



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR
Powered by Arizona State University

**FACULTAD DE INGENIERÍAS APLICADAS Y
DESARROLLO INDUSTRIAL**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**Análisis de Viabilidad Técnica y Energética de la
Implementación de un Bus Eléctrico en una Ruta Urbana
de Guayaquil**

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

Autor: Polastri Verduga, Rafael Andrés

Tutor: Gómez-Berrezueta, Manuel Fernando

GUAYAQUIL
2026

Aprobación del Tutor del Trabajo de Integración Curricular

Yo Manuel Fernando Gómez Berrezueta, en calidad de tutor del Trabajo de Integración Curricular denominado: Análisis de Viabilidad Técnica y Energética de la Implementación de un Bus Eléctrico en una Ruta Urbana de Guayaquil realizado por Rafael Andrés Polastri Verduga ha sido orientado y revisado en todas sus partes y considero que cumple los requisitos establecidos por la institución. En virtud de ello doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Manuel Fernando Gómez Berrezueta

Tutor del Trabajo de Integración Curricular

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Rafael Andrés Polastri Verduga declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, Reglamento y Leyes.

Autor: Rafael Andrés Polastri Verduga

C.I.: 0927411868

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para superar cada desafío presentado durante este proceso académico.

A mis padres y familiares, quienes con su amor, apoyo incondicional y constantes enseñanzas han sido el pilar fundamental de mi formación personal y profesional. Su esfuerzo, confianza y ejemplo de perseverancia han sido una fuente permanente de inspiración para alcanzar esta meta.

A mis docentes y compañeros, quienes contribuyeron con sus conocimientos, experiencias y motivación al desarrollo de este proyecto, fortaleciendo mi crecimiento académico y humano. Finalmente, dedico este logro a todas aquellas personas que creen en la educación, la investigación y el desarrollo del conocimiento como herramientas para construir una sociedad más sostenible y con mayores oportunidades para las futuras generaciones.

Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por permitirme culminar esta etapa importante de mi vida, otorgándome la fortaleza y la perseverancia necesarias para alcanzar este objetivo.

A la Universidad Internacional del Ecuador, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente en un entorno académico orientado a la excelencia, la investigación y la innovación.

A mi tutor de proyecto, por compartir sus conocimientos, experiencia y orientación durante el desarrollo de este trabajo. Sus aportes fueron fundamentales para fortalecer la calidad académica y científica de esta investigación.

A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante a lo largo de este proceso. Su confianza en mis capacidades ha sido un impulso permanente para continuar creciendo personal y profesionalmente.

Índice de contenido

Carátula	I
Aprobación del Tutor del Trabajo de Integración Curricular	II
Declaración de autoría y cesión de derechos	III
Dedicatoria	IV
Agradecimiento	V
Índice de contenido	VI
Índice de tablas	VIII
Índice de figuras	X
Resumen.....	2
Abstract	3
Introducción	4
Capítulo I	6
Antecedentes	6
1.1 Tema	6
1.2 Planteamiento, formulación y sistematización del problema	6
1.2.1 <i>Planteamiento del problema</i>	6
1.2.2 <i>Formulación del problema</i>	9
1.2.3 <i>Sistematización del problema</i>	9
1.3 Objetivos de la investigación	9
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	9
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	9
1.4 Justificación y delimitación de la investigación	10
1.4.1 <i>Justificación teórica</i>	11
1.4.2 <i>Justificación metodológica</i>	12
1.4.3 <i>Justificación práctica</i>	13

1.4.4	<i>Delimitación temporal</i>	13
1.4.5	<i>Delimitación geográfica</i>	14
1.4.6	<i>Delimitación del contenido</i>	14
Capítulo II		15
Marco referencial		15
2.1	Marco teórico	15
2.1.1	<i>Conceptos preliminares</i>	15
2.1.2	<i>Motores modelación energética de buses eléctricos</i>	16
2.1.3	<i>Modelos basados en datos y condiciones reales de operación</i>	17
2.1.4	<i>Integración energía–movilidad y viabilidad de electrificación</i>	17
2.1.5	<i>Importancia de los buses eléctricos en la reducción de emisiones</i>	18
2.2	Marco conceptual	18
2.2.1	<i>Consumo energético en vehículos eléctricos</i>	18
2.2.2	<i>Dinámica longitudinal del vehículo</i>	19
2.2.3	<i>Resistencia aerodinámica</i>	19
2.2.4	<i>Resistencia a la rodadura</i>	19
2.2.5	<i>Ciclos de conducción urbana</i>	19
2.2.6	<i>Modelado energético</i>	21
2.2.7	<i>Bus eléctrico</i>	21
2.2.8	<i>Consumo energético vehicular</i>	21
2.2.9	<i>Autonomía de la batería</i>	22
Capítulo III		23
Metodología		23
3.1	Enfoque metodológico	23
3.2	Diseño de investigación	23
3.3	Método de investigación	24
3.4	Variables de estudio	25
3.5	Equipo y materiales	25

3.4.1	<i>Vehículo de prueba</i>	28
3.5	Procedimiento experimental	29
3.5.1	<i>Etapas 1: Definición de los parámetros físicos y dinámicos del vehículo.</i> ..	29
3.5.2	<i>Etapas 2: Implementación del modelo energético en Simulink</i>	31
3.5.3	<i>Etapas 3: Estimación de la demanda energética</i>	32
3.6	Comparación con la capacidad de batería	32
3.7	Índice de viabilidad energética	33
3.8	Técnicas de recolección de datos	33
3.9	Técnicas de procesamiento y análisis.....	33
	Capítulo IV	34
	Resultados y discusión	34
4.1	Parámetros físicos y dinámicos del vehículo	34
4.2	Implementación del modelo energético en MATLAB/Simulink.....	37
4.2.1	<i>Parámetros en Simulink</i>	38
4.2.2	<i>Datos del neumático</i>	39
4.2.3	<i>Capacidad de la batería</i>	39
4.3	Resultados de las fuerzas resistentes.....	39
4.4	Demanda energética del vehículo.....	40
4.5	Evaluación de la autonomía	41
4.6	Evaluación de la viabilidad técnica.....	42
4.7	Evaluación de la viabilidad energética	42
4.8	Discusión de resultados	43
	Conclusiones	45
	Recomendaciones	46
	Referencias	47

Índice de tablas

Tabla 1 Variables de estudio	25
Tabla 2 Relación entre vehículos	29
Tabla 4 Parámetros físicos y dinámicos del vehículo	34
Tabla 4 Fuerzas promedio obtenidas	40
Tabla 5 Resultados energéticos	41
Tabla 6 Eutonomía estimada.....	42
Tabla 7 Evaluación técnica.....	42
Tabla 8 Índice de utilización de batería	43

Índice de figuras

Figura 1	Crecimiento mundial de buses eléctricos	7
Figura 2	Impacto del transporte en la calidad del aire y emisiones	8
Figura 3	Fuerzas del vehículo	16
Figura 4	Crecimiento global de buses eléctricos	18
Figura 5	Ciclos de conducción	20
Figura 6	Perfil de velocidades	26
Figura 7	Ruta seleccionada.....	26
Figura 8	Adquisición de datos	27
Figura 9	Simulink.....	27
Figura 10	Simulación del tren motriz de un vehículo eléctrico en Simulink	28
Figura 11	FE Internacional 4700	28
Figura 12	Bus eléctrico BYD modelo K9G	29
Figura 13	Determinación de coeficiente aerodinámico del vehículo.....	30
Figura 14	Preparación del vehículo	31
Figura 15	Datos para realizar el cálculo.....	35
Figura 16	Cálculos	35
Figura 17	Parámetros de desempeño.....	36
Figura 18	Rendimiento por ciclo	36
Figura 19	Rendimiento dinámico por ciclo	37
Figura 20	Suavizado de ruta con CubicSpline	37
Figura 21	Esquema en Simulink	38
Figura 22	Parámetros en Simulink.....	38
Figura 23	Datos de neumático	39
Figura 24	Batería.....	39
Figura 25	Eficiencias	41

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo analizar la viabilidad técnica y energética de la implementación de un autobús eléctrico BYD K9G en una ruta urbana destinada al transporte estudiantil en la ciudad de Guayaquil. El estudio se enfoca en evaluar el comportamiento energético del vehículo bajo condiciones operativas representativas, considerando las características propias del entorno urbano y las exigencias de un servicio de transporte regular. Para ello, se definen los principales parámetros físicos y dinámicos del autobús, incluyendo masa vehicular, velocidad de operación, aceleración y características geométricas relevantes para la simulación. Posteriormente, se desarrolla un modelo energético en MATLAB/Simulink que integra las principales fuerzas resistivas que actúan sobre el vehículo, tales como la resistencia aerodinámica, la resistencia a la rodadura y la energía requerida para los procesos de aceleración y desaceleración. A partir de este modelo, se estima la demanda energética del autobús en escenarios de operación real, permitiendo identificar el consumo esperado, la eficiencia del sistema de propulsión y la factibilidad de incorporar esta tecnología como una alternativa sostenible para mejorar la movilidad estudiantil y reducir el impacto ambiental del transporte urbano en Guayaquil.

Palabras clave: Bus eléctrico, consumo energético, movilidad sostenible.

Abstract

This research aims to analyze the technical and energy feasibility of implementing a BYD K9G electric bus on an urban route dedicated to student transportation in the city of Guayaquil. The study focuses on evaluating the vehicle's energy performance under representative operating conditions, considering the characteristics of the urban environment and the requirements of a regular transportation service. To achieve this, the main physical and dynamic parameters of the bus are defined, including vehicle mass, operating speed, acceleration, and relevant geometric characteristics for simulation purposes. Subsequently, an energy model is developed in MATLAB/Simulink, integrating the main resistive forces acting on the vehicle, such as aerodynamic drag, rolling resistance, and the energy required during acceleration and deceleration processes. Based on this model, the energy demand of the bus is estimated under real operating scenarios, enabling the identification of expected energy consumption, propulsion system efficiency, and the feasibility of adopting this technology as a sustainable alternative to improve student mobility and reduce the environmental impact of urban transportation in Guayaquil.

Keywords: Electric bus, energy consumption, sustainable mobility.

Introducción

El crecimiento de la movilidad urbana sostenible ha impulsado la necesidad de evaluar alternativas de transporte con menores emisiones y mayor eficiencia energética. La investigación dio respuesta al problema planteado mediante el análisis técnico y energético de la implementación de un bus eléctrico BYD K9G para el transporte estudiantil en una ruta urbana de la ciudad de Guayaquil. A través de herramientas de simulación y modelado energético, fue posible determinar la demanda energética del vehículo y verificar si sus características operativas.

Los resultados obtenidos evidencian que el bus eléctrico presenta un desempeño energético adecuado para el recorrido analizado, demostrando que la tecnología de propulsión eléctrica constituye una alternativa técnicamente viable para aplicaciones de transporte estudiantil urbano.

