



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA SUSTITUCIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO
URBANO CONVENCIONAL POR EL USO DE TRANSPORTE ELÉCTRICO EN LA
CIUDAD DE LATACUNGA EN LA COMPAÑÍA DE TRANSPORTE SULTANA DE
COTOPAXI.**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

AUTORES:

Jeisson Anderson Pinargote Velásquez
Elvis Steeve Vásquez Tapia

TUTOR:

Ph.D. Secundino Marrero Ramírez

LATACUNGA, FEBRERO 2025

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA	i
DECLARACIÓN DE AUDITORÍA	ii
AVAL DE ACEPTACIÓN	iii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	iv
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. INFORMACION GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	2
2.1. SITUACIÓN PROBLÉMÁTICA	2
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	3
2.3.1. Objeto de investigación.....	3
2.3.2. Campo de acción.....	3
2.4. BENEFICIARIOS	3
2.4.1. Directos	3
2.4.2. Indirectos.....	3
2.5. JUSTIFICACIÓN.....	3
2.6. OBJETIVOS:.....	4
2.6.1. General:.....	4
2.6.2. Específicos:	4
2.6.3. SISTEMA DE TAREAS.....	4
2.7. HIPÓTESIS Y SISTEMA DE TAREAS	5

2.7.1. HIPÓTESIS:.....	5
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
3.1. MOVILIDAD URBANA	6
3.1.1. Transporte	6
3.1.2. Transporte terrestre de pasajeros.....	6
3.2. VEHÍCULO DE COMBUSTIÓN INTERNA	6
3.2.1. Hino AK.....	7
3.3. ELECTROMOVILIDAD	7
3.3.1. El vehículo eléctrico en el Ecuador.....	7
3.3.2. Tecnologías	8
3.3.3. Arquitectura vehículo híbrido	10
3.3.4. Componentes principales de vehículos eléctricos.....	12
3.3.5. Unidad de control de energía eléctrica (EPCU).....	14
3.3.6. Recarga de vehículos eléctricos	14
3.3.7. Costos operativos	16
3.3.8. Bus eléctrico.....	18
3.4. POLÍTICAS PÚBLICAS Y REGULACIONES.....	20
3.5. IMPACTO AMBIENTAL	21
3.5.1. Impacto energético, ambiental y social del transporte público.	21
3.6. FACTIBILIDAD ECONÓMICA	23
3.6.1. Análisis Costo-Beneficio	23
4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	24
4.1. NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	24
4.2. INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA	24
4.3. INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA	25
4.4. TIPO DE ESTUDIO.....	25

4.5.	GESTIÓN DE TAREAS	25
4.6.	OBTENCIÓN DE DATOS	26
4.6.1.	Identificación y análisis de la ruta con respecto a la red eléctrica	27
4.6.2.	Número de unidades, rutas y red eléctrica	27
4.7.	MODELO MATEMÁTICO E IMPLEMENTACIÓN EN PYTHON.....	29
4.7.1.	Conjuntos	29
4.7.2.	Índices	29
4.7.3.	Parámetros.....	29
4.7.4.	Variables de decisión	30
4.8.	VALIDACIÓN DEL MODELO	31
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	33
5.1.	PROGRAMACIÓN EN PYTHON	33
5.1.1.	Punto óptimo de convergencia.....	33
5.1.2.	Demanda energética vs. Demanda de combustión.....	34
5.2.	CASOS DE ESTUDIO CON RESPECTO A LAS CARGAS Y ALIMENTADORES A IMPLEMENTAR.....	35
5.2.1.	Caso en base al alimentador La Brigada – La Calera	37
5.2.2.	Caso en base al alimentador Yugsiloma – Alaquéz – San Buenaventura.....	40
5.2.3.	Transporte terrestre en Latacunga.....	41
5.2.4.	Viabilidad técnica de los buses	42
5.2.5.	Viabilidad económica	44
5.2.6.	Viabilidad ambiental	47
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
6.1.	CONCLUSIONES.....	52
6.2.	RECOMENDACIONES	53
7.	REFERENCIAS	54

8. ANEXOS ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.1. ANEXO 1 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.2. ANEXO 2 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.3. ANEXO 3 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.4. ANEXO 4 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.5. ANEXO 5 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.6. ANEXO 6 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.7. ANEXO 7 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.8. ANEXO 8 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.9. ANEXO 9 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.10. ANEXO 10 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.11. ANEXO 11 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.12. ANEXO 12 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.13. ANEXO 13 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.14. ANEXO 14 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.15. ANEXO 15 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.16. ANEXO 16 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.17. ANEXO 17 ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.18. ANEXO 18 Código en PYTHON (Parada optima de convergencia de rutas) ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.19. ANEXO 19 Código en PYTHON (Comparación de demanda energética de bus eléctrico y de bus convencional) ;**Error! Marcador no definido.**
- 8.20. ANEXO 20 Código en PYTHON (Calculo TIR y VAN);**Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MATRIZ DE ISHIKAWA.	2
FIGURA 2. TIPOS DE TECNOLOGÍA DE ELECTROMOVILIDAD EN VEHÍCULOS [16].	8
FIGURA 3. DIAGRAMA HÍBRIDO [29].	12
FIGURA 4. TREN MOTRIZ ELÉCTRICO [31].	12
FIGURA 5. MOTOR ELÉCTRICO [33].	13
FIGURA 6. TIPOS DE BATERÍA [17].	14
FIGURA 7. MODOS DE CARGA [39].	16
FIGURA 8. MODELO BUS ELÉCTRICO K9G [44].	19
FIGURA 9. BUS ELÉCTRICO B12 [45].	20
FIGURA 10. VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD ENERGÉTICA DESDE EL AÑO 2013 HASTA EL 2023 [50].	21
FIGURA 11. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD TOMADOS EN EL AÑO 2000, 2013 Y 2023 [50].	22
FIGURA 12. CONSUMO DE ENERGÍA POR SECTORES EN 2023 [50].	23
FIGURA 13. CONSUMO DE GASOLINA POR TIPO DE VEHÍCULO EN 2022 [50].	23
FIGURA 14. DIAGRAMA DE FLUJO.	26
FIGURA 15. RUTA ÓPTIMA PARA LA SUSTITUCIÓN.	33
FIGURA 16. COMPARACIÓN DE DEMANDA ENERGÉTICA POR BUSES ELÉCTRICOS VS. DEMANDA ENERGÉTICA POR BUSES CONVENCIONALES.	34
FIGURA 17. RUTA PATUTAN - LA LAGUNA.	35
FIGURA 18. ESPACIO PARA LA INSTALACIÓN.	35
FIGURA 19. RUTA BELLAVISTA – NIAGARA.	36
FIGURA 20. ESPACIO PARA LA INSTALACIÓN.	36
FIGURA 21. DIAGRAMA UNIFILAR DEL ALIMENTADOR LA BRIGADA - LA CALERA.	38
FIGURA 22. DIAGRAMA UNIFILAR DEL ALIMENTADOR LA BRIGADA - LA CALERA CON AUMENTO DEL PUNTO DE CARGA.	39
FIGURA 23. DIAGRAMA UNIFILAR DEL ALIMENTADOR YUGSILOMA - ALAQUÉZ - SAN BUENAVENTURA CON AUMENTO DEL PUNTO DE CARGA.	40
FIGURA 24. COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE RECORRIDO EN DISTINTOS HORARIOS.	42
FIGURA 25. RUTA EL SALTO - SALACHE.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 26. RUTA BELLAVISTA - NIAGARA.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 27. RUTA PATUTAN - LA LAGUNA.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 28. RUTA EL SALTO - YUGSILOMA.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 29. RUTA SAN JUAN - EL CLAVARIO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 30. RUTA PUSUCHISI - EL SALTO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 31. RUTA TILIPULO – LOCOA.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 32. RUTA SANTÁN – NUEVA VIDA.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 33. RUTA EL SALTO – CEYPSA.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 34. RUTA CHUGCHILAN – EL SALTO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

FIGURA 35. RUTA MAYORISTA – EL SALTO. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
 FIGURA 36. RUTA PICHUL – EL SALTO. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. SISTEMAS DE TAREAS.	4
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS SEGÚN SU GRADO DE HIBRIDACIÓN [18], [20], [21], [22], [23].	9
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DE LA ARQUITECTURA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS [24], [26], [27], [28].	11
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS DE BATERÍAS [34].	13
TABLA 5. COMPONENTES DE UNIDAD DE CONTROL DE ENERGÍA ELÉCTRICA [30], [35], [36].	14
TABLA 6. MODOS DE CARGA PARA LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.	15
TABLA 7: CARACTERÍSTICAS DE LOS BUSES ELÉCTRICOS.	20
TABLA 8. INFORMACIÓN TOPOLÓGICA Y DE RUTAS.	28
TABLA 9. LÍNEAS DE TRANSPORTE Y DISTANCIAS RECORRIDAS.	28
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS ALIMENTADOR PATUTAN.	38
TABLA 11. CARACTERÍSTICAS ALIMENTADOR BELLAVISTA.	40
TABLA 12. MODALIDADES DE SERVICIO DE LAS DIFERENTES FLOTAS EN COTOPAXI.	41
TABLA 13. TIEMPOS DE DURACIÓN POR RECORRIDO.	42
TABLA 14. COMPARACIONES TÉCNICAS DE LOS BUSES.	43
TABLA 15. COSTOS DE AMORTIZACIÓN DE LAS UNIDADES.	45
TABLA 16. PRECIO DE LA UNIDAD, TIR Y VAN.	45
TABLA 17. COSTOS DE INVERSIÓN.	46
TABLA 18. TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN.	47
TABLA 19. RESUMEN RUTAS DE SULTANA DE COTOPAXI.	48
TABLA 20. EMISIONES DE CO ₂ EN TODAS LAS RUTAS.	49
TABLA 21. EMISIONES ANUALES DE CO ₂ POR UNIDAD POR RUTA.	50
TABLA 22. EMISIONES DE CO ₂ POR CARGA Y DIÉSEL.	50
TABLA 23. COMPARACIÓN DE TIPOS DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS [24].	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA 24. TIPO DE RECARGA [37].	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA 25. TIPOS DE CONECTORES [40].	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA 26. FÓRMULAS PARA LOS COSTOS VARIABLES.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA 27. MARCO NORMATIVO NACIONAL Y LOCAL HACIA LA TRANSICIÓN DE BUSES ELÉCTRICOS [62].	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA

Estimado


Mg. Mauro Albarracín Álvarez

DECANO F-CIYA

Presente.

