validación del MMA.

En base a lo antes mencionado se desarrolló dos subsistemas para determinar la energía de los autobuses. El primer subsistema se lo utiliza para las pendientes y el segundo subsistema para bajadas tanto del autobús eléctrico como el autobús de combustión interna.

Si E_E es negativa se multiplica por 0.5 mientras que si E_C es negativa su valor se vuelve constante por el valor del ralentí del 0.1.

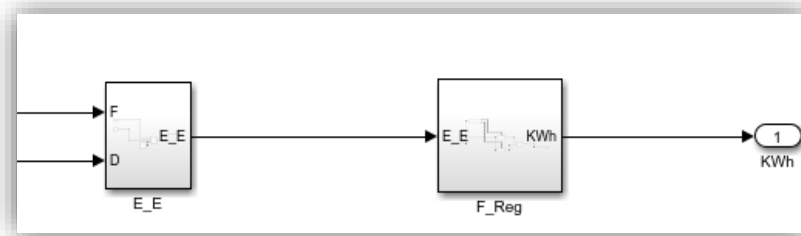


Fig. 10 Sistema del freno regenerativo.

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

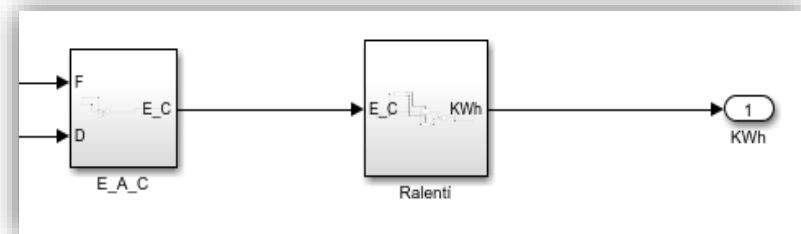


Fig. 11 Sistema ralentí.

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

Tabla 11. Cálculo de la pendiente.

| Pendiente | Autobuses | Carga | Catálogo | MMA |
|-----------|---------------|----------|------------|------------|
| 0 | Eléctrico BYD | Completa | 1.1 KWh/Km | 1.17KWh/Km |
| | Combustión | | - | 0.97KWh/Km |

Fuente: Anexos.

Elaborado por: Autora.

El modelo matemático realiza un proceso para los autobuses eléctricos, utiliza el sistema de freno regenerativo Fig. 10; el mismo que en bajadas se multiplica por 0.5 recuperando de esta forma energía en un recorrido. En el caso de los autobuses de combustión interna utiliza el sistema ralentí el mismo que se vuelve constante en las bajadas. El sistema final de validación se puede visualizar en la Fig. 12.

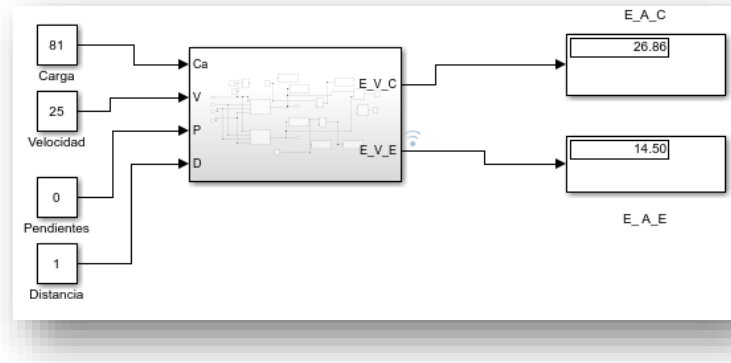


Fig. 12 Sistema MMA.
Fuente: Autora.
Elaborado por: Autora.

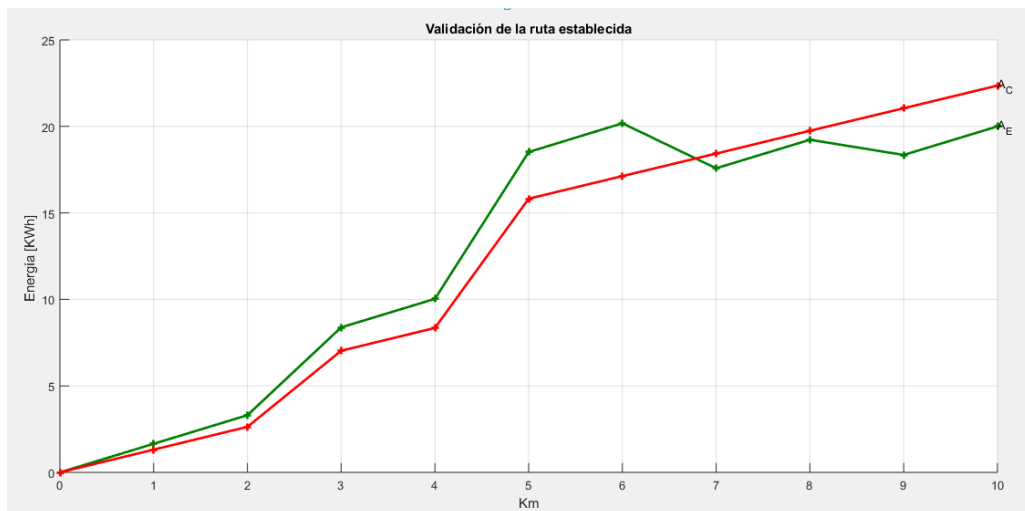


Fig. 13 Validación del modelo MMA.
Fuente: Autora.
Elaborado por: Autora.