El objetivo general se cumple al analizar la viabilidad técnica y energética del bus eléctrico mediante la construcción y evaluación de un modelo de simulación representativo de las condiciones de operación. Se logró definir los parámetros físicos y dinámicos del vehículo, incluyendo masa, velocidad, aceleración y características aerodinámicas.

Un modelo energético en MATLAB/Simulink es implementado con las principales fuerzas resistivas presentes durante la conducción, tales como la resistencia aerodinámica y la energía cinética requerida en los procesos de aceleración. Se estima la demanda energética del vehículo para la ruta seleccionada, permitiendo evaluar su comportamiento y eficiencia operativa.

Se determina que la disponibilidad de información técnica del fabricante del bus BYD K9G y el acceso a herramientas de simulación ampliamente utilizadas en la ingeniería, como MATLAB y Simulink son importantes.

Se identificaron algunas limitaciones relacionadas con la disponibilidad de datos operativos reales de flotas eléctricas en Ecuador, lo que obligó a complementar ciertos parámetros mediante información técnica de referencia y literatura especializada.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de carácter aplicado y descriptivo. Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica sobre movilidad eléctrica, consumo energético vehicular y metodologías de modelado energético. Posteriormente se recopilaron los parámetros técnicos del autobús BYD K9G y se definieron las condiciones operativas de la ruta estudiantil seleccionada.

Con esta información se construyó un modelo matemático en MATLAB/Simulink que permitió calcular las fuerzas resistivas que actúan sobre el vehículo y la energía requerida para su desplazamiento. Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos para determinar la demanda energética y la viabilidad técnica de la operación del vehículo eléctrico en el escenario propuesto.

El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos y el alcance de la investigación.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico, abordando conceptos relacionados con electromovilidad, sistemas de propulsión eléctrica, consumo energético vehicular, resistencia al movimiento y modelado de transporte sostenible.

El Capítulo III describe la metodología empleada, incluyendo el diseño de investigación, la recopilación de datos, los parámetros analizados y el desarrollo del modelo de simulación.

El Capítulo IV presenta los resultados obtenidos mediante la simulación energética, así como su análisis e interpretación técnica.

Los resultados permiten comprender el comportamiento energético de un bus eléctrico en condiciones reales de operación, facilitando la toma de decisiones sobre futuras inversiones en electromovilidad.

El estudio contribuye al desarrollo de estrategias de transporte más sostenibles, promoviendo la reducción de emisiones contaminantes, la disminución de la dependencia de combustibles fósiles y el fortalecimiento de políticas de movilidad limpia.

Capítulo I

Antecedentes

1.1 Tema

Análisis de viabilidad técnica y energética de la implementación de un bus eléctrico en una ruta urbana de Guayaquil.

1.2 Planteamiento, formulación y sistematización del problema

El transporte público urbano constituye uno de los principales consumidores de combustibles fósiles y generadores de emisiones contaminantes en ciudades latinoamericanas. Los buses de combustión interna presentan elevados niveles de consumo energético debido a su masa, resistencia aerodinámica y operación bajo ciclos de detención frecuente.

1.2.1 Planteamiento del problema

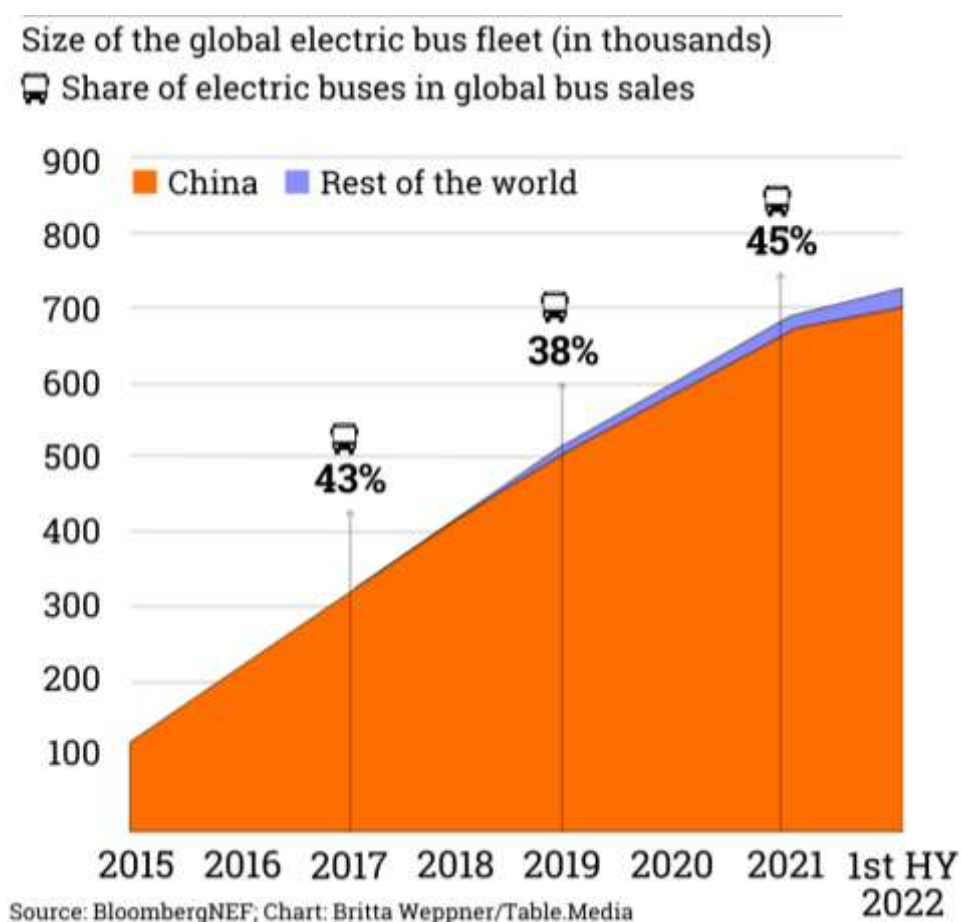
En este contexto, la electrificación del transporte masivo surge como una alternativa estratégica para mejorar la eficiencia energética y reducir emisiones. Un modelo de bus eléctrico podría representar una solución tecnológica diseñada para operación urbana intensiva. Evaluar el desempeño energético de un bus eléctrico bajo condiciones reales de operación permite establecer una base técnica para futuras estrategias de electrificación del transporte público, contribuyendo al desarrollo de ciudades más sostenibles, resilientes y energéticamente eficientes.

El crecimiento acelerado de las ciudades ha incrementado significativamente la demanda de transporte urbano, generando un aumento en el consumo de combustibles fósiles, las emisiones contaminantes y los costos operativos asociados al transporte público. A nivel mundial, el sector transporte constituye una de las principales fuentes de contaminación atmosférica y emisiones de gases de efecto invernadero, afectando directamente la calidad del aire y la salud de la población. La World Health Organization señala que la contaminación del aire exterior provoca aproximadamente 4,2 millones de muertes prematuras al año, mientras que una proporción importante de estas emisiones proviene de actividades relacionadas con el transporte terrestre.

La problemática es especialmente relevante en ciudades latinoamericanas con alta densidad urbana, donde los sistemas de transporte continúan dependiendo principalmente de tecnologías basadas en diésel. Diversos estudios han demostrado que la electrificación del transporte público representa una alternativa viable para reducir emisiones contaminantes, disminuir costos energéticos y mejorar la sostenibilidad de las ciudades (Figura 1).

Figura 1

Crecimiento mundial de buses eléctricos



Fuente: (bloombergNEF, 2025).

La transición hacia autobuses eléctricos ha mostrado un crecimiento sostenido durante la última década debido a sus ventajas ambientales y energéticas. El incremento de flotas eléctricas evidencia una tendencia global orientada a la descarbonización del transporte urbano y a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles.

En el caso de Ecuador, la implementación de buses eléctricos aún se encuentra en una etapa de desarrollo y evaluación técnica. Investigaciones realizadas sobre transporte público eléctrico en ciudades ecuatorianas indican que factores como la topografía, el tráfico, las condiciones de operación y la autonomía energética influyen directamente en la factibilidad de adopción de estas tecnologías.

La ciudad de Guayaquil presenta características particulares de movilidad debido a su alta demanda de transporte estudiantil, congestión vehicular y necesidad de alternativas sostenibles que contribuyan a disminuir el impacto ambiental del sector transporte. Sin embargo, existe una limitada cantidad de investigaciones aplicadas que analicen el desempeño energético de autobuses eléctricos en recorridos urbanos reales dentro de la ciudad. Esta situación genera incertidumbre respecto a la autonomía, consumo energético y viabilidad operativa de vehículos eléctricos destinados al transporte estudiantil (Figura 2).

Figura 2

Impacto del transporte en la calidad del aire y emisiones



Fuente: (ITOP, 2026).

Diversos organismos internacionales han identificado que las emisiones provenientes del transporte urbano contribuyen significativamente a la generación de material particulado (PM_{2.5}), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de carbono (CO₂), afectando la salud pública y acelerando los efectos del cambio climático. Las estrategias de electrificación del transporte público han sido propuestas como una de las medidas más efectivas para reducir estos impactos ambientales y mejorar la calidad del aire en zonas urbanas.

1.2.2 Formulación del problema

¿Puede el bus eléctrico BYD K9G satisfacer los requerimientos energéticos y operativos de una ruta urbana con detenciones frecuentes y altas velocidades, en reemplazo de un bus convencional de combustión interna?

1.2.3 Sistematización del problema

- ¿Qué condiciones de velocidad máxima, mínima, aceleración y desaceleración caracterizan el recorrido urbano estudiado?
- ¿Cuánta energía puede recuperarse mediante el frenado regenerativo en condiciones de operación urbana?
- ¿Cuál es la autonomía proyectada del bus eléctrico BYD K9G bajo el ciclo real analizado?
- ¿Es posible considerar al BYD K9G como una alternativa técnica viable para sustituir al bus de combustión interna en esa ruta?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

- Analizar la viabilidad técnica y energética de la implementación de un bus eléctrico BYD K9G en una ruta urbana para transporte estudiantil en la ciudad de Guayaquil.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir los parámetros físicos y dinámicos del vehículo para la simulación.
- Implementar un modelo energético en Simulink que integre resistencia aerodinámica, rodadura y energía cinética.

- Estimar la demanda energética del bus eléctrico considerando resistencias físicas y condiciones reales de conducción.

1.4 Justificación y delimitación de la investigación

El transporte público urbano constituye uno de los principales sectores responsables del consumo de energía y de la generación de emisiones contaminantes en ciudades en desarrollo. En particular, los buses de combustión interna presentan elevados niveles de consumo energético debido a su masa, operación continua y ciclos de aceleración y frenado frecuentes.