Yo **Jeisson Anderson Pinargote Velásquez**, con cedula de ciudadanía N° 235005166-6 , estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electricidad declaramos se autores de la presente propuesta tecnológica: **“Estudio de factibilidad para la sustitución de transporte público urbano convencional por el uso de transporte eléctrico en la ciudad de Latacunga en la Compañía de Transporte Sultana de Cotopaxi”**, siendo el Ph.D. Secundino Marrero Ramírez, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimiento y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo.



Jeisson Anderson Pinargote Velásquez
C.C.: 23005166-6

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA

Estimado

Mg. Mauro Albarracín Álvarez

DECANO F-CIYA

Presente.

Yo **Elvis Steeve Vásquez Tapia**, con cedula de ciudadanía N° **050246383-9**, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electricidad declaramos se autores de la presente propuesta tecnológica: **“Estudio de factibilidad para la sustitución de transporte público urbano convencional por el uso de transporte eléctrico en la ciudad de Latacunga en la Compañía de Transporte Sultana de Cotopaxi”**, siendo el Ph.D. Secundino Marrero Ramírez, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimiento y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo.



Elvis Steeve Vásquez Tapia


C.C.: 050246383-9

AVAL DE ACEPTACIÓN

Mediante el presente pongo a consideración que los estudiantes **PINARGOTE VELÁSQUEZ JEISSON ANDERSON** y **VÁSQUEZ TAPIA ELVIS STEEVE** realizaron su tesis a beneficio de la UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI con el tema: **“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA SUSTITUCIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO CONVENCIONAL POR EL USO DE TRANSPORTE ELÉCTRICO EN LA CIUDAD DE LATACUNGA EN LA COMPAÑÍA DE TRANSPORTE SULTANA DE COTOPAXI”**, trabajo que fue presentado y aprobado de manera satisfactoria.

Latacunga, febrero 2025

El Tutor:


Ph.D. Secundino Marrero Ramírez
C.C.: 175710790-7


AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad del Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA SUSTITUCIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO CONVENCIONAL POR EL USO DE TRANSPORTE ELÉCTRICO EN LA CIUDAD DE LATACUNGA EN LA COMPAÑÍA DE TRANSPORTE SULTANA DE COTOPAXI”, de los estudiantes: **Pinargote Velásquez Jeisson Anderson y Vásquez Tapia Elvis Steeve** de la carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dio Informe de Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicos-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, febrero de 2025

El Tutor:



Ph.D. Secundino Marrero Ramirez
C.C.: 175710790-7

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Proyecto de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y, por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Pinargote Velásquez Jeisson Anderson y Vásquez Tapia Elvis Steeve, con el título del Proyecto de Investigación: “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA SUSTITUCIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO CONVENCIONAL POR EL USO DE TRANSPORTE ELÉCTRICO EN LA CIUDAD DE LATACUNGA EN LA COMPAÑÍA DE TRANSPORTE SULTANA DE COTOPAXI”, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 19 de febrero de 2025.

Para constancia firman:



Lector 1 (Presidente)
Ing. Pesantez Palacios Gabriel Napoleón MSc.
CC: 030189388-9



Lector 2
Ing. Constante Segura Joffre Remigio Mg.
CC: 172186257-9



Lector 3
Ing. Mullo Pallo Mauricio Eduardo Mg.
CC: 050375518-3

AGRADECIMIENTO

En el proceso de elaboración de esta tesis, he contado con el apoyo y la colaboración de varias personas e institución, a quienes quiero expresar mi más sincero agradecimiento.

A Ph.D. Secundino Marrero, por su dedicación y orientación experta. Su guía ha sido invaluable para el desarrollo de este trabajo.

A los miembros del tribunal de evaluación, Mg. Napoleón Pesantez, Mg. Joffre Constante y Mg. Mauricio Mullo, por sus comentarios y sugerencias que han mejorado significativamente este documento.

A mi compañero de investigación y colega, Elvis Vásquez, por su colaboración y apoyo mutuo, que han sido fundamentales para avanzar en este proyecto.

A mi familia y amigos, gracias por su paciencia y apoyo incondicional. Su motivación ha sido crucial para superar los desafíos durante este proceso.

Finalmente, agradezco a la Cooperativa de Transporte Sultana de Cotopaxi por el apoyo institucional y los recursos proporcionados, que han sido esenciales para llevar a cabo esta investigación.

Atentamente, Jeisson Pinargote

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido significativamente a la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco profundamente a mi Tutor de tesis, Ph.D. Segundino Marrero, por su guía experta, apoyo constante y dedicación durante todo el proceso de investigación. Su orientación y retroalimentación han sido fundamentales para mejorar la calidad de este trabajo.

También quiero agradecer a los miembros del tribunal de evaluación, Mg. Napoleón Pesantez, Mg. Joffre Constante y Mg. Mauricio Mullo, por su valiosa revisión y comentarios constructivos, que han enriquecido este documento.

A mi compañero de investigación y colega, Jeisson Pinargote, gracias por su colaboración y apoyo mutuo. Sus contribuciones y discusiones han sido esenciales para avanzar en este proyecto.

A mi familia y amigos, gracias por su paciencia, amor y apoyo incondicional. Sin su comprensión y motivación, este logro no hubiera sido posible.

Finalmente, agradezco a la institución que han proporcionado los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación, Cooperativa de Transporte Sultana de Cotopaxi. Su apoyo ha sido crucial para el éxito de este proyecto.

Atentamente, Elvis Vásquez

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a:

Dios por haber permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

Mi madre, Carmen Velásquez, por poner en mí toda su fe y confianza para ver este sueño hecho realidad. Y a mi padre, Agustín Pinargote, por ser un ejemplo de perseverancia y constancia, cuyos valores y fortaleza para salir adelante siempre me han inspirado.

Mis hermanos/as Emerson, Verónica por estar presente en cada momento. Por darme su apoyo, amistad y por su confianza.

Mi cuñado Eric y mis sobrinos Iker, Ian e Iris por permanecer a mi lado darme todo su apoyo.

Mi novia Jessenia por acompañarme en cada paso que e dado.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi por permitirme lograr dar un paso más hacia el éxito. Por convertirme en un profesional competitivo, llena de conocimientos y expectativas. También quiero agradecer de manera muy especial a todos esos maestros docentes por darme una formación profesional en calidad para formarme como Ingeniero muchas gracias.

Atentamente, Jeisson Pinargote

Dedico este proyecto a:

Dios por su misericordia el permitirme llegar hasta este punto tan importante en mi vida.

Mis padres, Leopoldo y Laura, por mostrarme el camino hacia la superación.

Mis hermanos, Rosa y Stefano, por brindarme su tiempo y un hombro donde descansar.

Mi sobrino, Joel, por las palabras de apoyo.

Mi novia, Mayra, por estar a mi lado en cada paso que doy.

Mis amigos por permitirme aprender más de la vida a su lado.

Mis docentes por proporcionar una formación profesional de calidad.

Esto es posible gracias a ustedes.

Atentamente, Elvis Vásquez

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

TÍTULO: “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA SUSTITUCIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO CONVENCIONAL POR EL USO DE TRANSPORTE ELÉCTRICO EN LA CIUDAD DE LATACUNGA EN LA COMPAÑÍA DE TRANSPORTE SULTANA DE COTOPAXI.”

Autores:

Pinargote Velásquez Jeisson Anderson

Vásquez Tapia Elvis Steeve

RESUMEN

Este estudio evalúa la viabilidad de sustituir el transporte público urbano convencional en Latacunga, dependiente de combustibles fósiles, por una flota de buses eléctricos, promoviendo la sostenibilidad ambiental y la eficiencia energética. Se utilizó un enfoque metodológico integral que combinó la revisión de literatura sobre electromovilidad, políticas públicas y evaluación ambiental, con un análisis técnico y económico de la transición. Se emplearon herramientas como Python y PowerFactory para modelar el comportamiento de las cargas eléctricas en los alimentadores La Brigada – La Calera y Yugsiloma – Alaquéz – San Buenaventura, con el objetivo de dimensionar la infraestructura de carga necesaria. Los resultados confirman la viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto, evidenciando una reducción significativa de emisiones contaminantes y menores costos operativos a largo plazo. Asimismo, se resalta la importancia de invertir estratégicamente en infraestructura de carga y explorar fuentes de financiamiento para acelerar la transición a la electromovilidad en Latacunga. La implementación de esta tecnología representa una alternativa sostenible y eficiente, alineada con las tendencias globales de movilidad limpia, contribuyendo a mejorar la calidad del aire y optimizar el sistema de transporte urbano en la ciudad.