Tabla 12. Validación del modelo MMA.

| Autobuses | Pendientes | | | | | | | | |
|-------------------------|------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 0.05 | 0 | 0.10 | 0 | -0.10 | 0 | -0.05 | 0 |
| Eléctrico /KWh | 1.17 | 5.77 | 6.94 | 14.95 | 16.12 | 13.29 | 14.46 | 13.33 | 14.50 |
| Combustión / KWh | 0.97 | 5.02 | 5.99 | 22.2 | 23.17 | 24.05 | 25.02 | 25.9 | 26.86 |

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

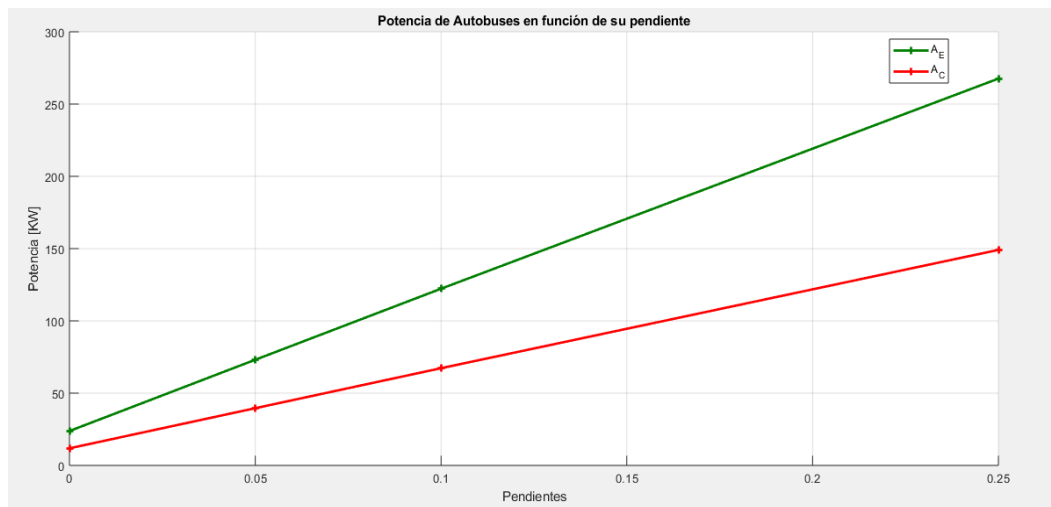


Fig. 14 Validación de la potencia del modelo MMA.

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora

Tabla 13. Cálculo de la potencia.

| Autobuses | Pendientes | | | |
|------------------------|------------|-------|--------|--------|
| | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.25 |
| Eléctrico, kW. | 23.80 | 73.10 | 122.25 | 267.60 |
| Combustión, kW. | 11.84 | 39.59 | 67.26 | 149.1 |

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

Tabla 14. Arrancabilidad en pendiente.

| Autobuses | Pendiente | Catálogo | MMA. |
|--------------------|-----------|----------|------------|
| Eléctrico | 0.25 | 300 kW | 267.60 kW. |
| Combustión Interna | | 155 kW | 149,1 kW. |

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

El modelo cumple con las normativas de los autobuses de los catálogos Tabla 14. En la tabla 11. se puede observar que con una pendiente de 0% el modelo matemático cumple con los valores del catálogo del autobús eléctrico. La gráfica de la figura 13. Muestra una ruta establecida para su validación, así mismo; los valores se pueden visualizar en la tabla 12. El autobús eléctrico utiliza menos energía que el autobús de combustión interna debido a que recupera energía en las bajadas por el sistema de freno regenerativo que tienen los autobuses eléctricos.

En la Fig. 14 se puede observar que el autobús eléctrico necesita mayor potencia que el autobús de combustión esto debido a la diferencia de peso de los autobuses. En la tabla 14. se puede visualizar que ambos autobuses cumplen con la norma de arrancabilidad en pendientes.

Para validación de la potencia se realiza una comparación con los catálogos de los autobuses y los datos obtenidos mediante el modelo matemático realizado. Se puede observar los datos de la tabla 14 en una pendiente de 0.25 el autobús eléctrico obtiene una potencia de 267.60 kW y el autobús de combustión interna tiene 149.1 kW.

4.7. Pendiente.

Los valores de las pendientes como se expresa en la sección 1.5 se utiliza los valores que expresa la norma NTE INEN 1668 (Norma INEN 1668, 2016). Se utiliza un mínimo del 0% hasta un máximo del 15%. Para mayor exactitud se utiliza el levantamiento mediante Google Earth para determinar los valores de las pendientes de la ruta UTPL-Emiliano Ortega y de la ruta UTPL-Solca-Pitas.