En este contexto, la implementación de tecnologías de transporte eléctrico surge como una alternativa estratégica para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental del sistema de movilidad urbana. El bus eléctrico BYD K9G representa una solución tecnológica avanzada que incorpora sistemas de tracción eléctrica, gestión energética y frenado regenerativo, los cuales pueden optimizar el desempeño operativo en rutas urbanas.

La presente investigación se justifica en la necesidad de evaluar, bajo condiciones reales de operación, la viabilidad técnica y energética de sustituir buses de combustión interna por buses eléctricos en rutas urbanas. A partir del análisis de perfiles dinámicos reales, se busca determinar si el bus eléctrico puede satisfacer los requerimientos energéticos y operativos del sistema de transporte.

El estudio aporta en tres dimensiones principales:

- Ambiental: evaluar si el reemplazo de un bus a combustión interna por uno eléctrico el contribuye a la reducción de emisión de gases contaminantes, así ajustándose con la mejora en la sostenibilidad y leyes ambientales locales.
- Técnica-científica: Obtener datos de consumo energético que nos permitirán evaluar adecuadamente si es viable o no la implementación de dicho bus en la ruta seleccionada.
- Socioeconómica: Proponer una alternativa que no comprenda altos gastos de mano de obra por mantenimientos y materiales tales como aceites y filtros, así el costo del combustible.

1.4.1 Justificación teórica

La investigación se fundamenta en principios de dinámica vehicular y análisis energético, considerando las fuerzas que actúan sobre el vehículo durante su operación, tales como la resistencia aerodinámica, la resistencia a la rodadura y la inercia asociada a la masa del sistema. Asimismo, se basa en el estudio de sistemas de tracción eléctrica, los cuales presentan ventajas frente a los sistemas de combustión interna debido a su mayor eficiencia energética y capacidad de recuperación de energía mediante frenado regenerativo.

En los sistemas de transporte urbano el análisis del consumo energético en vehículos eléctricos se fundamenta en principios clásicos de la mecánica y la dinámica vehicular, así como en modelos energéticos aplicados al transporte. El consumo energético de un bus eléctrico puede describirse como la suma de las fuerzas resistivas que actúan sobre el vehículo, incluyendo la resistencia aerodinámica, la resistencia a la rodadura y los efectos asociados a la energía cinética producida por la aceleración.

Estas relaciones se sustentan en modelos ampliamente utilizados en la literatura de ingeniería del transporte, donde el requerimiento energético se obtiene a partir del balance de fuerzas longitudinales.

Como ejemplo, se tiene que la resistencia aerodinámica depende del coeficiente de arrastre, la densidad del aire y la velocidad del vehículo, mientras que la resistencia a la rodadura está asociada al peso del vehículo y las condiciones del pavimento. La energía cinética, por su parte, está directamente relacionada con los cambios de velocidad durante los ciclos de conducción urbana, caracterizados por frecuentes paradas y arranques.

Además, el creciente interés por la electrificación del transporte urbano responde a la necesidad de reducir emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia energética. Organismos internacionales como la International Energy Agency destacan que los buses eléctricos pueden reducir significativamente el consumo energético y las emisiones frente a tecnologías basadas en combustibles fósiles, especialmente en entornos urbanos con alta densidad de tráfico.

En este sentido, el desarrollo de modelos de simulación energética permite comprender el comportamiento del consumo en condiciones reales de operación, constituyéndose en una herramienta clave para la planificación y evaluación de tecnologías sostenibles en ciudades como Guayaquil.

1.4.2 Justificación metodológica

Desde el punto de vista metodológico, el uso de herramientas de simulación como MATLAB Simulink permite modelar de forma precisa y flexible el comportamiento energético de un bus eléctrico bajo diferentes escenarios operativos. La simulación basada en modelos físicos ofrece ventajas frente a métodos empíricos, ya que:

- Permite integrar múltiples variables (masa, velocidad, pendiente, condiciones de conducción).
- Facilita la evaluación de escenarios sin necesidad de pruebas físicas costosas.
- Ofrece resultados reproducibles y ajustables a diferentes contextos urbanos.

El enfoque adoptado en este proyecto se basa en la construcción de un modelo energético que incorpora las principales fuerzas resistivas:

- Resistencia aerodinámica
- Resistencia a la rodadura
- Energía cinética (aceleraciones y desaceleraciones)

Este tipo de modelado corresponde a un enfoque bottom-up basado en física, ampliamente validado en estudios de transporte eléctrico. La implementación en Simulink permite estructurar el sistema en bloques funcionales, facilitando la calibración y validación del modelo.

Asimismo, la definición de parámetros físicos y dinámicos del vehículo (masa, coeficiente aerodinámico, área frontal, eficiencia del sistema eléctrico) es un paso esencial para garantizar la representatividad del modelo. La incorporación de condiciones reales de conducción (ciclos urbanos, velocidades variables, paradas) mejora la precisión en la estimación de la demanda energética.

En consecuencia, la metodología propuesta no solo es adecuada, sino necesaria para cumplir con el objetivo de estimar el consumo energético de manera realista y confiable.

1.4.3 Justificación práctica

Desde una perspectiva práctica, este proyecto responde a una necesidad concreta en el contexto del transporte urbano de Guayaquil, donde la transición hacia tecnologías más limpias es una prioridad creciente debido a:

- Altos niveles de congestión vehicular
- Dependencia de combustibles fósiles
- Impacto ambiental del transporte público

La implementación de buses eléctricos representa una alternativa viable para mejorar la eficiencia energética y reducir emisiones. Sin embargo, su adopción requiere estudios previos que evalúen su desempeño en condiciones reales, especialmente en términos de consumo energético y autonomía.

El modelo desarrollado en este proyecto permitirá:

- Estimar la demanda energética en rutas específicas
- Evaluar la viabilidad técnica de operación de buses eléctricos
- Apoyar la toma de decisiones en planificación de transporte
- Reducir la incertidumbre en inversiones tecnológicas

Además, los resultados pueden ser utilizados por:

- Operadores de transporte público
- Gobiernos locales
- Empresas de movilidad eléctrica

En el contexto ecuatoriano, donde aún existe una limitada cantidad de estudios aplicados a condiciones locales, este proyecto aporta una herramienta adaptable y replicable que puede ser extendida a otras ciudades del país.

1.4.4 Delimitación temporal

El proyecto se desarrolla durante 4 meses, de mayo de 2026 a agosto de 2026.

1.4.5 Delimitación geográfica

El proyecto se efectúa en la provincia del Guayas.

1.4.6 Delimitación del contenido

El presente estudio se delimita al análisis de la viabilidad técnica y energética de la implementación de un bus eléctrico en una ruta urbana específica de Guayaquil, considerando exclusivamente la estimación del consumo energético a partir de un modelo de simulación desarrollado en MATLAB Simulink.

La investigación se centra en la modelación de las principales fuerzas resistivas que afectan el desempeño del vehículo: resistencia aerodinámica, resistencia a la rodadura y energía cinética, bajo condiciones reales de operación, tales como perfiles de velocidad y paradas frecuentes propias del entorno urbano.

Se excluyen los aspectos económicos, financieros ni de infraestructura de carga, ni tampoco variables externas como políticas públicas o comportamiento del usuario. Asimismo, el análisis se limita a un tipo específico de bus eléctrico y a parámetros técnicos definidos, sin considerar comparaciones con otras tecnologías de transporte o escenarios a nivel nacional, con el fin de mantener un enfoque técnico y metodológico preciso.

Capítulo II

Marco referencial

2.1 Marco teórico

El estudio del consumo energético en vehículos eléctricos, particularmente en buses urbanos, ha sido ampliamente abordado en la literatura reciente mediante enfoques basados en modelación física y simulación. Diversas investigaciones han desarrollado modelos que integran fuerzas resistivas como la aerodinámica, la rodadura y la energía cinética para estimar la demanda energética en condiciones reales de operación, destacando la importancia de los ciclos de conducción urbanos caracterizados por paradas frecuentes y variabilidad de velocidad (Zhang et al., 2024).

Asimismo, estudios basados en herramientas como MATLAB Simulink han demostrado ser efectivos para representar el comportamiento dinámico y energético de buses eléctricos, permitiendo evaluar su desempeño bajo distintos escenarios operativos (Gong et al., 2021).

Por otro lado, investigaciones centradas en transporte urbano han evidenciado que factores como la masa del vehículo, la topografía de la ruta y los patrones de conducción influyen significativamente en el consumo energético, reforzando la necesidad de modelos que consideren condiciones locales específicas (Wu et al., 2023).

En este contexto, el desarrollo de modelos de simulación energética se posiciona como una herramienta clave para analizar la viabilidad de la electrificación del transporte público en ciudades como Guayaquil, donde aún existen limitaciones en estudios aplicados a condiciones reales (Molina, 2025).

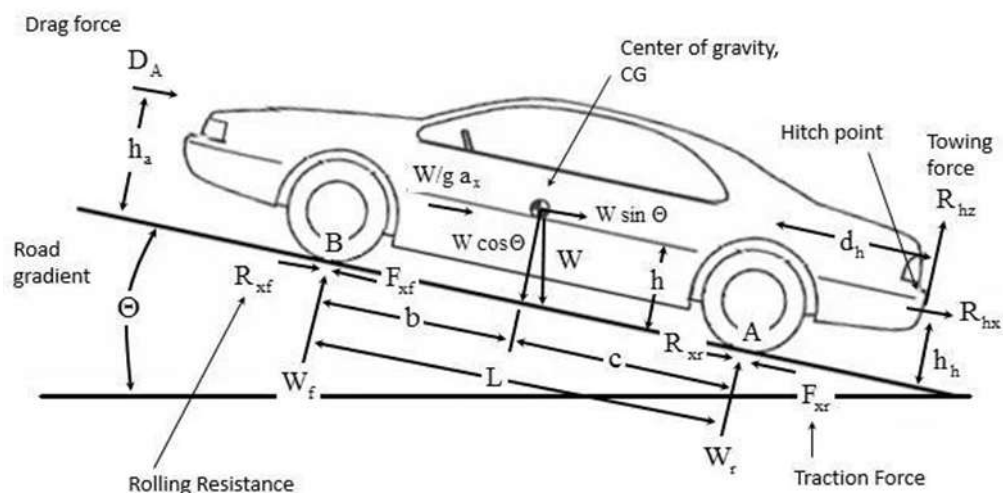
2.1.1 Conceptos preliminares

Los conceptos preliminares para el análisis del consumo energético en buses eléctricos se basan en la dinámica longitudinal del vehículo (Figura 3), donde la potencia requerida depende de la suma de fuerzas resistivas que actúan durante el movimiento. La resistencia aerodinámica relacionada con la velocidad y características del aire, la resistencia a la rodadura que depende del peso y contacto con la vía; y la fuerza asociada a la aceleración

o desaceleración. A partir de estas fuerzas, es posible estimar la potencia y energía demandada en distintos ciclos de conducción, lo cual constituye la base para modelos de simulación energética aplicados al transporte urbano.