Palabras clave: Transporte urbano, electromovilidad, buses eléctricos, viabilidad técnica, viabilidad económica, viabilidad ambiental, modelado.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES
ELECTRICAL ENGINEERING CAREER

TITLE: "FEASIBILITY STUDY FOR THE SUBSTITUTION OF CONVENTIONAL URBAN PUBLIC TRANSPORT FOR THE USE OF ELECTRIC TRANSPORT IN THE CITY OF LATACUNGA IN THE TRANSPORT COMPANY SULTANA DE COTOPAXI."

Authors:

Pinargote Velásquez Jeisson Anderson
Vásquez Tapia Elvis Steeve

ABSTRACT

This study evaluates the feasibility of replacing conventional urban public transport in Latacunga, dependent on fossil fuels, with a fleet of electric buses, promoting environmental sustainability and energy efficiency. A comprehensive methodological approach was used, combining a literature review on electromobility, public policies, and environmental assessment, with a technical and economic analysis of the transition. Tools such as Python and PowerFactory were used to model the behavior of electrical loads on La Brigada - La Calera and Yugsiloma - Alaquéz - San Buenaventura feeders, with the objective of sizing the necessary load infrastructure. The results confirm the technical, economic, and environmental feasibility of the project, showing a significant reduction in polluting emissions and lower operating costs in the long term. It also highlights the importance of investing strategically in charging infrastructure and exploring funding sources to accelerate the transition to electromobility in Latacunga. The implementation of this technology represents a sustainable and efficient alternative, aligned with global trends in clean mobility, contributing to improving air quality and optimizing the urban transport system in the city.

Keywords: Urban transport, electromobility, electric buses, technical feasibility, economic feasibility, environmental feasibility, modelling.

1. INFORMACION GENERAL

Tema: Estudio de factibilidad para la sustitución de transporte público urbano convencional por el uso de transporte eléctrico en la ciudad de Latacunga en la Compañía de Transporte Sultana de Cotopaxi.

Tipo de Proyecto: Proyecto de Investigación

Carrera: Ingeniería en Electricidad

Proyecto de investigación vinculado: Estrategias de planeación de sistemas eléctricos de distribución en el contexto de la transición energética.

Equipo de Trabajo:

- Ph.D. Marrero Ramírez Secundino
- Pinargote Velásquez Jeisson Anderson
- Vásquez Tapia Elvis Steeve

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industrias y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Energías alternativas y renovables; eficiencia energética y protección ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera: Diseño, construcción y explotación eficiente de diseños eléctricos con energía convencional y alternativa.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. SITUACIÓN PROBLÉMÁTICA

En Europa, el mercado de autobuses eléctricos está en auge, con más de 10.271 unidades BEV en circulación. Solaris lidera el mercado, seguido de cerca por MAN y BYD/Alexander Dennis. Reino Unido, Alemania y Holanda encabezan la adopción de flotas eléctricas. España, con Solaris a la vanguardia, avanza en la electrificación de su transporte público [1].

En América Latina, la electromovilidad en el transporte público ofrece grandes beneficios, reduciendo emisiones y ahorrando en combustible. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos significativos. En Cuenca, Ecuador, la transición hacia la movilidad eléctrica requiere superar la resistencia al cambio y abordar los costos de infraestructura [2].

La sustitución del transporte convencional por vehículos eléctricos en Latacunga presenta una oportunidad para reducir la contaminación y mitigar el cambio climático. Sin embargo, se requiere un análisis detallado de la viabilidad financiera, considerando los costos iniciales, los ahorros a largo plazo y la necesidad de una infraestructura de carga adecuada [3].

En la Figura 1 se puede identificar la matriz de Ishikawa que nos menciona que el uso de combustibles fósiles es un problema complejo con raíces en múltiples áreas. No es solo una cuestión de tecnología, sino también de cómo la gente piensa y actúa, de las políticas que se implementan, y de los materiales disponibles. Factores como la falta de conocimiento, el temor al cambio, tecnologías poco confiables, procesos complicados, políticas desfavorables y costos elevados, contribuyen a que sigamos dependiendo de los combustibles fósiles, a pesar de sus efectos negativos en el medio ambiente.



Figura 1. Matriz de Ishikawa.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Por la falta de estudios y análisis al transporte eléctrico muestra la dependencia de combustibles fósiles en el transporte público convencional en Latacunga, generando una resistencia significativa hacia la transición.

2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1. Objeto de investigación

Sistema de transporte público.

2.3.2. Campo de acción

3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 330601 Utilización de la Corriente Continua / 330602 Aplicaciones Eléctricas.

2.4. BENEFICIARIOS

2.4.1. Directos

Compañía de Transporte Sultana de Cotopaxi

2.4.2. Indirectos

Usuarios del transporte

2.5. JUSTIFICACIÓN

Se fundamenta en la necesidad de abordar los desafíos que enfrenta el transporte público en la ciudad, así como en los beneficios potenciales que la implementación de transporte eléctrico podría ofrecer.

En primer lugar, el transporte público convencional basado en combustibles fósiles contribuye significativamente a la contaminación del aire y al cambio climático, afectando la salud de los ciudadanos y el medio ambiente. La sustitución de este tipo de transporte por vehículos eléctricos reduciría drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero y mejoraría la calidad del aire en la ciudad.

Además, la adopción de transporte eléctrico podría reducir los costos operativos a largo plazo, ya que los vehículos eléctricos tienen un menor costo de mantenimiento y son más eficientes en términos de

consumo de energía. Esto podría traducirse en ahorros para las autoridades locales y para los usuarios del transporte público.

Por otro lado, la implementación de transporte eléctrico podría contribuir a la diversificación de la matriz energética de la ciudad, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y promoviendo el uso de energías limpias y renovables.

2.6. OBJETIVOS:

2.6.1. General:

Evaluar cómo la sustitución del transporte público urbano convencional por vehículos eléctricos en las rutas Bellavista – Niagara y Patutan – La Laguna operadas por la compañía de transporte urbano Sultana de Cotopaxi en la ciudad de Latacunga puede reducir la contaminación ambiental.

2.6.2. Específicos:

- Indagar tendencias de las tecnologías del transporte eléctrico urbano.
- Analizar características de las líneas del transporte de caso de estudio y requerimientos operativos.
- Evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto.

2.6.3. SISTEMA DE TAREAS

Tabla 1. Sistemas de tareas.

Objetivos Específicos	Actividades (Tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Indagar tendencias de las tecnologías del transporte eléctrico urbano.	Realización de una revisión exhaustiva de estudios, informes y documentos técnicos relacionados con las últimas tendencias en tecnologías de transporte eléctrico urbano.	Desarrollo del marco teórico sobre los tipos de vehículos eléctricos, sistemas de carga, baterías en el transporte eléctrico urbano.	Revisión de literatura, investigación de mercado.
	Identificación y evaluación de las características de las rutas de transporte público existentes en Latacunga, incluyendo longitud, topografía, patrones de demanda, y horarios de operación.	Análisis de los parámetros en la compañía, como la demanda de pasajeros, distancias recorridas, y tiempos de operación.	Análisis de datos de operación, estudios de demanda, entrevistas con operadores.

Objetivos Específicos	Actividades (Tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Analizar características de las líneas del transporte de caso de estudio y requerimientos operativos.	Recopilación de datos sobre las rutas de transporte público en Latacunga.	Análisis detallado de la longitud, topografía, patrones de demanda y horarios de operación.	Análisis de datos de operación, estudios de demanda, entrevistas con operadores.
	Evaluación de la infraestructura existente y necesidades de mejora.	Identificación de áreas de mejora para la implementación del transporte eléctrico.	Análisis de datos de operación, estudios de demanda, entrevistas con operadores.
Evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto.	Evaluación de la viabilidad técnica de la implementación de transporte eléctrico en Latacunga, considerando la disponibilidad de infraestructura de carga, la capacidad de la red eléctrica y la adecuación de las rutas y paradas.	Estudio de la capacidad de la red eléctrica de la ciudad para soportar la demanda adicional de energía que implicaría la implementación de transporte eléctrico.	Análisis técnico, estudios de capacidad de la red eléctrica.
	Recolección de datos sobre los costos actuales de inversión, operación y mantenimiento del transporte público convencional en Latacunga.	Obtener información detallada y actualizada sobre los costos asociados al sistema de transporte público convencional en la ciudad de Latacunga.	Recopilación de información, análisis de costos.
	Análisis del impacto ambiental de la implementación del transporte eléctrico en Latacunga, considerando la reducción de emisiones contaminantes.	Estimación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como resultado de la transición al transporte eléctrico.	Evaluación de impacto ambiental, modelado de emisiones.

2.7. HIPÓTESIS Y SISTEMA DE TAREAS

2.7.1. HIPÓTESIS:

Si se sustituye el transporte público urbano convencional por vehículos eléctricos en las rutas Bellavista - Niagara y Patután - La Laguna operadas por la compañía de transporte urbano Sultana de Cotopaxi en Latacunga, entonces se podrá lograr una reducción significativa en los niveles de contaminación ambiental en la ciudad.