CAPITULO 5.
CASOS DE ESTUDIO.

En este capítulo se utiliza un caso de estudio en base a las ecuaciones mencionadas en el capítulo 4 para determinar la energía utilizada de los autobuses en función de los valores de entrada como la carga, velocidad del autobús, pendiente y distancia. Los parámetros de operación se definen en los parámetros del vehículo y parámetros ambientales obteniendo la fuerza necesaria para determinar la energía y el rendimiento de los autobuses.

Para la simulación se eligieron dos modelos de autobuses disponibles en el mercado y que cumplen con la NTE INEN 1668-2205 (INEN, 2010; Norma INEN 1668, 2016), el primero es el modelo K9G que pertenece a la marca BYD y el segundo es el autobús de combustión interna a diésel de la marca Mercedes Benz el mismo que se encuentra en UTPL.

5. Obtención de Resultados.

Los parámetros de los vehículos se detallan en la tabla 15, los valores de área frontal (K) y Coeficiente de rodadura (fr) se eligieron de acuerdo con la literatura revisada. Los otros valores son especificaciones de la ficha técnica de cada autobús.

Tabla. 15 Modelos de los autobuses.

| | BYD | Mercedes Benz |
|-------------------------------------|------------|----------------------|
| Masa (Kg) | 19500 | 17000 |
| Área frontal (m²) | 8.5 | 6.3 |
| K | 0.7 | 0.7 |
| fr | 0.0098 | 0.0098 |
| N° pasajeros | 81 | 81 |

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

Para la selección de ruta se tomo dos recorridos con mayor afluencia de pasajeros de la Universidad Técnica Particular de Loja. La ruta emiliano ortega y la ruta Solca salida y retorno. Las pendientes se seleccionaron en base a un aproximado de los porcentajes de cada una de las rutas con la utilización del perfil de elevación de Google Earth.

A continuación se muestra la ruta UTPL-Emiliano Ortega-UTPL. Los valores de pendientes en porcentajes son: 0, -2.5, -6.7, 4.1, -1.7 y 15. La Fig. 15 muestra el recorrido con carga completa dando como resultado 16.01 kWh del autobús eléctrico y 17.73 kWh del autobús de combustión interna. También se puede ver que en la tabla 16 se muestran los resultados en los tres escenarios con carga completa, media y en vacío. Se puede apreciar que durante las bajadas el autobús eléctrico recupera energía por los frenos regenerativos mientras que el autobús de combustión gasta un 10% de energía por el ralentí.

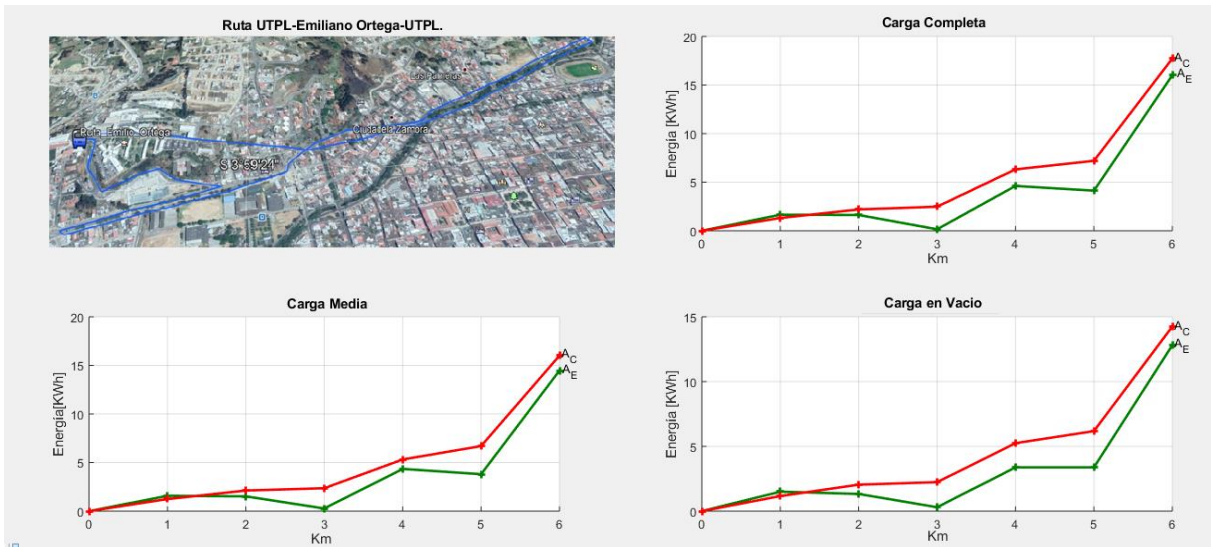


Fig. 15 Ruta UTPL – Emiliano ortega-UTPL.