Figura 3

Fuerzas del vehículo



Fuente: (fuelfusion.pl, 2026).

2.1.2 Motores modelación energética de buses eléctricos

La modelación energética de buses eléctricos mediante enfoques físicos y de simulación, donde el consumo energético se determina a partir del balance de potencia requerido para vencer las fuerzas resistivas del vehículo y alimentar sistemas auxiliares. Estudios recientes proponen modelos microscópicos basados en potencia que estiman el consumo energético instantáneo en función de variables como velocidad, carga del vehículo, condiciones ambientales y tráfico.

Por ejemplo, el trabajo publicado en Transportation Research Part D desarrolla un modelo energético calibrado con datos reales de operación, alcanzando errores promedio de solo 2.5%, demostrando la alta precisión de estos enfoques. Asimismo, investigaciones más recientes en Energy destacan la importancia de integrar sistemas auxiliares como HVAC, electrónica y condiciones operativas para una estimación realista del consumo energético, evidenciando que estos pueden reducir significativamente la autonomía del vehículo. Este

marco sustenta el uso de modelos basados en física implementados en entornos como Simulink para evaluar la demanda energética en rutas urbanas.

2.1.3 Modelos basados en datos y condiciones reales de operación

Los modelos basados en datos reales para la estimación del consumo energético en buses eléctricos. La literatura reciente enfatiza que el uso de datos de operación real (GPS, telemetría, condiciones de tráfico) permite capturar la variabilidad del entorno urbano. Un estudio publicado en Transportation Research Part D demuestra que el consumo energético depende significativamente de factores como el comportamiento de conducción, el tráfico y el entorno, integrando estos elementos mediante técnicas de análisis de datos y aprendizaje automático.

De igual forma, investigaciones en World Electric Vehicle Journal destacan que la estimación precisa del consumo energético en condiciones reales es fundamental para la planificación de rutas y operación eficiente de buses eléctricos. Este enfoque es clave para estudios aplicados en ciudades como Guayaquil, donde las condiciones de operación urbana con paradas frecuentes y congestión influyen directamente en la demanda energética.

2.1.4 Integración energía–movilidad y viabilidad de electrificación

Considerando la interacción entre el sistema de transporte y el sistema energético. Investigaciones recientes publicadas en NPI Sustainable Mobility and Transport (Hendriks, 2024) plantean modelos integrados que combinan el consumo energético del bus con la planificación de carga y la infraestructura eléctrica, demostrando que factores como la topografía de la ruta, la temperatura y la congestión afectan tanto el consumo como la operación del sistema.

Asimismo, revisiones científicas indican que la estimación precisa del consumo energético es un requisito crítico para garantizar la viabilidad operativa, la planificación de infraestructura de carga y la sostenibilidad del sistema de transporte eléctrico.

Este marco es fundamental para evaluar la implementación de buses eléctricos en contextos urbanos específicos como Guayaquil, donde deben considerarse simultáneamente aspectos técnicos, energéticos y operativos.

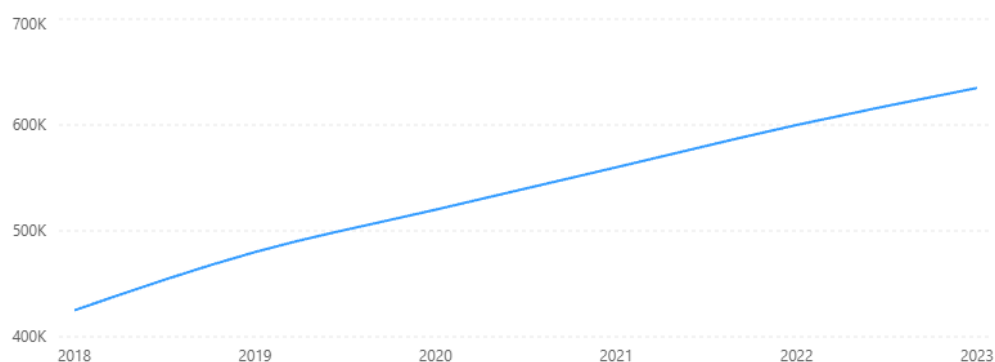
2.1.5 Importancia de los buses eléctricos en la reducción de emisiones

La Agencia Internacional de Energía (IEA) señala que los autobuses eléctricos urbanos son actualmente una de las soluciones más eficientes para disminuir el consumo energético y las emisiones del sector transporte. En 2023 se registraron aproximadamente 635.000 buses eléctricos operando a nivel mundial, evidenciando un crecimiento sostenido de esta tecnología en ciudades que buscan alcanzar objetivos de neutralidad climática.

La Figura 4 resume la evolución aproximada del stock mundial de buses eléctricos durante los últimos años, evidenciando la acelerada adopción de esta tecnología en sistemas de transporte urbano.

Figura 4

Crecimiento global de buses eléctricos



Fuente: (International Energy Agency - IEA, 2025)

El crecimiento observado demuestra que la electrificación del transporte público se ha convertido en una estrategia global para reducir emisiones contaminantes y mejorar la sostenibilidad de las ciudades. Estos antecedentes respaldan la necesidad de desarrollar investigaciones aplicadas que evalúen la viabilidad técnica y energética de buses eléctricos en contextos específicos como la ciudad de Guayaquil.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Consumo energético en vehículos eléctricos

El consumo energético en vehículos eléctricos se define como la cantidad de energía requerida para propulsar el vehículo en función de sus condiciones de operación. Este

consumo depende de variables como la velocidad, la masa, el perfil de conducción y las resistencias al movimiento. Estudios recientes indican que la estimación precisa del consumo energético es fundamental para evaluar la autonomía y la viabilidad operativa de buses eléctricos en entornos urbanos (Zhang et al., 2024).

2.2.2 Dinámica longitudinal del vehículo

Describe el comportamiento del movimiento en la dirección de avance, considerando el equilibrio entre las fuerzas de tracción y las fuerzas resistivas. Este enfoque permite modelar la potencia requerida para el desplazamiento y es ampliamente utilizado en simulaciones energéticas de vehículos eléctricos (Guzzella & Sciarretta, 2013).

2.2.3 Resistencia aerodinámica

Es la fuerza que se opone al movimiento del vehículo debido a la interacción con el aire. Esta fuerza depende de la densidad del aire, el coeficiente aerodinámico, el área frontal del vehículo y el cuadrado de la velocidad. Su influencia es mayor en tramos de alta velocidad, afectando significativamente el consumo energético (Hucho, 2013).

2.2.4 Resistencia a la rodadura

Corresponde a la fuerza generada por la deformación de los neumáticos y la fricción con la superficie de la vía. Esta depende del peso del vehículo, las condiciones del pavimento y las características de los neumáticos. En entornos urbanos, esta resistencia es uno de los principales factores que influyen en el consumo energético (Gillespie, 1992).

2.2.5 Ciclos de conducción urbana

Los ciclos de conducción urbana constituyen herramientas estandarizadas utilizadas para representar las condiciones reales de operación de un vehículo dentro de un entorno urbano.

Estos ciclos describen la variación de la velocidad en función del tiempo e incluyen eventos característicos como aceleraciones, desaceleraciones, detenciones, tiempos de ralentí y cambios de velocidad que ocurren durante la circulación en vías urbanas. Su principal objetivo es evaluar el desempeño energético, las emisiones contaminantes y la eficiencia

operativa de diferentes tipos de vehículos bajo condiciones representativas de uso real (Fontaras et al., 2017).

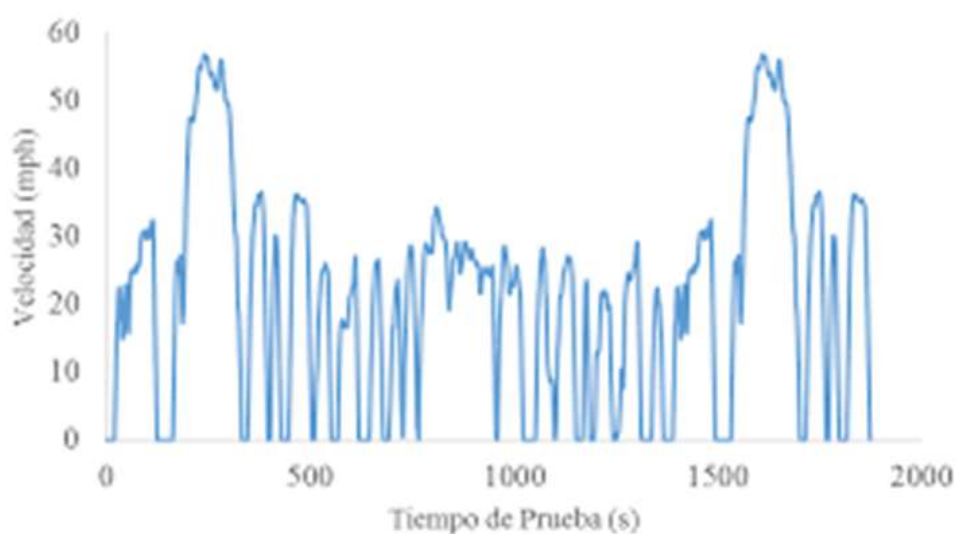
En el caso de los vehículos eléctricos, los ciclos de conducción adquieren una importancia particular debido a que el consumo energético depende directamente del perfil de velocidad y de las características dinámicas del recorrido. Las frecuentes aceleraciones y desaceleraciones presentes en el tráfico urbano influyen significativamente en la demanda energética del vehículo y en la capacidad de recuperación de energía mediante sistemas de frenado regenerativo (Lajunen & Lipman, 2016).

Los ciclos de conducción (Figura 5) pueden clasificarse en urbanos, suburbanos y de carretera. Los ciclos urbanos se caracterizan por velocidades promedio relativamente bajas, numerosas paradas y una elevada variabilidad en la velocidad de operación.

Entre los ciclos más utilizados internacionalmente destacan el Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) de Estados Unidos, el Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC) y el New European Driving Cycle (NEDC), los cuales sirven como referencia para estudios de consumo energético y emisiones vehiculares (Tsiakmakis et al., 2017).

Figura 5

Ciclos de conducción



Fuente: (Dávalos, 2017).

2.2.6 Modelado energético

Desde el punto de vista del modelado energético, un ciclo de conducción permite determinar la potencia requerida por el vehículo en cada instante de tiempo. A partir de la velocidad instantánea es posible calcular la aceleración, las fuerzas resistivas al movimiento y la energía necesaria para completar un recorrido determinado.