Variable dependiente: Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Variable independiente: Tipo de vehículo utilizado.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. MOVILIDAD URBANA

La movilidad urbana se refiere a la capacidad de las personas para acceder a los lugares donde se ofrecen servicios y oportunidades, lo que puede lograrse mejorando el sistema de transporte o reduciendo las distancias a recorrer. Este concepto abarca diversas prácticas sociales relacionadas con el desplazamiento diario, residencial y profesional, así como el movimiento de bienes y personas. La Organización de las Naciones Unidas, a través de UNHABITAT, promueve la idea de una movilidad urbana sostenible, que busca satisfacer las necesidades actuales de movilidad en las ciudades sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. Para lograr esto, es fundamental considerar aspectos económicos, ambientales y sociales en el desarrollo de sistemas de transporte que sean accesibles y eficientes [4].

3.1.1. Transporte

Dado que las personas realizan diversas actividades a lo largo de su vida diaria, el transporte tiene como objetivo satisfacer las necesidades humanas facilitando el traslado de individuos y bienes [5].

El transporte no se puede considerar únicamente como una actividad económica derivada o secundaria que permite satisfacer las necesidades primarias de las personas. Por el contrario, es una actividad que prevalece, venciendo obstáculos de espacio y tiempo, con la finalidad de integrar territorios y sociedades para que logren sistemas productivos, asegurando la accesibilidad universal y generando patrimonio y puestos de trabajo [6].

3.1.2. Transporte terrestre de pasajeros

Se entiende por servicio de transporte terrestre de pasajeros, a la actividad de trasladar o llevar personas o clientes de un lugar a otro en un vehículo motorizado, a través de las carreteras, caminos o red vial terrestre [7].

3.2. VEHÍCULO DE COMBUSTIÓN INTERNA

Un motor es, en términos generales, un dispositivo diseñado para convertir diferentes tipos de energía en energía mecánica. Dentro de esta categoría, encontramos el motor térmico, que se especializa en transformar la energía térmica presente en un fluido compresible en energía mecánica.

Este tipo de motor aprovecha el calor para generar movimiento, lo que lo convierte en una herramienta fundamental en diversas aplicaciones industriales y de transporte. Su funcionamiento se basa en la manipulación de fluidos que pueden comprimirse, lo que permite obtener la energía necesaria para realizar trabajo mecánico [8], [9].

3.2.1. Hino AK

El chasis Hino AK8JRSA es fundamental para el rendimiento y la seguridad de los autobuses interprovinciales. Su diseño está pensado para soportar tanto las cargas dinámicas como las estáticas que se generan durante su uso. Un análisis exhaustivo del chasis es esencial, ya que permite entender cómo interactúa con la carrocería y las fuerzas que actúan sobre él. Para ello, se utilizan técnicas de simulación y análisis por elementos finitos, que ayudan a evaluar su resistencia y detectar posibles puntos débiles que podrían afectar su estructura. Este tipo de estudio no solo optimiza el funcionamiento mecánico del chasis, sino que también contribuye a prolongar la vida útil del autobús, garantizando así un transporte más seguro y eficiente [10].

3.3. ELECTROMOVILIDAD

La electromovilidad es una forma innovadora de transporte que utiliza energía eléctrica para impulsar una amplia variedad de vehículos, desde trenes y tranvías hasta automóviles, autobuses, camiones, bicicletas y scooters eléctricos. Esto no solo incluye el transporte público y privado, sino también nuevas formas de micromovilidad como monopatines y hoverboards. Al cambiar de motores de combustión a energía eléctrica, la electromovilidad promueve un transporte más sostenible y eficiente, reduciendo las emisiones contaminantes y mejorando la calidad del aire en las ciudades. Además, se entiende como una industria interconectada que busca abordar las necesidades de transporte de manera sostenible, comprometida con soluciones eficientes y respetuosas con el medio ambiente. En última instancia, la electromovilidad refleja un compromiso con un futuro más ecológico y saludable, donde la tecnología, la cultura y las prácticas sociales se entrelazan para crear un sistema sociomaterial complejo [11], [12], [13], [14].

3.3.1. El vehículo eléctrico en el Ecuador

En Ecuador, se están realizando cambios significativos en la matriz energética, impulsados por la construcción de nuevas hidroeléctricas. Esto ha abierto la posibilidad de considerar el uso de vehículos eléctricos, que son más amigables con el medio ambiente y no generan emisiones

contaminantes. Sin embargo, el uso de vehículos eléctricos aún enfrenta obstáculos debido a la preferencia tradicional de la población por los autos de combustión interna.

Un desafío importante es la falta de estudios que analicen de manera comparativa los costos operativos entre los vehículos de combustión interna y los eléctricos. Además, existe un desconocimiento general sobre los gastos asociados a cada kilómetro recorrido en ambos tipos de vehículos [15].

3.3.2. Tecnologías

A continuación, se presenta un panorama sobre el estado actual de los vehículos de propulsión eléctrica. Primero, se definirá qué son las distintas tecnologías disponibles en este ámbito y se explicará de manera sencilla cómo funcionan. Después, se ofrecerá una descripción de los componentes que conforman un vehículo eléctrico, así como las diversas tecnologías que se utilizan en ellos como se puede observar en la Figura 2.

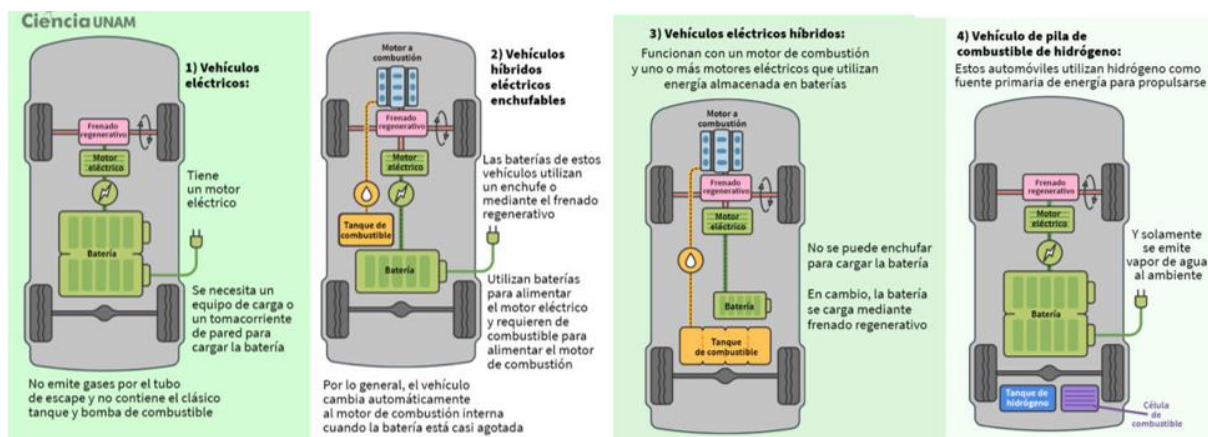


Figura 2. Tipos de tecnología de electromovilidad en vehículos [16].

3.3.2.1. Vehículo eléctrico puro (BEV)

Los vehículos 100 % eléctricos son una excelente opción para aquellos que buscan reducir su huella ecológica, ya que funcionan exclusivamente con energía eléctrica almacenada en baterías, sin emitir gases contaminantes y ofreciendo un funcionamiento silencioso y con menos vibraciones. Además, son más eficientes gracias al frenado regenerativo, que recupera parte de la energía al frenar. Sin embargo, también tienen sus desventajas: las baterías son costosas, pesadas y ofrecen una autonomía limitada, lo que los hace más adecuados para trayectos cortos. A pesar de esto, su mantenimiento a largo plazo es menor que el de los vehículos de combustión interna [17].

3.3.2.2. Vehículo eléctrico híbrido (HEV)

Un vehículo híbrido eléctrico es básicamente un coche que combina dos fuentes de energía: un motor eléctrico y uno de combustión. Esto le permite aprovechar las ventajas de ambos sistemas, como reducir las emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia del combustible. A diferencia de los vehículos eléctricos puros, los híbridos no dependen exclusivamente de puntos de recarga, ya que su motor de combustión les permite recorrer distancias más largas. Sin embargo, esto también significa que emiten más CO₂ que los vehículos totalmente eléctricos. En resumen, los vehículos híbridos ofrecen un equilibrio entre sostenibilidad y autonomía, lo que los hace atractivos para aquellos que buscan una opción más ecológica sin renunciar a la libertad de viajar largas distancias sin preocuparse por la recarga [17], [18], [19].

Según el grado de hibridación tenemos las diferentes clasificaciones de vehículos híbridos como se puede evidenciar en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los vehículos eléctricos según su grado de hibridación [18], [20], [21], [22], [23].