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

Tabla 16. Ruta UTPL-Emiliano Ortega-UTPL.

| Pendientes | Autobús Eléctrico/ kWh. | | | Autobús de Combustión Interna/kWh. | | |
|---------------|-------------------------|-------------|----------------|------------------------------------|-------------|----------------|
| | Carga Completa | Carga Media | Carga en Vacío | Carga Completa | Carga Media | Carga en Vacío |
| 0 | 1.65 | 1.58 | 1.50 | 1.32 | 1.24 | 1.16 |
| -0.025 | 1.62 | 1.52 | 1.33 | 2.20 | 2.12 | 2.04 |
| -0.067 | 0.15 | 0.27 | 0.30 | 2.48 | 2.36 | 2.24 |
| 0.041 | 4.62 | 4.35 | 3.98 | 6.32 | 5.82 | 5.30 |
| -0.017 | 4.13 | 3.80 | 3.38 | 7.20 | 6.70 | 6.18 |
| 0.15 | 16.01 | 14.47 | 12.81 | 17.73 | 16.01 | 14.25 |

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

Para los vectores se tomó por kilómetro en base al perfil de elevación de la ruta trazada en Google Earth dando como resultado un estimado de 6 Km para la Ruta UTPL - Emiliano Ortega – UTPL (Fig. 15) y 8 Km para la ruta UTPL-Solca-UTPL (Fig. 16). Obteniendo como resultado que el autobús eléctrico necesita menos energía que el autobús de combustión interna.

A continuación, se muestra la Ruta UTPL- Solca-UTPL la misma que se obtuvo a través de Google Earth con pendientes de 0, -5.9, 11, -1.3, 1.2, -0.3, 3.7 y 0.15. El número de pasajeros se colocó en base a las tablas 8 y 9. La Fig. 16 muestra el recorrido antes mencionado y sus tres escenarios con carga completa, media y en vacío, donde se puede observar que el autobús eléctrico consume menos energía que el autobús de combustión interna. En la tabla 17 se puede apreciar los valores del consumo de energía de los autobuses y sus tres escenarios.

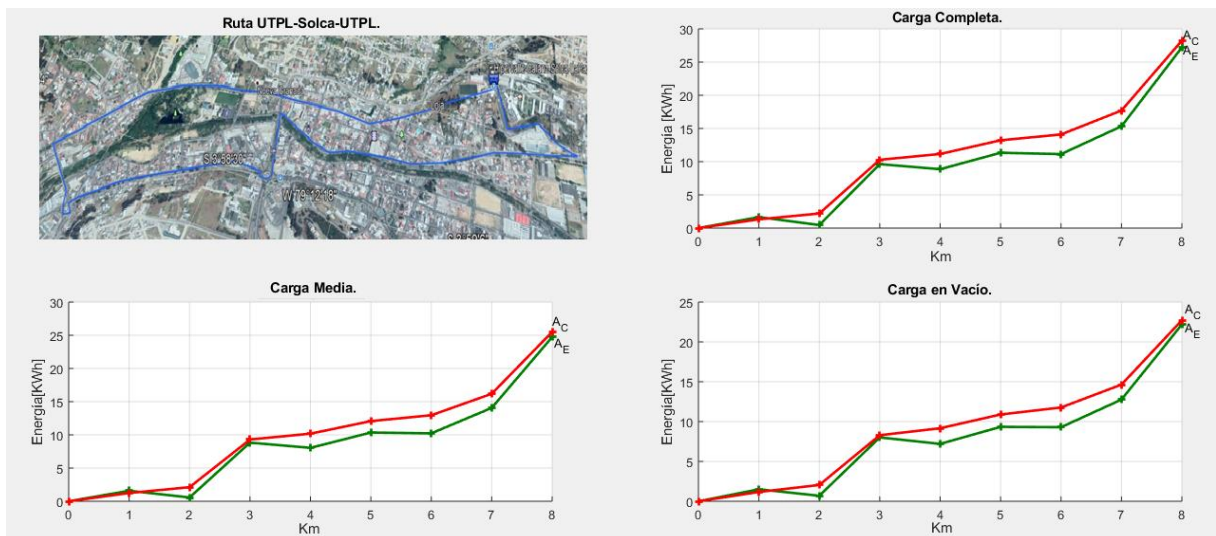


Fig. 16 Ruta-UTPL-Solca-UTPL.

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

Tabla 17. Ruta UTPL-Solca-UTPL.

| Pendientes | Autobús Eléctrico/ kWh. | | | Autobús de Combustión Interna/kWh. | | |
|-------------------|--------------------------------|-------------|----------------|---|-------------|----------------|
| | Carga Completa | Carga Media | Carga en Vacío | Carga Completa | Carga Media | Carga en Vacío |
| 0 | 1.65 | 1.58 | 1.50 | 1.32 | 1.24 | 1.16 |
| -0.059 | 0.46 | 0.57 | 0.68 | 2.20 | 2.12 | 2.04 |
| 0.11 | 9.63 | 8.83 | 8.01 | 10.28 | 9.30 | 8.28 |
| -0.013 | 8.87 | 8.04 | 7.20 | 11.16 | 10.18 | 9.16 |
| 0.012 | 11.34 | 10.35 | 9.34 | 13.22 | 12.07 | 10.89 |
| -0.03 | 11.14 | 10.23 | 9.30 | 14.10 | 12.95 | 11.77 |
| -0.037 | 15.33 | 14.06 | 12.76 | 17.70 | 16.19 | 14.64 |
| 0.15 | 27.21 | 24.73 | 22.19 | 28.23 | 25.50 | 22.72 |

Fuente: Autora.