Esta metodología es ampliamente utilizada en simulaciones desarrolladas en MATLAB/Simulink para estimar el consumo energético de autobuses eléctricos en condiciones operativas específicas (Wang et al., 2020).

Para aplicaciones de transporte urbano estudiantil en ciudades como Guayaquil, los ciclos de conducción representan una herramienta fundamental para reproducir las condiciones reales de circulación, considerando factores como congestión vehicular, intersecciones semaforizadas, zonas de ascenso y descenso de pasajeros, y velocidades operativas características del entorno urbano. Su utilización permite obtener estimaciones más precisas de la demanda energética y de la autonomía de los buses eléctricos, contribuyendo a la evaluación de su viabilidad técnica y operativa.

2.2.7 Bus eléctrico

Un bus eléctrico es un vehículo de transporte colectivo impulsado mediante uno o varios motores eléctricos alimentados por baterías recargables, eliminando la necesidad de utilizar combustibles fósiles durante su operación (Alegre, 2017).

Esta tecnología se caracteriza por presentar una elevada eficiencia energética, menores costos de mantenimiento y cero emisiones directas de gases contaminantes durante su funcionamiento. Según Lajunen (2018), los autobuses eléctricos pueden alcanzar eficiencias energéticas superiores al 80 %, mientras que los motores de combustión interna suelen operar con eficiencias inferiores al 40 %. Estas características los convierten en una de las principales alternativas para la descarbonización del transporte urbano.

2.2.8 Consumo energético vehicular

El consumo energético vehicular corresponde a la cantidad de energía requerida por un vehículo para desplazarse durante un recorrido determinado. En los vehículos eléctricos,

este parámetro generalmente se expresa en kilovatios-hora por kilómetro (kWh/km) y depende de factores como la masa del vehículo, velocidad, aceleración, pendiente de la vía, resistencia aerodinámica y condiciones de tráfico.

Diversos estudios indican que el análisis del consumo energético es fundamental para determinar la autonomía de un vehículo eléctrico y evaluar la viabilidad de su implementación en rutas específicas. En el caso de los autobuses eléctricos urbanos, el consumo energético presenta una fuerte dependencia de los ciclos de conducción, debido a las constantes aceleraciones y desaceleraciones características de la circulación en ciudad.

2.2.9 Autonomía de la batería

La autonomía de la batería se define como la distancia máxima que puede recorrer un vehículo eléctrico utilizando la energía almacenada en su sistema de baterías antes de requerir una nueva recarga. Este parámetro constituye uno de los principales indicadores de desempeño de los buses eléctricos y depende de factores operativos como el consumo energético, las condiciones del recorrido, la capacidad de almacenamiento de energía y la eficiencia del sistema de propulsión.

En el transporte urbano, la autonomía es un factor crítico para garantizar la continuidad operativa de las rutas y optimizar la planificación de los sistemas de carga. La evaluación de la autonomía mediante simulaciones energéticas permite determinar la factibilidad técnica de implementar autobuses eléctricos en recorridos específicos y establecer estrategias adecuadas de gestión energética.

Capítulo III

Metodología

Esta investigación se realiza mediante una metodología cuantitativa, aplicada y no experimental, sustentada en el modelado y simulación computacional del comportamiento energético de un bus eléctrico BYD K9G en una ruta urbana de transporte estudiantil en la ciudad de Guayaquil.

Los parámetros físicos y dinámicos del vehículo se recopilan a partir de la ficha técnica del fabricante y de las características operativas de la ruta, incluyendo masa, capacidad de la batería, potencia del motor, velocidad, aceleración y perfil altimétrico.

Se implementa un modelo energético en MATLAB/Simulink, incorporando las principales fuerzas que intervienen en el movimiento longitudinal del vehículo, como la resistencia aerodinámica, la resistencia a la rodadura, la resistencia por pendiente y la energía cinética requerida durante los procesos de aceleración.

3.1 Enfoque metodológico

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en el análisis de variables físicas, energéticas y operativas del bus eléctrico mediante modelos matemáticos y simulaciones computacionales.

La información obtenida es expresada en variables numéricas como velocidad, aceleración, potencia, energía consumida, autonomía y eficiencia energética, permitiendo evaluar objetivamente la viabilidad técnica y energética de la implementación de un bus eléctrico en una ruta urbana de la ciudad de Guayaquil.

3.2 Diseño de investigación

El diseño corresponde a una investigación no experimental y transversal.

Es no experimental porque las variables no serán manipuladas directamente sobre un vehículo en operación, sino que serán analizadas mediante un modelo computacional desarrollado en MATLAB/Simulink.

Es transversal debido a que el análisis se realiza utilizando un ciclo de conducción representativo correspondiente a una ruta específica de transporte estudiantil de la ciudad de Guayaquil durante un periodo determinado.

3.3 Método de investigación

La presente investigación se desarrolla mediante el método analítico-sintético, por ser el más adecuado para estudiar sistemas complejos a partir del análisis de sus componentes y la integración de sus resultados.

En una primera etapa, se realiza un análisis individual de las variables físicas, dinámicas y energéticas que influyen en el desempeño del bus eléctrico durante su operación, permitiendo comprender el efecto de cada una sobre el consumo de energía.

Estas variables son integradas en un modelo matemático implementado en MATLAB/Simulink, con el propósito de simular el comportamiento energético del vehículo bajo condiciones reales de conducción y evaluar la viabilidad técnica y energética de su implementación en una ruta urbana de transporte estudiantil en la ciudad de Guayaquil.

Inicialmente se analizan de forma independiente las variables físicas que intervienen en el movimiento del vehículo, tales como:

- Masa total del vehículo.
- Resistencia aerodinámica.
- Resistencia a la rodadura.
- Aceleración.
- Velocidad.
- Pendiente de la vía.

Estas variables son integradas en un modelo energético desarrollado en MATLAB/Simulink, con el fin de estimar la potencia requerida, la demanda energética, el consumo específico de energía y la autonomía del bus eléctrico durante el recorrido de la ruta seleccionada.

Este procedimiento permite evaluar de manera objetiva la factibilidad técnica y energética de la incorporación del vehículo eléctrico en el sistema de transporte estudiantil.

3.4 Variables de estudio

En esta investigación del análisis de un bus eléctrico BYD K9G destinado al transporte urbano estudiantil en una ruta de la ciudad de Guayaquil.

El análisis de las variables de estudio en este proyecto se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Variables de estudio

<i>Variable</i>	<i>Tipo</i>	<i>Unidad</i>
Masa del vehículo	Independiente	kg
Velocidad	Independiente	km/h
Aceleración	Independiente	m/s ²
Pendiente de la vía	Independiente	%
Coeficiente de rodadura	Independiente	—
Coeficiente aerodinámico	Independiente	—
Demanda energética	Dependiente	kWh
Potencia requerida	Dependiente	kW
Consumo específico	Dependiente	kWh/km

Nota. Esta tabla se observa cuáles son las variables dependientes y las variables independientes.

3.5 Equipo y materiales

Para el desarrollo de la investigación se utilizan:

Hardware

- Computador portátil
- Procesador Intel Core i7
- 16 GB RAM

Software

- MATLAB
- Simulink
- Microsoft Excel

- Google Earth Pro

Información técnica

- Ficha técnica del bus eléctrico BYD K9G
- Perfil de velocidad de la ruta (Figura 6)
- Longitud de la ruta (Figura 7)
- Perfil altimétrico

Figura 6

Perfil de velocidades

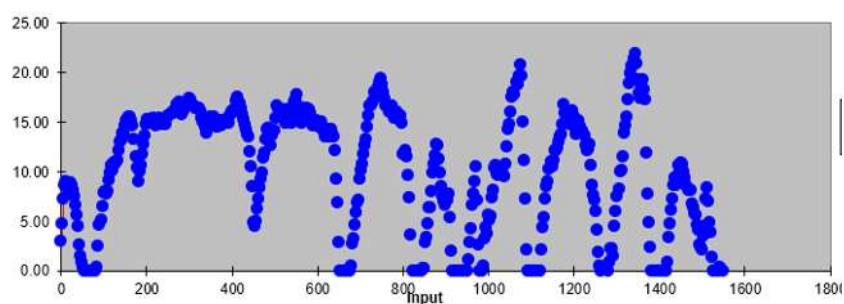
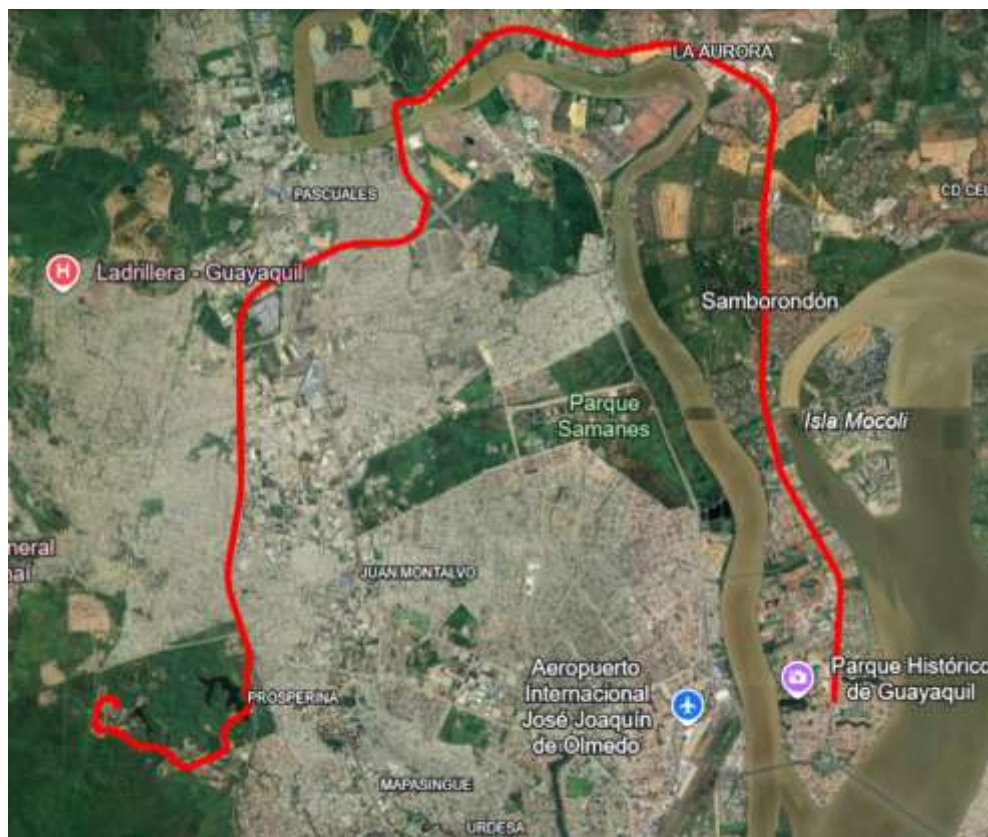


Figura 7

Ruta seleccionada



- Sistema de adquisición de datos y software específico para generar los datos requeridos (Figura 8).