Característica	Micro Híbrido (Micro HEV)	Hibridación Leve o Mild Hybrid (MHEV)	Híbrido Puro o Completo (Full HEV)	Híbrido Enchufable (Plug-in PHEV)
Motor Eléctrico	No impulsa el vehículo; usa un alternador reversible o motor de arranque reforzado.	Asiste al motor de combustión interna.	Permite que el motor de combustión interna sea más pequeño; puede funcionar exclusivamente con energía eléctrica.	Combina un motor eléctrico y un motor de combustión interna para funcionar eficientemente.
Batería	Puede incluir una batería adicional o condensadores.	Batería de alta tensión; se alimenta de la energía de frenado.	Baterías de mayor tamaño en comparación con micro y mild HEV.	Baterías más grandes que los HEV convencionales, proporcionando una autonomía eléctrica de 16 a 65 km (o más en modelos recientes).
Funcionamiento	Apaga el motor cuando el vehículo se detiene (Start/Stop).	Motor de combustión siempre encendido, al menos en ralentí.	Puede operar solo con el motor eléctrico encendido, mientras el motor de combustión permanece apagado.	Puede operar principalmente con energía eléctrica en entornos urbanos; el motor de combustión entra en acción cuando la batería se

Característica	Micro Híbrido (Micro HEV)	Hibridación Leve o Mild Hybrid (MHEV)	Híbrido Puro o Completo (Full HEV)	Híbrido Enchufable (Plug-in PHEV)
				agota o se necesita más potencia.
Recarga	Recupera energía justo antes de que el motor se detenga.	Se recarga durante las frenadas y retenciones.	Recarga a través de frenos regenerativos y del funcionamiento del motor térmico.	Se recarga conectándolo a la red eléctrica o mediante el motor de combustión y el frenado regenerativo.
Consumo/Emisiones	Ahorro de combustible de aproximadamente el 8% en entornos urbanos.	Reduce el consumo y emisiones en comparación con vehículos no híbridos.	Permite reducir el tamaño del motor de combustión interna, maximizando la eficiencia.	Permite reducir emisiones a cero en entornos urbanos mientras la batería esté cargada; mayor flexibilidad y eficiencia en el uso de combustible.
Ventajas	Económicos, ligeros, etiqueta ECO.	Mayor eficiencia gracias al sistema de regeneración.	Autonomía total en su operación.	Mayor flexibilidad y eficiencia en el uso de combustible.

En el Anexo 1, se presenta la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** según [24] resume las características más relevantes de los distintos tipos de vehículos híbridos. Esta clasificación incluye información sobre la potencia eléctrica, el ahorro de combustible, el incremento de costo, las características añadidas y ejemplos representativos de cada categoría.

3.3.3. Arquitectura vehículo híbrido

La arquitectura de un vehículo híbrido se refiere a cómo se conectan y organizan los diferentes subsistemas del vehículo para aprovechar sus fuentes de energía y moverlo de manera eficiente. Dependiendo de su diseño, los vehículos híbridos se pueden clasificar en tres tipos: híbridos en serie como se observa en la Figura 3-a), híbridos en paralelo como se observa en la Figura 3-b) y híbrido en serie/paralelo como se observa en la Figura 3-c) [25]. En la Tabla 3 se puede evidencia un resumen de las características de las diferentes arquitecturas.

Tabla 3. Características de la arquitectura de vehículos eléctricos [24], [26], [27], [28].

Característica	Híbrido en Serie	Híbrido en Paralelo	Híbrido en Serie-Paralelo
Motor de Combustión Interna (MCI)	Funciona como generador eléctrico; no está conectado directamente a las ruedas.	Trabaja independientemente con el motor eléctrico para maximizar la potencia en las ruedas. Se activa cuando se necesita más energía.	Combina MCI y motor eléctrico para proporcionar potencia.
Motor Eléctrico	Impulsa el vehículo; recibe energía del generador accionado por el MCI.	Trabaja independientemente con el MCI. Permite que las baterías sean más pequeñas, ya que el MCI apoya en los picos de demanda energética.	Impulsa el vehículo y actúa como generador para recargar la batería.
Conexión a las Ruedas	El motor eléctrico impulsa las ruedas.	Ambos motores (MCI y eléctrico) pueden impulsar las ruedas.	Ambos motores (MCI y eléctrico) proporcionan potencia a las ruedas.
Recarga de Batería	El MCI acciona un generador que recarga la batería.	Se recarga al frenar, aprovechando la energía cinética.	El motor eléctrico puede recargar la batería, pero no simultáneamente mientras impulsa el vehículo. Recupera energía durante el frenado.
Eficiencia	Puede ser menos eficiente debido a la conversión de energía mecánica a eléctrica.	Minimiza las pérdidas de energía al evitar la conversión de energía mecánica a eléctrica.	Optimiza el uso de ambos motores.
Componentes Adicionales			Incluye un motor generador en el cigüeñal que actúa como alternador, motor de arranque y amortiguador de vibraciones.
Complejidad		Sistema mecánico complejo.	Diseño complejo que puede dificultar la gestión de energía y la recarga de la batería en ciertas situaciones.

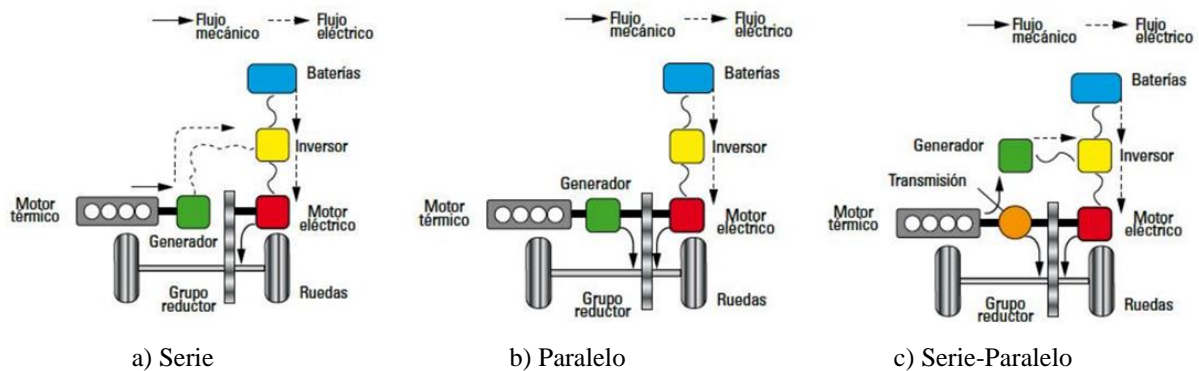


Figura 3. Diagrama Híbrido [29].

3.3.4. Componentes principales de vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos cuentan con varios componentes clave para su funcionamiento eléctrico, entre los que se incluyen el motor, la batería, el cargador a bordo y la unidad de control de energía eléctrica (EPCU). Cada uno de estos elementos es fundamental para el sistema. Además, hay un bloque de conexiones de alto voltaje que permite convertir la electricidad almacenada en la batería en la fuerza cinética necesaria para mover el vehículo, utilizando también un engranaje reductor [30].

Se puede observar que el bloque de conexiones es el tren motriz de la Figura 4.



Figura 4. Tren motriz eléctrico [31].

3.3.4.1. Motor eléctrico

Los motores eléctricos son dispositivos que convierten energía eléctrica en energía mecánica, se puede observar en la Figura 5. Se pueden clasificar principalmente en dos categorías: motores de corriente continua y motores de corriente alterna, que a su vez se dividen en síncronos y asíncronos o de inducción.

El uso eficiente de estos motores implica operarlos solo cuando es necesario, ajustándose a las condiciones de producción. Para reducir el consumo energético, se implementan controles que apagan los motores cuando no están en uso [32].



Figura 5. Motor eléctrico [33].

3.3.4.2. Almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía más comúnmente utilizado es la batería, aunque también se pueden emplear fuentes auxiliares como los supercondensadores y las pilas de combustible. Las baterías son dispositivos que almacenan energía a través de reacciones químicas en sus celdas electroquímicas, convirtiendo esta energía química en eléctrica. Para determinar la idoneidad de una batería en un vehículo eléctrico, se consideran varios factores clave: su capacidad, que se mide en amperios-hora; el tiempo que necesita para recargarse; y su costo. Estos aspectos son esenciales para evaluar su rendimiento y viabilidad en aplicaciones automotrices [32].

En la Tabla 4 se presentan únicamente las baterías más comunes en la actualidad. Se ha añadido la gasolina para hacer una comparación y también se incluyen los ultracondensadores, aunque no sean baterías en sentido estricto [34].

Tabla 4. Características de baterías [34].

Tipo de batería	Coste (\$/Wh)	Densidad de energía (Wh/Kg)	Ciclos de vida	Rango de temperatura
Plomo-ácido	0,15	41	500	-30-50
NiMH	0,84	95	800	-40-50
NiCad	1,26	39	800	-40-50
Lithium-ion	0,37	128	1000	-40-60
Ultracondensadores	52518,50	5	500000	-40-85
Gasolina	$0,16 \times 10^{-3}$	12700	1	

Cada tipo de batería tiene sus propias ventajas y desventajas, dependiendo de cómo se vayan a utilizar. Las baterías de iones de litio son una opción muy equilibrada, ya que ofrecen un buen costo, alta densidad energética y una larga vida útil. Por otro lado, los ultracondensadores son perfectos para aplicaciones que necesitan una gran durabilidad. En cuanto a la gasolina, aunque tiene una alta densidad energética y es económica, su impacto ambiental y cuestiones de sostenibilidad son aspectos muy importantes que debemos considerar hoy en día.

En la Figura 6 se puede evidenciar los tipos de batería según su composición.



a) Batería plomo-ácido

b) Batería Ni-cd

c) Batería Ni-MH

Figura 6. Tipos de batería [17].

3.3.5. Unidad de control de energía eléctrica (EPCU)

Para facilitar la comprensión de los componentes críticos que conforman la EPCU, se presenta la Tabla 5 que resume sus funciones principales. A través de esta información, se puede apreciar cómo cada componente contribuye al rendimiento general del sistema eléctrico.

Tabla 5. Componentes de unidad de control de energía eléctrica [30], [35], [36].

Componente	Descripción
Inversor	Convierte la corriente continua (CC) de la batería en corriente alterna (CA) para el motor eléctrico, permitiendo la aceleración y desaceleración. Actúa como un interruptor electrónico que cambia la polaridad de la corriente constantemente.
Convertidor (LDC)	Transforma la alta tensión de 360 V de la batería a un voltaje más bajo de 12 V, necesario para alimentar los componentes eléctricos auxiliares del vehículo.
Unidad de Control del Vehículo (VCU)	Controlador del tren motriz que recopila señales de diversos componentes, como el pedal del acelerador y del freno. Emite juicios para controlar otros sistemas del vehículo y gestiona su estado operativo a través del bus CAN (Controller Area Network).