Elaborado por: Autora.

CONCLUSIONES

Este trabajo permite disponer de un modelo matemático que nos permite determinar la energía de los autobuses en función de pendientes de ruta, velocidad y capacidad de pasajeros.

Se dispone de una herramienta que favorece el análisis y comparación del autobús de combustión interna con el autobús eléctrico en las mismas condiciones de carga.

Este trabajo facilita el desarrollo de estudios de factibilidad, emprendimientos basados en la implementación del transporte eléctrico en la ciudad de Loja.

Se concluye que el modelo matemático realizado se encuentra dentro del rango establecido en los catálogos de los autobuses. La potencia establecida en el catálogo del autobús eléctrico es de 300kW y en el autobús de combustión interna es de 155kW. El modelo matemático con carga completa da como resultado 267.60kW en el autobús eléctrico y 149.1 kW en el autobús de combustión interna.

Los autobuses eléctricos en bajadas recuperan el 0.5 de energía mientras que los autobuses de combustión gastan un 0.1 más de energía por el ralentí.

El autobús eléctrico con carga completa en la ruta UTPL-Emiliano Ortega-UTPL necesitaría 27.03 KWh del autobús eléctrico frente al 36.91KWh que necesita el autobús de combustión interna. En la ruta UTPL-Solca-UTPL el autobús eléctrico utilizaría 29.02 KWh mientras que el autobús de combustión necesita 34.58 KWh. Se puede apreciar en base a los datos obtenidos que el autobús eléctrico además de no contaminar necesita menos energía que los autobuses de combustión interna.

RECOMENDACIONES

Realizar un estudio técnico-económico para la implementación de autobuses eléctricos en la Universidad Técnica Particular de Loja.

Realizar un estudio para la implementación de estaciones de recarga eléctrica para autobuses en la ciudad de Loja.

Realizar estudios para implementación de paradas inteligentes con recargas de menor tiempo del estimado.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre Gómez, F. A. (2009). Vehículo Para La Competencia Eco-Shell. *Planta*.
- Alegre Buj, M. S. (2017). *Vehículo Eléctrico E Híbrido Paralelo Por Medio De Matlab/Simulink Y Planificación De Estaciones De Carga Mediante Sistemas De Información Geográfica*. 288. Retrieved from http://espacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:IngInd-Msalegre/ALEGRE_BUJ_Susana_Tesis.pdf
- Álvarez Pelegry, E., & Menéndez Sánchez, J. (2017). *Energías alternativas para el transporte de pasajeros - Orkestra Instituto Vasco de Competitividad*. Retrieved from <https://www.orkestra.deusto.es/es/investigacion/publicaciones/cuadernos-orkestra/1150-energias-alternativas-transporte-pasajeros>
- Am, A. E. N., Latina, R., Caribe, E. L., Para, O., & Colaboraci, L. A. (2018). *Movilidad eléctrica*:
- Asamblea Nacional, R. E., & Barrazueta, H. P. (2019). *Ley orgánica de eficiencia energética*. Quito.
- Astudillo B., Romulo Fernando, Cordero, D. (2016). *Obtención de ciclos de conducción para la flota de buses urbanos del cantón Cuenca*. 15–18.
- Autobuses eléctricos | Servicio Bloomberg Professional. (2018). Retrieved March 4, 2020, from <https://www.bloomberg.com/latam/blog-que-el-uso-de-vehiculos-convencionales-se-desvanece/>
- Bloomberg. (2020). Electric Bus Market by 2026. Retrieved March 4, 2020, from <https://www.bloomberg.com/press-releases/2020-01-30/electric-bus-market-to-reach-291-thousand-units-by-2026-need-to-control-carbon-emissions-to-augment-growth-of-e-bus-industry>
- Bosch, F. (n.d.). *Filtros Bosch . Protección eficiente Introducción*. 1–16.
- Braun, R., Pumarino, M., & Tolvett, S. (2016). *Motores Diesel : Tecnologías Para Su Futuro*. (August 2016).
- Buses-UTPL.png (799x419). (2012). Retrieved February 20, 2020, from <https://i1.wp.com/lojacity.com/wp-content/uploads/2012/09/Buses->