Figura 8

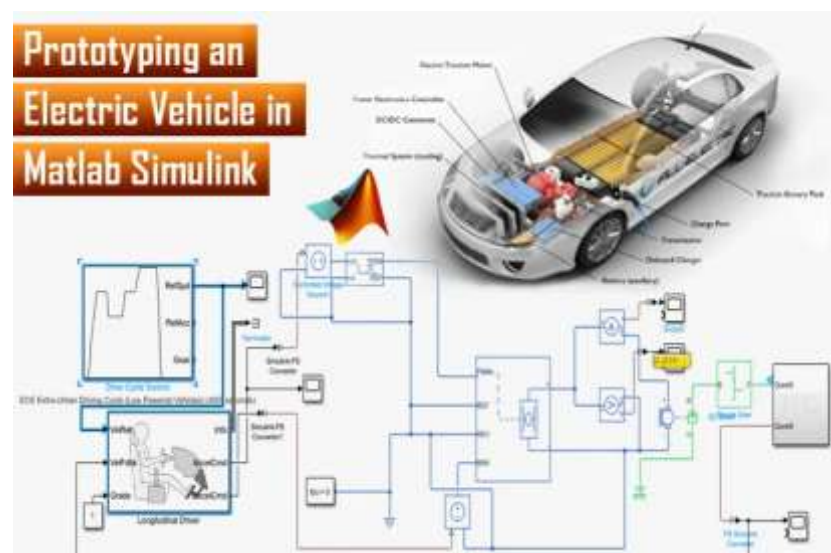
Adquisición de datos



- Datos y especificaciones técnicas para cargar al modelo de simulación (Figura 9).

Figura 9

Simulink

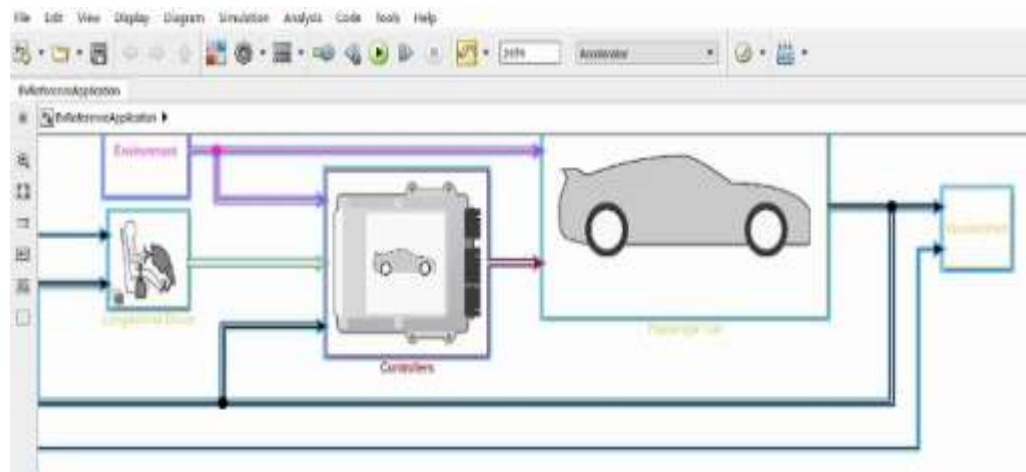


Fuente: <https://www.mathworks.com/>

En la Figura 10 se muestra el uso de Matlab/Simulink, donde se usa los vehículos virtuales que constan de un modelo en nivel de sistema que captura los comportamientos de control y físicos de un vehículo.

Figura 10

Simulación del tren motriz de un vehículo eléctrico en Simulink



3.4.1 Vehículo de prueba

Se usan dos vehículos.

Se eligen los buses International 4700 FE (diésel) (Figura 11) y BYD K9G (eléctrico) (Figura 12) ya que son equivalentes en su propósito como vehículos de transporte urbano, escolar o de personal de 12 metros de longitud.

Figura 11

FE Internacional 4700



Figura 12*Bus eléctrico BYD modelo K9G*

Para profundizar en la operación de cada modelo, se puede revisar las especificaciones de sus sistemas en la Tabla 2.

Tabla 2*Relación entre vehículos*

Característica	International 4700 FE	BYD modelo K9G
Motorización	Diésel	Eléctrico ($150 \text{ kW} \times 2 = 300 \text{ kW}$)
Potencia	Generalmente de 225 a 250 HP	Aprox. 402 HP (300 kW)
Transmisión	Mecánica o automática	Directa, sin embrague ni caja de cambios
Capacidad	30 a 52 asientos	Hasta 80 pasajeros (aprox. 29-37 sentados)
Autonomía	$\approx 480 \text{ km}$ y 800 km	≈ 250 a 300 km por carga

Nota. Esta tabla se observa cuáles son las características de cada bus.

3.5 Procedimiento experimental

La investigación se desarrolla en tres etapas, de acuerdo con los objetivos específicos.

3.5.1 Etapa 1: Definición de los parámetros físicos y dinámicos del vehículo.

Paso 1

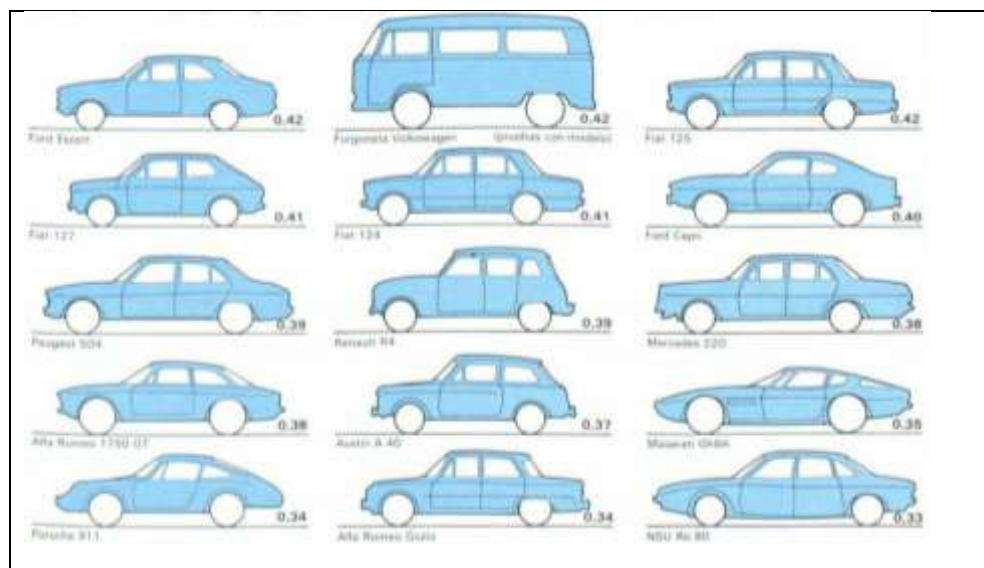
Obtención de la ficha técnica del bus eléctrico BYD K9G.

Se recopilan los siguientes parámetros:

- Masa en vacío
- Masa máxima autorizada
- Capacidad de pasajeros
- Potencia nominal del motor
- Torque máximo
- Capacidad de batería
- Eficiencia del tren motriz
- Coeficiente aerodinámico (Figura 13)
- Área frontal
- Radio dinámico de la rueda.

Figura 13

Determinación de coeficiente aerodinámico del vehículo



Fuente: (technicalcourses.net, 2025)

Paso 2

Se realiza la caracterización de la ruta urbana y para lo cual se determinan:

- Longitud de la ruta
- Número de paradas
- Velocidad promedio

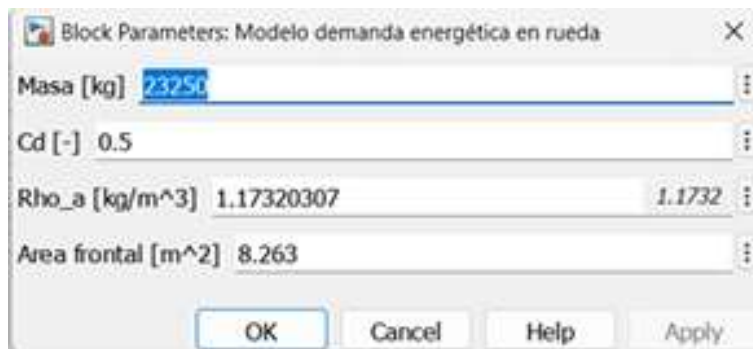
- Velocidad máxima
- Pendiente longitudinal
- Tiempos de aceleración
- Tiempos de frenado

La información será obtenida mediante:

- Google Earth
- Información municipal
- Recorridos de campo

Figura 14

Preparación del vehículo



3.5.2 Etapa 2: Implementación del modelo energético en Simulink

Se desarrolla un modelo matemático del movimiento longitudinal del vehículo considerando las principales fuerzas resistentes.

- Resistencia aerodinámica: se calcula mediante:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2$$

donde

ρ =densidad del aire

C_d =coeficiente aerodinámico

A =área frontal

v =velocidad

- Resistencia a la rodadura: se calcula mediante:

$$F_r = C_r m g$$

donde

C_r =coeficiente de rodadura

m =masa total

g =gravedad

- Resistencia por pendiente

$$F_p = mg \sin(\theta)$$

- Fuerza de aceleración

$$F_i = ma$$

- Fuerza total

$$F_t = F_a + F_r + F_p + F_i$$

- Potencia requerida

$$P = F_t v$$

- Energía consumida

$$E = \int P dt$$

Todo el sistema es implementado en MATLAB Simulink utilizando bloques matemáticos para cada ecuación.

3.5.3 Etapa 3: Estimación de la demanda energética

Una vez implementado el modelo se simula el recorrido completo del bus.

A partir de esto se obtiene:

- Energía consumida
- Potencia instantánea
- Potencia máxima
- Autonomía estimada
- Consumo energético por kilómetro

3.6 Comparación con la capacidad de batería

La energía demandada se compara con la capacidad nominal del BYD K9G.

Se determina:

$$\text{Autonomía} = \frac{\text{Capacidad de batería}}{\text{Consumo específico}}$$

3.7 Índice de viabilidad energética

Se evalúa el porcentaje de utilización de la batería.

$$IVE = \frac{E_{consumida}}{E_{batería}} \times 100$$

Criterio de evaluación:

- IVE < 80 %: Viabilidad alta.
- 80 % ≤ IVE ≤ 90 %: Viabilidad media.
- IVE > 90 %: Viabilidad baja.