3.3.6. Recarga de vehículos eléctricos

Hay tres aspectos clave que debemos considerar al hacer una recarga.

3.3.6.1. Tipos de recarga

La recarga de vehículos eléctricos es flexible y se puede realizar en diferentes entornos. En casa o en el trabajo, puedes recargar tu coche en un aparcamiento privado. En el entorno público, las opciones incluyen aparcamientos públicos, hoteles, centros comerciales y la vía pública. Además, en las rutas interurbanas, se están creando "hubs de recarga" para facilitar la carga rápida en puntos estratégicos.

La velocidad de recarga varía según la potencia utilizada. A medida que aumenta la potencia, disminuye el tiempo de recarga, pero también suben los costos de la infraestructura necesaria. Esto significa que, aunque la recarga rápida es más cara de instalar, te permite volver a la carretera mucho más rápido como se puede observar en el Anexo 2 la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [37].

3.3.6.2. Modos de carga

Mediante la información de [38] se realiza la Tabla 6 que resume los diferentes modos de carga disponibles para vehículos eléctricos, destacando sus características principales en términos de comunicación, tipo de corriente, potencia y aplicaciones comunes. Mientras que en la Figura 7 indica una guía visual de los diferentes modos de carga.

Tabla 6. Modos de carga para los vehículos eléctricos.

Modo de Carga	Comunicación	Tipo de Corriente	Intensidad Máxima	Potencia Máxima	Características Principales	Aplicaciones Comunes
Modo 1	No	CA	16 A	3,7 kW	Carga lenta sin comunicación, realizada en corriente alterna a 220 V.	Entornos domésticos
Modo 2	Sí	CA	16 A	3,7 kW	Carga lenta con comunicación y sistema de protección, monofásica a 220 V.	Entornos domésticos
Modo 3	Sí	CA	32 A (Monofásica) / 64 A (Trifásica)	3,7 kW (Monofásica) / 43 kW (Trifásica)	Carga semi-rápida con monitorización, puede ser monofásica o trifásica.	Garajes comunitarios
Modo 4	Sí	CC	125 A	50 kW - 350 kW	Carga rápida que utiliza un transformador para convertir CA a CC, ideal para potencias elevadas.	Estaciones de servicio, carga rápida

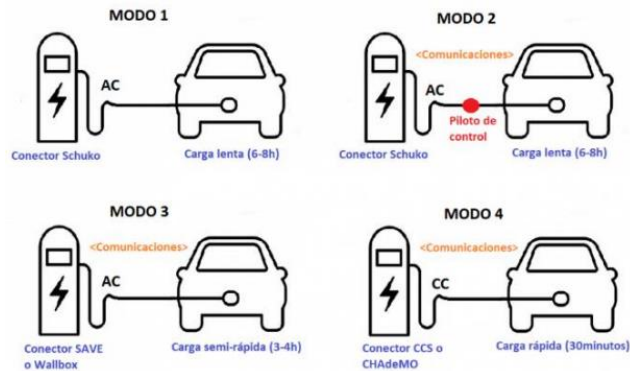


Figura 7. Modos de carga [39].

3.3.6.3. Tipos de conectores

En la actualidad, hay siete tipos de conectores disponibles en el mercado. No se trata solo de la forma (macho o hembra), sino que cada conector tiene una capacidad específica de potencia y está diseñado para un nivel y modo de recarga particular. En el Anexo 3 se observa la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** mencionando los tipos de conectores [40].

3.3.7. Costos operativos

Los gastos de operación se refieren a todo el dinero que una organización utiliza para llevar a cabo sus actividades y generar ingresos. Estos gastos son cruciales, ya que deben ser cubiertos por los ingresos que la empresa genera para poder determinar las ganancias obtenidas en un periodo específico. En este sentido, los gastos de operación abarcan tanto los costos de la mano de obra directa como todos los gastos relacionados con el funcionamiento y el mantenimiento de la empresa [8].

Los costos operativos se clasifican en dos categorías: costos fijos y costos variables. Esta distinción se puede entender mejor a través de la ecuación 1.

$$CO = \sum(Cf + Cv) \quad (1)$$

Donde Co es el costo total que se compone de los costos fijos (Cf) y los costos variables (Cv). Esta fórmula es esencial en la contabilidad de costos y en la gestión financiera, ya que ayuda a las empresas a analizar su estructura de costos y a tomar decisiones más acertadas sobre producción y precios [41].

3.3.7.1. Costos fijos

Los costos fijos son aquellos gastos que permanecen constantes, sin importar la cantidad de bienes o servicios que una empresa produzca o venda. Esto significa que, a diferencia de los costos variables,

que fluctúan con el nivel de producción, los costos fijos se mantienen en un nivel estable. Un ejemplo común de costo fijo es el alquiler de un local [42].

Estos gastos son esenciales para el funcionamiento de la empresa y, por lo general, no se pueden ajustar o reducir a corto plazo. Es fundamental que las empresas conozcan y gestionen sus costos fijos, ya que tienen un impacto directo en su rentabilidad. Algunas características clave de los costos fijos son:

- **Invariabilidad:** No cambian con el volumen de producción o ventas.
- **Rigidez:** No se pueden controlar o disminuir fácilmente en el corto plazo.
- **Impacto en la rentabilidad:** Afectan de manera constante los costos totales y, por ende, la rentabilidad del negocio.
- **Incertidumbre:** Aunque son constantes, pueden verse afectados por cambios en el entorno económico o en el mercado [43].

Dentro de los costos fijos tenemos:

- Depreciación
- Legalización
- Revisión vehicular
- Impuestos

Los costos fijos se calculan según la ecuación 2.

$$Cf = \sum(Leg) \quad (2)$$

Donde Cf los costos fijos anuales son la sumatoria de todos los gastos de legalización al año, dentro de la legalización se encuentran los impuestos a la propiedad, impuesto ambiental e impuesto al rodaje.

3.3.7.2. Costos variables

Los costos variables son aquellos que cambian en función de la cantidad de productos que se producen o venden. Algunas de sus características más relevantes son:

- **Fluctuación con la producción:** Estos costos aumentan o disminuyen según la cantidad de bienes o servicios que se generan.
- **Previsibilidad a corto plazo:** Se pueden estimar con bastante precisión en un horizonte cercano.

- **Control y reducción:** Es posible gestionar y disminuir estos costos mediante estrategias efectivas de control financiero.
- **Costos proporcionales:** A menudo, presentan una relación directa con los niveles de producción.
- **Comportamiento en los costos totales:** Mientras que el costo total puede variar, el costo por unidad tiende a mantenerse constante.

Es importante mencionar que, en la práctica, no todos los costos se clasifican de manera estricta como variables o fijos. Existen también costos mixtos que presentan características de ambos. Comprender la naturaleza de estos costos y clasificarlos correctamente es fundamental para la toma de decisiones financieras y la planificación estratégica en cualquier empresa [43].

Los costos variables se calculan según la ecuación 3.

$$Cv = \sum(Com + Neu + Mpre + Mco) \quad (3)$$

Donde Cv es el costo variable es la sumatoria de los costos de combustible (Com), costos de neumáticos (Neu), costos de mantenimiento preventivo ($Mpre$) y costos de mantenimiento correctivo (Mco), en el Anexo 4 se observa la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con las ecuaciones que va desde la (17) hasta la (32) de forma ordenada, relacionadas para cada costo que se debe tomar en cuenta de los costos variables.

3.3.8. Bus eléctrico

3.3.8.1. BYD K9G

El autobús eléctrico K9G de BYD, diseñado para el transporte urbano como se puede observar en la Figura 8, combina potencia y eficiencia con costos reducidos. Destaca por su conducción sencilla sin embrague ni caja de cambios, aire acondicionado, frenado regenerativo, baterías de litio-ferrofosfato y cámaras de retrovisión. Ofrece seguridad con un limitador de velocidad y software que impide abrir puertas en movimiento. Con una batería de 324 kWh y un motor de 402 HP, tiene una autonomía superior a 250 km. Su tiempo de carga es de 4 a 5 horas y su costo de mantenimiento es de \$0.05 por km, lo que supone un ahorro del 58% respecto a los autobuses diésel. Además, es completamente eléctrico y no emite CO₂ [44].



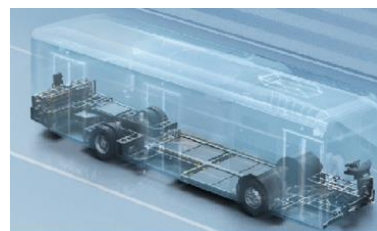
Figura 8. Modelo bus eléctrico K9G [44].