UTPL.png?ssl=1

- BYD. (2017). *Byd Electric Vehicles*. Retrieved from http://www.theicct.org/sites/default/files/BYD_EV_SEDEMA.pdf
- BYD AUTO. (2017). *Especificaciones Técnicas BYD K9G*.
- Castillejo, A., & Tutor, C. (2014). *TFG. Alejandro Castillejo Calle*.
- Ckd, E., & Ckd, E. (2018). *MODIFICATORIA 2 PASAJEROS INTRAPROVINCIAL*.
- CONELEC, P. M. D. E. (2014). PLAN MAESTRO DE ELECTRIFICACIÓN II. In *Estudio y gestión de la demanda eléctrica*.
- D., G. T. (1992). Fundamentals of Vehicle Dynamics. In *Fundamentals of Vehicle Dynamics* (pp. 1–93).
- Diaz Marín, E. (2017). *Análisis del comportamiento aerodinámico de un autobús en condiciones de viento frontal*. 87. Retrieved from http://oa.upm.es/52980/1/TFG_EDUARDO_DIAZ_MARTIN.pdf
- EMBARQ. (2013). Emisiones de escape de autobuses de transporte público. *Creative Commons*, 1–31.
- Erazo Almeida, C., & Peralvo, A. (2016). *Análisis y diseño de una eléctrolinera para autos eléctricos*. 4–30.
- Francisco, A. R. L. (2018). Estrategias para la reducción de gases de efecto invernadero en el sector del transporte en España. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- G. G. G. I. (2016). Electric Buses in India-Technology. *Electric Buses in India: Technology, Policy and Benefits, GGGI, Seoul, Republic of Korea, August*, 82.
- Grütter, J. (2015). *Rendimiento Real de Buses Híbridos y Eléctricos*. 39.
- Harris, I., Naim, M., Palmer, A., Potter, A., & Mumford, C. (2011). Production Economics Assessing the impact of cost optimization based on infrastructure modelling on CO2 emissions. *Intern. Journal of Production Economics*, 131(1), 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.03.005>
- Higuera, C., ER, E., & León Cárdenas, C. E. (2019). *Estimación del consumo de*

- combustible en buses urbanos de la ciudad de Ibarra mediante equipo On Board.* 2–30.
- INEN. (2010). INEN_2205_10. *NTE_2205_10 Segunda Revisión*, 2–26.
- Inen, R. T. E., & Urbano, B. U. S. (2018). *MODIFICATORIA 3.* 3–7.
- Infografías.cl | Desarrollo en información visual - Buses Eléctricos BYD. (2017). Retrieved January 16, 2020, from <https://infografias.cl/buses-electricos-byd>
- Irizar, I. (2017). *Irizar i2e_Autobús Eléctrico.* 32. Retrieved from irizar.com/italy/wp-content/uploads/sites/19/2017/06/Irizar-i2e_esp.pdf
- J.Y, W. (2012). THEORY OF GROUND VEHICLES. In *הנוטע עלון* (Vol. 66).
- Landerl, P. (2017). *Status and Future Perspectives of Electric Buses in Urban Public Transport.*
- Landi Degl'Innocenti, E., & Landi Degl'Innocenti, E. (2019). Termodinamica. *Elementi Di Meccanica Dei Fluidi, Termodinamica e Fisica Statistica*, 111–150. https://doi.org/10.1007/978-88-470-3991-9_5
- Lima, B. A., & Galvez, E. (2016). *Análisis de consumo de combustible de los vehículos de categoría M1 que circulan en el Centro Histórico de la ciudad de Cuenca en horas de máxima demanda en función de los ciclos de conducción.* 62.
- Martinez. (2007). *CAPÍTULO I.*
- Mercedez Benz 1721_Ficha Técnica.* (2013).
- Mi, S., Stanojevic, N., & Vasic, M. (2018). *MAINTENANCE OF ELECTRIC CITY BUSES – COST BENEFIT ANALYSIS.*
- Miles, J., & Potter, S. (2014). Developing a viable electric bus service: The Milton Keynes demonstration project. *Research in Transportation Economics*, 48, 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.063>
- Montero, Vladimir francisco galindo, Vélez Loaiza, V. V. (2016). Obtención de los parámetros necesarios para el cálculo de fuerza en rueda de vehículos eléctricos. *Google Academico*, 111 pag. Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6858>
- MT, B. (2014). *EURO III.* 1–2.

- Muevecela Alvear, W. L., Espinoza Abad, J. L., & González Morales, L. (2019). *Diseño del sistema eléctrico en baja tensión para estaciones de carga de autobuses eléctricos*.
- Municipio, L. (2017). *Ordenanza-Control de los límites de velocidad de los automotores que circulan en las vías urbanas del cantón Loja*. (049), 1–19.
- Nº, A. I. I., Hugo, I. N. G., Pozo, D. E. L., & Pichincha, C. (2019). *Ley orgánica de eficiencia energética*.
- Norma INEN 1668. (2016). Ecuatoriana Nte Inen 1668. *NTE INEN 1668*.
- NTE INEN. (2010). Vehículos Automotores. Bus Urbano. Requisitos. *Nte Inen 2 205:2010*, 1, 2, 4, 12. Retrieved from http://www.usfq.edu.ec/sobre_la_usfq/servicios/autoclub/Documents/descargas/INEN-NormaTecnicaBusUrbano.pdf
- Ortiz, M. (2014). *Estudio Comparativo del Uso del Diesel Entre Europa y Ecuador*, U. 1, 111. Retrieved from <http://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/610/1/T-UIDE-0560.pdf>
- Osses, M. (2015). *Buses eléctricos e híbridos: Riesgos tecnológicos y requerimientos de capacitación*.
- Pacheco, S. (2007). *MOTORES DIESEL*.
- Pardo, S. (2018). *Análisis de buses eléctricos para el corredor cero emisiones Eje 8 Sur*. 1–73.
- PAZARLAMA, A. (2007). *ANTOR MOTOR DIESEL 13 HP*.
- Puertas, V., Proaño, F., & Martínez, F. (2018). *ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS TERMODINÁMICOS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA*.
- Ramírez Morales, J. (2017). *Estudio de la dinámica de tracción de un vehículo eléctrico*. 33. Retrieved from <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/8533/53111R173.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Red de Estaciones Automáticas | INAMHI. (2019). Retrieved January 16, 2020, from <http://186.42.174.236/InamhiEmas/#>