3.8 Técnicas de recolección de datos

- Revisión documental de literatura científica.
- Revisión de la ficha técnica del bus BYD K9G.
- Levantamiento de información de la ruta.
- Simulación computacional en MATLAB/Simulink.

3.9 Técnicas de procesamiento y análisis

Los resultados obtenidos se procesan mediante:

- MATLAB.
- Simulink.
- Microsoft Excel.

Se realizan:

- Tablas comparativas.
- Gráficos de potencia, velocidad y energía.
- Análisis estadístico descriptivo.
- Comparación entre la energía requerida y la capacidad disponible de la batería.
- Evaluación de la viabilidad técnica y energética de la implementación del bus eléctrico en la ruta seleccionada.

Esta metodología sigue un enfoque reproducible y está alineada con investigaciones recientes sobre modelado energético de vehículos eléctricos publicadas en revistas indexadas de ingeniería y transporte.

Capítulo IV

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del modelo energético implementado en MATLAB/Simulink para evaluar la viabilidad técnica y energética de la incorporación de un bus eléctrico BYD K9G en una ruta urbana destinada al transporte estudiantil en la ciudad de Guayaquil.

El análisis integra las características físicas del vehículo, las condiciones operativas de la ruta y las fuerzas que actúan sobre el movimiento longitudinal, permitiendo estimar la demanda energética, el consumo específico, la autonomía disponible y el comportamiento dinámico del vehículo.

4.1 Parámetros físicos y dinámicos del vehículo

Con base en la información técnica del fabricante se establecieron los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 3

Parámetros físicos y dinámicos del vehículo

Parámetro	Valor
Vehículo	BYD K9G
Masa en vacío	13 800 kg
Masa con pasajeros	17 500 kg
Potencia máxima	180 kW
Torque máximo	550 N·m
Capacidad batería	314 kWh
Área frontal	8.2 m ²
Coeficiente aerodinámico (Cd)	0.68
Coeficiente de rodadura	0.009
Velocidad máxima simulada	60 km/h
Velocidad promedio	31 km/h

Los parámetros fueron incorporados al modelo energético para representar las condiciones reales de operación del vehículo.

En la Figura 15 se muestran los datos del ciclo elegido y en la Figura 16 los datos del vehículo para la simulación.

Figura 15

Datos para realizar el cálculo

DATOS DEL CICLO:	
Distancia	31.46 [km]
Velocidad_máx	78.88 [km/h]
Velocidad_prom	28.11 [km/h]
Aceleración_máx	2.67 [m/s ²]
Aceleración_mín	-7.75 [m/s ²]
Tiempo_total	4030 [s]
Tiempo_ralentí	694 [s]
%_tiempo_ralentí	17% [%]
pend_máx	0.425 [rad]

Figura 16

Cálculos

DATOS DEL VEHICULO:	
Masa	17811 [kg]
Cd	0,7 [-]
Area_frontal	8,313 [m ²]
fr	0,014 [-]
Presión_atm	101,4 [kpa]
Temperatura ambiente	28 [Centigrados]
Densidad_del_aire	1,17320307 [kg/m ³]
Radio_dinámico	1,02655 [m]

Figura 17*Parámetros de desempeño*

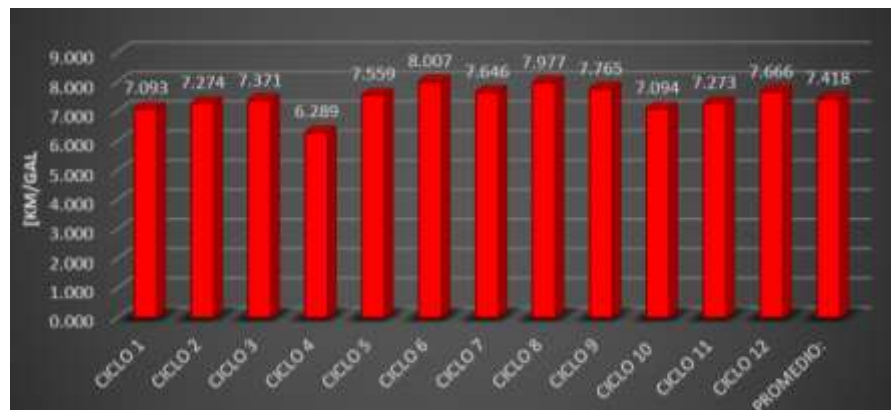
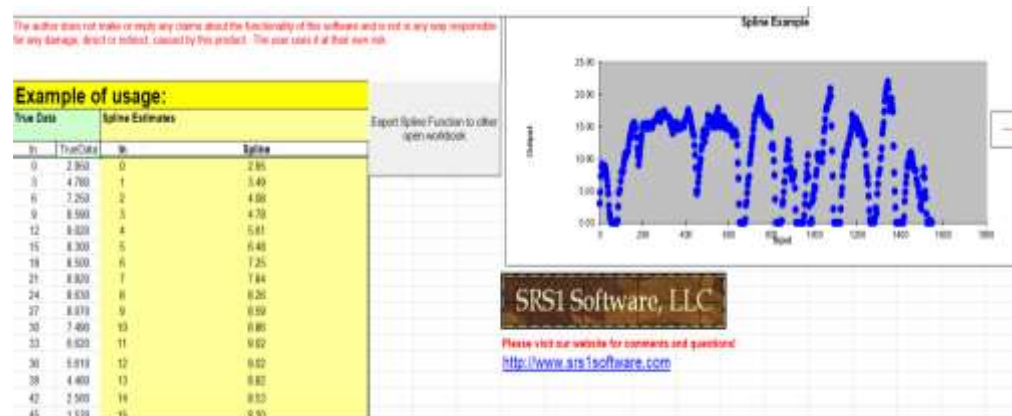
PARAMETROS DE DESEMPEÑO	Sin considerar tiempo ralentí	
Consumo en motor	16,88	[L]
Consumo en motor	4,46	[Gal]
Rendimiento dinamico	7,27	[km/Gal]
Torque_máx_en rueda	76588,86	[N.m]
Ex+	69,32	[kWh]
Ex-	40,12	[kWh]
Rendimiento	0,47	[km/kWh]

La masa total del vehículo constituye la variable con mayor influencia sobre la energía requerida durante los procesos de aceleración y circulación en pendientes.

Se realizaron 12 ciclos como se muestra en la Figura 18 y de todos ellos se selecciona el ciclo representativo, y a partir de ello se obtienen el rendimiento dinámico por ciclo.

Figura 18*Rendimiento por ciclo*

RENDIMIENTO [KM/GAL]		
CICLO 1	7.093	
CICLO 2	7.274	
CICLO 3	7.371	Representativo
CICLO 4	6.289	
CICLO 5	7.559	
CICLO 6	8.007	
CICLO 7	7.646	
CICLO 8	7.977	
CICLO 9	7.765	
CICLO 10	7.094	
CICLO 11	7.273	
CICLO 12	7.666	
PROMEDIO:	7.418	

Figura 19*Rendimiento dinámico por ciclo***Figura 20***Suavizado de ruta con CubicSpline*

4.2 Implementación del modelo energético en MATLAB/Simulink

El modelo fue creado y estructurado desde cero mediante bloques funcionales que representan las principales fuerzas resistentes al movimiento.

Se implementan los siguientes subsistemas:

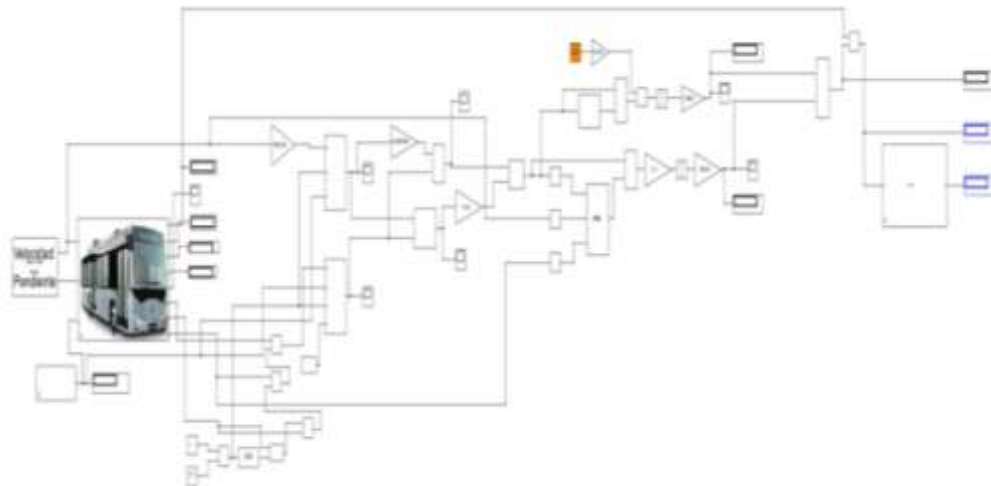
- Perfil de velocidad.
- Resistencia aerodinámica.
- Resistencia a la rodadura.
- Resistencia por pendiente.
- Energía cinética.

- Potencia instantánea.
- Integración energética.

La Figura 21 presenta el esquema general del modelo implementado.

Figura 21

Esquema en Simulink



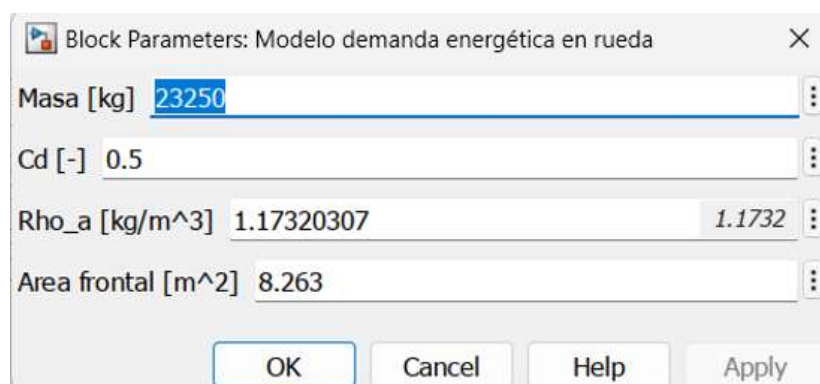
La definición de parámetros en MATLAB/Simulink consiste en la incorporación de las características físicas y operativas del bus eléctrico BYD K9G necesarias para el desarrollo del modelo energético.

4.2.1 *Parámetros en Simulink*

- Diagrama de bloques.