3.3.8.2. BYD eBus B12

El BYD eBus B12 en la Figura 9-a) se observa el modelo del bus, se destaca por su excepcional rendimiento, ofreciendo hasta 600 km de autonomía con una sola carga y con capacidad para 105 pasajeros. Diseñado pensando en la comodidad de los pasajeros, el B12 cuenta con un espacioso interior con amplios asientos. La seguridad es una prioridad máxima, con características estándar que incluyen un sistema avanzado de frenado de emergencia (AEBS), detección de somnolencia del conductor (DDAW), monitoreo de punto ciego (BSM) y advertencia de cambio de carril (LDWS). También incluye monitoreo y advertencia frontal (HMW), advertencia de colisión de peatones y ciclistas (PCW), reconocimiento de señales de tráfico (TSR), indicador de límite de velocidad (SLI), asistencia de velocidad inteligente (ISA) y un alcolock. El B12 tiene certificaciones como R29 para protección del conductor, R93 para protección delantera contra empotramiento y R155/R156 para ciberseguridad. La integración de la batería del Blade en el chasis como se puede observar en la Figura 9-b), mejora la rigidez torsional y baja el centro de gravedad del vehículo, mejorando la estabilidad y la maniobrabilidad. El B12 incorpora un controlador 6 en 1 con tecnología de carburo de silicio y dos motores de cubo de rueda de 150 kW para una máxima eficiencia energética. Además, cuenta con un sistema de gestión térmica integrado y soluciones de carga flexibles como se puede identificar en las Figura 9-c) y Figura 9-d), con un único cañón capaz de alcanzar los 200 kW y una potencia máxima de carga de 500 kW mediante pantógrafo [45].



a) Modelo



b) Batería Blade en el chasis

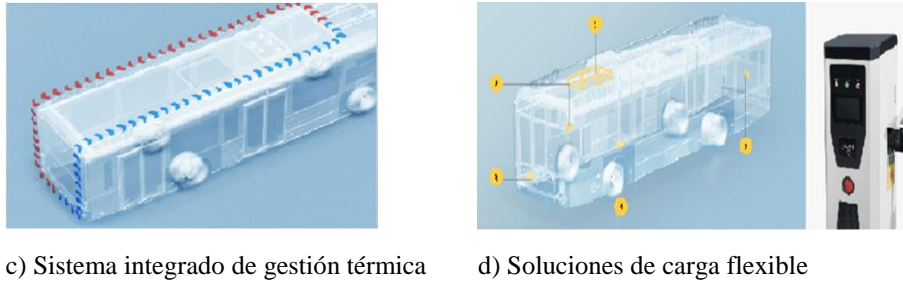


Figura 9. Bus eléctrico B12 [45].

En la Tabla 7 se puede identificar características principales de dos modelos diferentes de la marca BDY. Se evidencia que los modelos K9G y B12, podemos ver que el B12 ofrece una autonomía de recorrido mucho mayor, con 600 km, en comparación con los 250 km del K9G. Además, el B12 tiene una capacidad para transportar más pasajeros, 105 en lugar de 80. Sin embargo, el consumo de energía por kilómetro del B12 es notablemente más eficiente, con un consumo aproximado de 0,833 kWh por kilómetro, mientras que el K9G consume alrededor de 1,296 kWh por kilómetro. Esto sugiere que, aunque el K9G tiene una menor autonomía y capacidad de pasajeros, el B12 es más eficiente en términos de consumo energético, lo que podría ser una ventaja significativa en el largo plazo.

Tabla 7: Características de los buses eléctricos.

Modelo	Capacidad de batería (kWh)	Autonomía de recorrido (Km)	Cantidad de pasajeros	Longitud (m)	Consumo aproximado (kWh)
K9G	324	250	80	12	1,296
B12	500	600	105	12,13	0,833

3.4. POLÍTICAS PÚBLICAS Y REGULACIONES

En Ecuador, la transición hacia la electromovilidad en el transporte público está respaldada por políticas y normativas que promueven el uso de vehículos eléctricos, como autobuses eléctricos, para lograr una movilidad urbana sostenible. El Ministerio de Transporte y Obras Públicas ha desarrollado la Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible, que establece estrategias para reducir la dependencia de combustibles fósiles y mejorar la eficiencia del transporte público mediante tecnologías limpias. En ciudades como Latacunga, la adopción de buses eléctricos podría mejorar la calidad del aire y reducir costos operativos, pero requiere incentivos financieros, adecuación de infraestructura, regulaciones locales y una planificación efectiva del transporte público para alinearse con los objetivos nacionales de reducción de emisiones de CO₂ [46].

La Compañía Sultana de Cotopaxi necesita cumplir con varios requisitos legales para mantener su título habilitante, lo cual es esencial para operar legalmente en el transporte público. Estos requisitos están establecidos en la Ley Orgánica de Transparencia y Acceso a la Información Pública (LOTAIP) y en resoluciones específicas como la Resolución-002-DIR2021-ANT. Esto incluye aspectos como cambios de socios, vehículos, y ajustes en la capacidad de transporte, todo lo cual debe ser gestionado de manera transparente y conforme a las normativas del Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD). Mantener estos documentos actualizados no solo asegura la legalidad de la compañía, sino que también mejora la eficiencia del servicio de transporte público, beneficiando tanto a la compañía como a los usuarios [47], [48], [49].

En el Anexo 5 la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar diferentes normativas.

3.5. IMPACTO AMBIENTAL

3.5.1. Impacto energético, ambiental y social del transporte público.

El transporte público tiene un impacto significativo en la energía, el medio ambiente y la sociedad. A medida que la población y la economía continúan expandiéndose, el consumo de energía aumenta de forma constante, con el sector eléctrico y los hidrocarburos como principales demandantes. Dentro de los planes y retos expuestos en el BEN (Balance Energético Nacional), aquellos vinculados al transporte ocupan un lugar destacado [50].

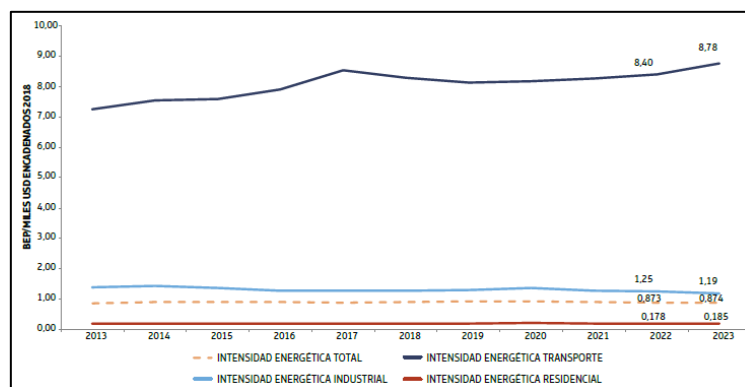


Figura 10. Variación de la intensidad energética desde el año 2013 hasta el 2023 [50].

De la Figura 10 se puede mencionar que la intensidad energética total del año 2023 presentó un incremento del 0,1 % en comparación con la de 2022. De la misma manera, entre 2022 y 2023 las

intensidades energéticas del transporte y de los hogares aumentaron 4,5 % y 4,1 % respectivamente, mientras que la intensidad energética de la industria decreció en 5,3 %.

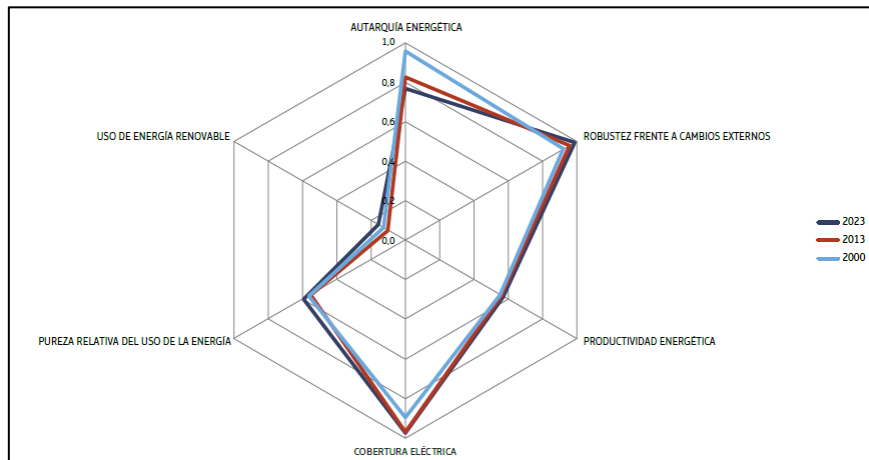


Figura 11. Indicadores de sostenibilidad tomados en el año 2000, 2013 y 2023 [50].

- El índice de autarquía energética mide la dependencia de un país respecto a las importaciones en su matriz energética, reflejando su nivel de autosuficiencia. Entre 2013 y 2023, este indicador disminuyó un 7 %, señalando un mayor requerimiento de importaciones para cubrir la demanda interna. Durante este periodo, las importaciones energéticas crecieron un 35,3 %, principalmente de GLP, gasolina y diésel [50] como se observa en la Figura 11.
- La robustez ante cambios externos mide la dependencia económica de un país respecto a sus exportaciones de energía, siendo clave para naciones exportadoras como Ecuador. Entre 2013 y 2023, este indicador aumentó un 3,6 %, lo que sugiere una menor dependencia de la economía ecuatoriana respecto a las exportaciones energéticas.
- La cobertura eléctrica en el país aumentó del 96,8 % en 2013 al 97,6 % en 2023, reflejando un incremento del 0,9 %.

En 2023, el 97,8 % de la energía utilizada en el transporte provino de diésel oil y gasolinas. En el sector industrial, la principal fuente fue la electricidad (43,6 %), seguida del diésel oil (22 %). En el ámbito comercial y de servicio público, la electricidad representó el 79,4 % del consumo, mientras que el diésel oil alcanzó el 12,8 %. Por último, en el sector residencial, el GLP fue la fuente más utilizada (53,6 %), seguido de la electricidad (38,8 %). Esto lo podemos observar en la Figura 12.