- Ríos, V., Vargas Guevara, C., Guamán Molina, J., & Otorongo Cornejo, M. (2018). *Implicaciones Energéticas y Medio Ambientales de la Integración de Autobuses Eléctricos en el Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Ambato*. 42(1).
- Rojas García, C. (2012). *Metodología para estimar y monitorear reducciones de gases efecto invernadero en sistemas de transporte masivo urbano en el marco del Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto*. 1–11.
- RTE_INEN_039_10 (pp. 2–9). (2010).
- Sanín, L. (2016). *Eficiencia energética en la administración de flotas vehiculares. Caso buses del Metro de Medellín*. Retrieved from [http://www.bdigital.unal.edu.co/56276/1/Trabajo final de grado maestría Luis Sanín Gallón.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/56276/1/Trabajo%20final%20de%20grado%20maestría%20Luis%20Sanín%20Gallón.pdf)
- Santamaría Montalvo, A. (2015). *Manual de cálculo y reducción de huella de carbono para actividades de transporte por carretera*. 1–64.
- Sanz Arnaiz, I. (2015). *Análisis de la evolución y el impacto de los vehículos eléctricos en la economía europea*. 84.
- Tamayo Jiménez, R. (2018). *Análisis de viabilidad para la implementación de un vehículo eléctrico que preste el servicio de taxi en la ciudad de Cuenca*.
- Telegrafo, N. . (2019). El Telégrafo - Noticias del Ecuador y del mundo - Seis buses eléctricos operarán de manera inmediata en Guayaquil. Retrieved February 20, 2020, from <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/guayaquil/1/buseselectricos-guayaquil>
- Teoh, L. E., Khoo, H. L., Goh, S. Y., & Chong, L. M. (2018). Scenario-based electric bus operation: A case study of Putrajaya, Malaysia. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 7(1), 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.09.002>
- World's Air Pollution: Real-time Air Quality Index. (2020). Retrieved January 16, 2020, from <https://waqi.info/#/c/0.165/-30.93/3.6z>.
- Yolanda, M., Morales, R., & Guzmán, A. (2014). Caracterización De Un Motor De Combustión Interna Con Dos Tipos De Combustible. *Imt - Sct*, (417). Retrieved from <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt417.pdf>

Zumba, W., & Moreno Cordero, D. (2017). *Evaluación de la demanda energética de buses con motores de combustión interna , en rutas reales ; para implementar buses eléctricos.*