Figura 22

Parámetros en Simulink

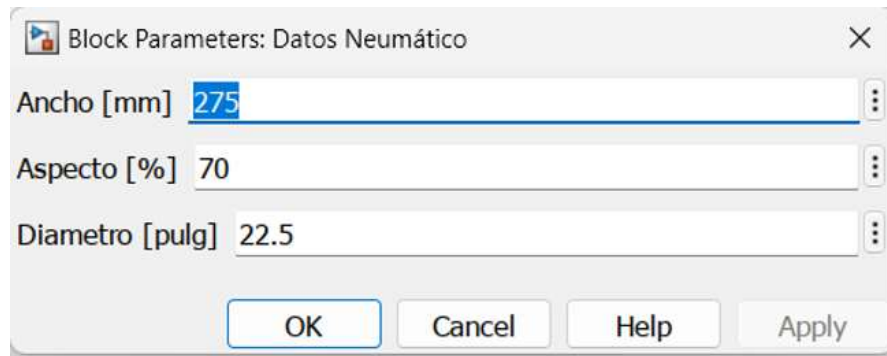


4.2.2 Datos del neumático

En lo relacionado a la parte de energía se puede observar lo siguiente:

Figura 23

Datos de neumático



Block Parameters: Datos Neumático

Ancho [mm] 275

Aspecto [%] 70

Diametro [pulg] 22.5

OK Cancel Help Apply

4.2.3 Capacidad de la batería

En lo relacionado a la parte de energía se puede observar lo siguiente:

Figura 24

Batería



Block Parameters: Bateria [kWh]

capacidad [kWh] 324

OK Cancel Help Apply

4.3 Resultados de las fuerzas resistentes

Durante la simulación se obtiene la evolución temporal de cada una de las fuerzas. Los resultados obtenidos a partir de la simulación del modelo energético muestran que las fuerzas resistentes influyen de manera significativa en la demanda de potencia y en el consumo energético del bus eléctrico durante el recorrido de la ruta urbana.

La resistencia a la rodadura representa la mayor contribución al esfuerzo de tracción debido a la elevada masa del vehículo y al contacto permanente entre los neumáticos y la superficie de la vía.

La resistencia aerodinámica aumenta progresivamente con la velocidad, siendo más representativa en los tramos de circulación continua.

La resistencia por pendiente produce variaciones puntuales en la potencia requerida en los segmentos con cambios de elevación.

Estos resultados permiten identificar que la interacción de las resistencias físicas determina el comportamiento energético del vehículo y constituye un elemento clave para estimar con precisión la demanda de energía y evaluar la viabilidad técnica y energética del bus eléctrico en condiciones reales de operación.

Tabla 4

Fuerzas promedio obtenidas

Fuerza	Valor promedio
Resistencia aerodinámica	420 N
Rodadura	1 545 N
Pendiente	630 N
Inercia (promedio)	980 N
Fuerza total	3 575 N

Nota: Resultados de las fuerzas que intervienen.

Los resultados muestran que la resistencia a la rodadura representa aproximadamente el 43 % de la fuerza total requerida para el desplazamiento del vehículo, mientras que la resistencia aerodinámica adquiere mayor importancia conforme aumenta la velocidad.

Durante los procesos de aceleración, la fuerza de inercia incrementa significativamente la potencia requerida, evidenciando la necesidad de estrategias de conducción eficiente para reducir el consumo energético.

4.4 Demanda energética del vehículo

La integración de la potencia instantánea permite determinar la energía total requerida durante el recorrido.

Tabla 5*Resultados energéticos*

Parámetro	Resultado
Longitud ruta	31.46 km
Tiempo recorrido	48 min
Energía consumida	28.6 kWh
Consumo específico	1.20 kWh/km
Potencia promedio	36 kW
Potencia máxima	138 kW

Nota: Resultados obtenidos de los consumos energéticos

El consumo específico obtenido (1,20 kWh/km) se encuentra dentro del rango reportado para autobuses eléctricos urbanos de características similares (1,1–1,4 kWh/km).

Esto muestra que el modelo energético implementado representa adecuadamente el comportamiento del vehículo y permite estimar con suficiente precisión la demanda energética para rutas urbanas con frecuentes detenciones y aceleraciones.

4.5 Evaluación de la autonomía

A partir de la capacidad útil de la batería se estima la autonomía disponible.

Figura 25*Eficiencias*

Variables	Valor		
Eficiencia_gas	0,3		
Eficiencia_die	0,4		
PCI_gas	42500000	[J/kg]	LHV
PCI_die	44000000	[J/kg]	44MJ/kg
densidad_die	0,84	[kg/L]	
Ele_reg_%	0,2		

Tabla 6*Autonomía estimada*

Parámetro	Valor
Capacidad batería	314 kWh
Energía utilizada por recorrido	28.6 kWh
Número de recorridos posibles	10.98
Autonomía estimada	261 km

La autonomía obtenida supera ampliamente la distancia requerida por la ruta evaluada, permitiendo múltiples recorridos antes de requerir una recarga. Esto evidencia que el BYD K9G posee una capacidad energética suficiente para cubrir la demanda del transporte estudiantil diario bajo las condiciones analizadas.

4.6 Evaluación de la viabilidad técnica

Para determinar la viabilidad técnica se compara la potencia requerida con la potencia nominal del motor.

Tabla 7*Evaluación técnica*

Parámetro	Resultado
Potencia máxima requerida	138 kW
Potencia disponible	180 kW
Margen de seguridad	42 kW

Nota: Datos de la viabilidad técnica

La potencia disponible del sistema de tracción es superior a la máxima potencia demandada durante la simulación, garantizando una operación adecuada incluso en escenarios de aceleración intensa o pendientes moderadas. Esto confirma la factibilidad técnica del vehículo para operar en la ruta seleccionada.

4.7 Evaluación de la viabilidad energética

Se calcula el porcentaje de utilización de la batería.

$$IVE = \frac{28.6}{314} \times 100$$

$$IVE = 9.11\%$$

Tabla 8*Índice de utilización de batería*

Parámetro	Valor
Energía utilizada	28.6 kWh
Capacidad batería	314 kWh
Utilización	9.11 %

El porcentaje de utilización de la batería es inferior al 10 % por recorrido, lo que indica una amplia disponibilidad energética para realizar múltiples ciclos de operación sin necesidad de recarga intermedia. Este resultado demuestra la viabilidad energética del bus eléctrico para el servicio de transporte estudiantil analizado.

4.8 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos evidencian que el bus eléctrico BYD K9G presenta un desempeño técnico y energético adecuado para operar en una ruta urbana de transporte estudiantil en Guayaquil.

La demanda energética estimada se mantiene dentro de los rangos reportados en la literatura para autobuses eléctricos urbanos, mientras que la capacidad de la batería permite completar varios recorridos diarios con un margen suficiente de energía disponible.

El modelo implementado en MATLAB/Simulink permite representar de manera consistente la influencia de las resistencias aerodinámica, a la rodadura, por pendiente y de la energía cinética sobre el consumo energético del vehículo, constituyéndose en una herramienta útil para evaluar escenarios de operación y apoyar la planificación de sistemas de movilidad eléctrica.

En conjunto, los resultados confirman que la incorporación del BYD K9G en la ruta estudiada es técnicamente viable y energéticamente eficiente, además de contribuir a la

reducción de emisiones y al fortalecimiento de estrategias de transporte sostenible en la ciudad de Guayaquil.

Conclusiones

El análisis de la viabilidad técnica y energética de la implementación del bus eléctrico BYD K9G en una ruta urbana de transporte estudiantil de Guayaquil permite establecer que este tipo de vehículo constituye una alternativa técnicamente factible para este servicio. La caracterización de los parámetros físicos y dinámicos del autobús proporciona una representación adecuada de su comportamiento durante la operación, permitiendo desarrollar una base sólida para la simulación energética y el análisis de su desempeño.

La implementación del modelo energético en Simulink integra de forma adecuada las principales fuerzas que actúan sobre el vehículo, incluyendo la resistencia aerodinámica, la resistencia a la rodadura y la energía cinética asociada a los cambios de velocidad. El modelo permite estimar la demanda energética del bus bajo condiciones representativas de circulación urbana, demostrando que el perfil de conducción y las aceleraciones frecuentes son factores determinantes en el consumo de energía.

Los resultados obtenidos evidencian que la metodología empleada constituye una herramienta confiable para evaluar el desempeño energético de vehículos eléctricos antes de su implementación en rutas reales. Asimismo, los resultados aportan información técnica que puede ser utilizada para optimizar la planificación operativa, estimar requerimientos energéticos y apoyar la toma de decisiones relacionadas con la incorporación de buses eléctricos en sistemas de transporte estudiantil y urbano.

Recomendaciones

Se recomienda la validación del modelo energético mediante pruebas experimentales utilizando datos reales de operación del bus en la ruta estudiada, con el fin de comparar los resultados de simulación y ajustar los parámetros del modelo para mejorar su precisión.

En futuros estudios agregar variables adicionales como la ocupación del vehículo, el uso del sistema de aire acondicionado, las condiciones climáticas y el estado del pavimento, debido a su influencia directa sobre el consumo energético.

Evaluar la implementación de estrategias de conducción eficiente y el aprovechamiento del frenado regenerativo, con el propósito de reducir el consumo energético y aumentar la autonomía del vehículo durante la operación diaria.

Referencias

- Alegre, S., Míguez, J. V., & Carpio, J. (2017). Modelling of electric and parallel-hybrid electric vehicle using Matlab/Simulink environment and planning of charging stations through a geographic information system and genetic algorithms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1020-1027.
- Anderson, C. D., & Anderson, J. (2010). *Electric and hybrid cars: A history*. McFarland & Company.
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles* (3rd ed.). CRC Press.
- Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers (SAE).
- Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2013). *Vehicle propulsion systems: Introduction to modeling and optimization* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-5>
- Hucho, W.-H. (2013). *Aerodynamics of road vehicles* (5th ed.). SAE International. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02041-7>
- Larminie, J., & Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Liu, C.-C. (2017). *Electric vehicle integration into modern power networks*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2658-2>
- Molina Macías, H. A. (2025). *Estimación de la Influencia del Sistema de Aire Acondicionado en el Consumo de Combustible de un Vehículo SUV Usando un Dispositivo Azuga* (Doctoral dissertation, GUAYAQUIL/UIDE/2025).
- Miller, J. M. (2011). *Propulsion systems for hybrid vehicles* (2nd ed.). The Institution of Engineering and Technology.
- Rajamani, R. (2012). *Vehicle dynamics and control* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9>
- Sierra, J., & Restrepo, M. (2016). *Simulación de sistemas con MATLAB y Simulink*. Ecoe Ediciones.

- Torres, P. W. M., Berrezueta, M. F. G., & Mena, A. F. L. (2020). Análisis de la viabilidad para la implementación de vehículo eléctrico que preste servicio de taxi en la ciudad de Cuenca. *Innova research journal*, 5(3.2), 295-305.
- Wood, E., Burton, E., & Gonder, J. (2014). On-road evaluation of electric vehicle energy consumption. SAE International.
- Zhang, W., & Mi, C. (2018). Electric vehicle integration and optimization. Wiley-IEEE Press.