ANEXOS

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BYD K9G

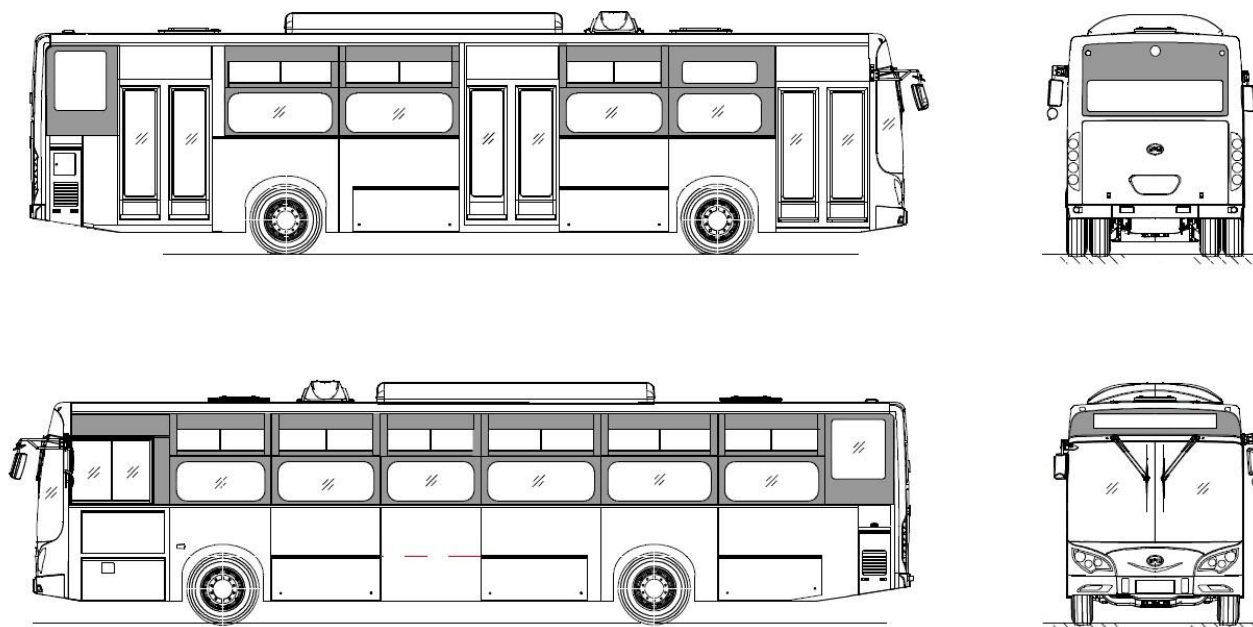


Fig. 1 Especificaciones técnicas autobús eléctrico K9G.

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 | |
| 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 |

MERCEDES BENZ 1721/59

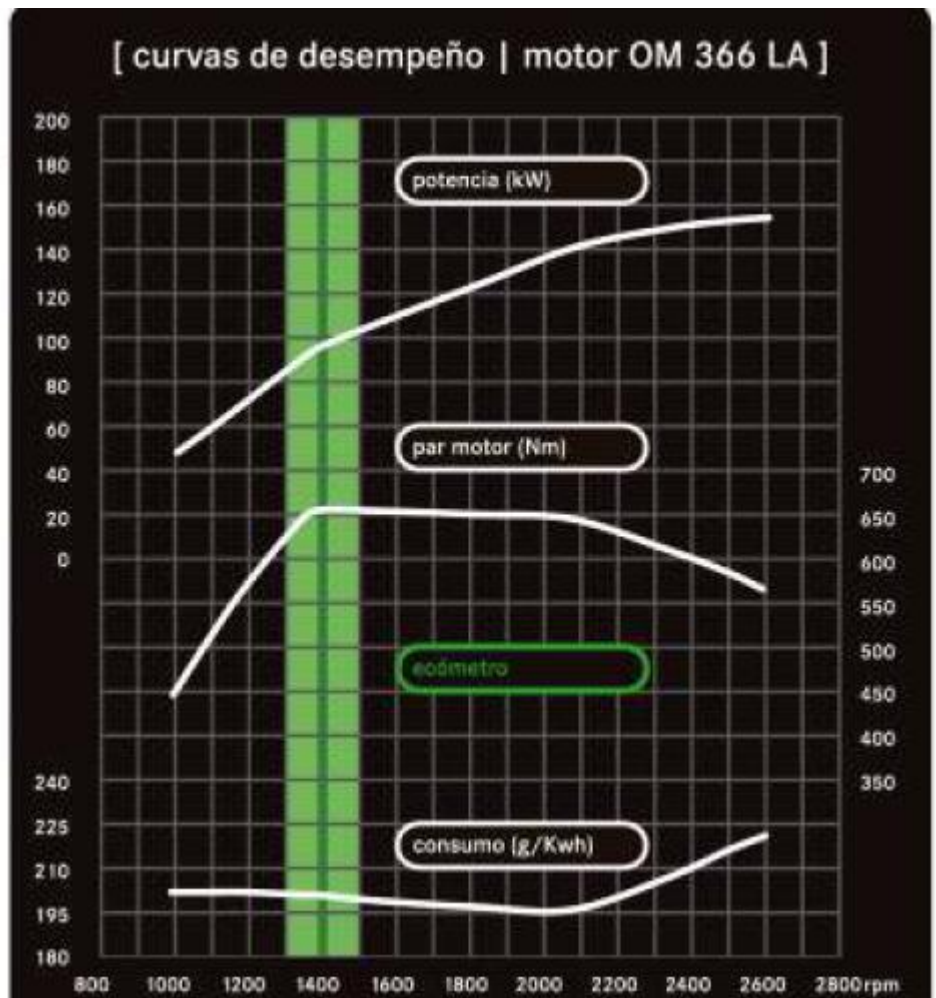


Fig. 2 Curva de desempeño del autobús Mercedes Benz.

| Motor | OM 366 LA Euro II 6 cilindros verticales en línea, turbocooler |
|---------------------------------|---|
| potencia máxima [NBR ISO 1585] | 155 kW (211 cv) @ 2.600 rpm |
| par motor máximo [NBR ISO 1585] | 660 Nm (67 mkgf) @ 1.400 rpm |
| cilindrada total | 5.958 cm |
| consumo específico | 197 g/kWh @ 1.950 rpm |
| filtro de aceite - tipo | filtro de aceite con elemento de papel intercambiable |
| filtro de aire - tipo | seco, con elemento de papel |
| sistema de enfriamiento | por circulación de agua con termostato |
| unidad inyectora | Bosch, de émbolos con avance automático P3000 |
| sistema de inyección | con regulador RQVK y LDA |
| compresor (accionamiento) | por correa en V |

Fig. 3 Potencia Máxima del autobús a diésel.