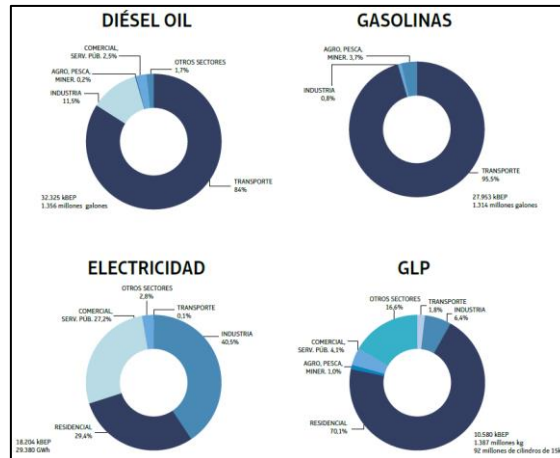


Figura 12. Consumo de energía por sectores en 2023 [50].

En cuanto al consumo de gasolinas, los vehículos de pasajeros individuales fueron los principales consumidores, con el 76 % del total. En el caso del diésel oil, los vehículos de carga pesada lideraron la demanda, con una participación del 67 %. Como se identifica en la Figura 13.

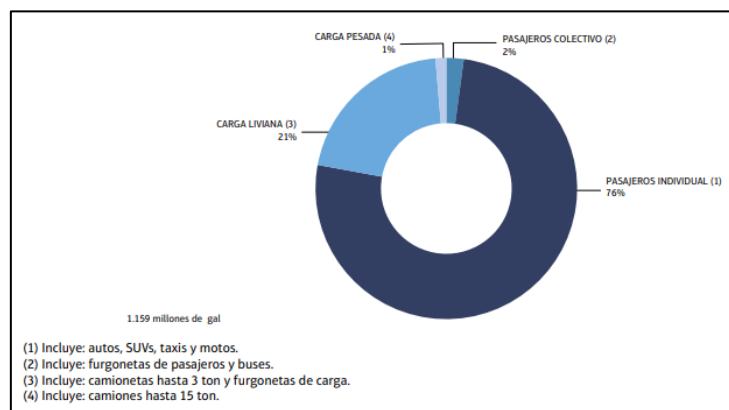


Figura 13. Consumo de gasolina por tipo de vehículo en 2022 [50].

3.6. FACTIBILIDAD ECONÓMICA

3.6.1. Análisis Costo-Beneficio

La transición de buses diésel a eléctricos en Latacunga implica una inversión inicial más alta, pero ofrece ahorros significativos a largo plazo. Los buses eléctricos tienen costos operativos menores debido a su eficiente consumo de energía y menor mantenimiento. Además, al considerar los costos ambientales, como la contaminación del aire y el ruido, los buses eléctricos resultan más rentables. Esto no solo beneficia económicamente, sino que también mejora la calidad del aire y la sostenibilidad urbana en ciudades como Latacunga [51], [52].

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

La presente investigación tiene como objetivo general evaluar cómo la sustitución del transporte público urbano convencional por vehículos eléctricos en las rutas Bellavista – Niagara y Patutan – La Laguna operadas por la compañía de transporte urbano Sultana de Cotopaxi en la ciudad de Latacunga puede reducir la contaminación ambiental. A lo largo de este estudio, se analizará el mercado automotriz con un enfoque en la transición hacia la movilidad eléctrica, abarcando la historia y el desarrollo de los vehículos eléctricos, sus características técnicas, especialmente en lo referente a las baterías, y el marco normativo que regula su implementación en Ecuador. También se evaluará la evolución del mercado de buses eléctricos a nivel global y, sobre todo, su impacto en el contexto local de Latacunga, donde su adopción aún se encuentra en una etapa temprana y depende de esfuerzos coordinados entre distintos sectores para su impulso.

Este capítulo expone la metodología y los procedimientos que se emplearán en la investigación. Se describen los principios que sustentan la metodología seleccionada y se explica el enfoque general del estudio, junto con su implementación en programación. Posteriormente, se establece la factibilidad de los puntos de carga a partir de los resultados obtenidos en la programación y se plantea una propuesta para garantizar el desarrollo de la investigación. Además, se incluye un análisis detallado del proceso de recopilación de datos, considerando las normativas y regulaciones aplicables para el desarrollo. A la vez se presenta el modelo matemático para determinar la distribución de los elementos de carga puntos óptimos de convergencia y factibilidad, especificando su formulación y aplicación, incluyendo conjuntos, parámetros, función objetivo y restricciones aplicado en Python, con el fin de modelar a analizar las cargas mediante el uso de PowerFactory para establecer si el sistema se mantiene estable con el aumento de dicha carga. Finalmente, se analiza los resultados de factibilidad acorde a precios, nivel de contaminación.

4.1. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Este estudio adopta un enfoque mixto, combinando investigación exploratoria e investigación descriptiva para evaluar la factibilidad de sustituir los buses convencionales a diésel por buses eléctricos en Latacunga.

4.2. INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA

Se enfocará en la identificación y análisis de información existente sobre movilidad eléctrica y transporte público, con el objetivo de comprender los factores que intervienen en la transición hacia

buses eléctricos. A través de la revisión de literatura científica, normativas nacionales e internacionales, y estudios de casos de ciudades que han implementado este cambio, se identificarán oportunidades, desafíos y mejores prácticas aplicables a la realidad de Latacunga.

4.3. INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA

Permitirá caracterizar el estado actual del sistema de transporte público en la ciudad y su posible transformación. Mediante el análisis de datos secundarios, se examinarán aspectos como la flota de buses vigente, los costos operativos de los vehículos diésel en comparación con los eléctricos, la infraestructura necesaria para la carga de baterías y los impactos económicos y ambientales de la transición. Asimismo, se evaluará el marco regulatorio y los incentivos existentes en Ecuador para la adopción de este tipo de tecnología en el transporte público.

4.4. TIPO DE ESTUDIO

La investigación es fundamenta en el uso de fuentes referenciales como libros, textos académicos, investigaciones previas (tesis), artículos científicos y normativas relacionadas con la movilidad eléctrica y el transporte público. Estas fuentes son esenciales para la recopilación de información y el análisis del contexto en el que se desarrolla el estudio.

Además, se recurrió a documentos oficiales disponibles en la Unidad de Movilidad de Latacunga, así como a información proporcionada por las operadoras de transporte público que operan en la ciudad. Estos datos permitirán contextualizar la situación actual del sistema de transporte y evaluar la viabilidad de la transición a buses eléctricos.

4.5. GESTIÓN DE TAREAS

El diagrama de flujo representa un proceso estructurado para la gestión de tareas, describiendo cada fase desde la asignación hasta la conclusión. Este método permite un seguimiento eficiente, asegurando que todas las actividades se desarrollen de acuerdo con la secuencia definida para garantizar el éxito del proyecto, además de identificar y corregir posibles errores o inconsistencias que puedan presentarse como puede observarse en la Figura 14.

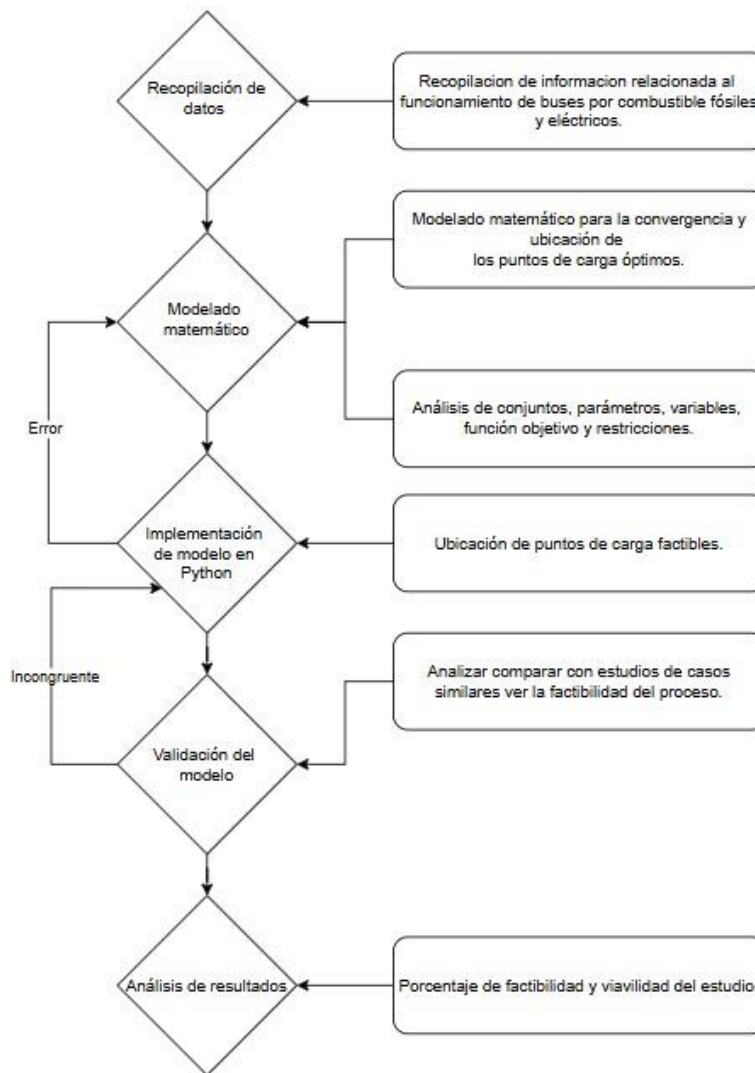


Figura 14. Diagrama de flujo.

4.6. OBTENCIÓN DE DATOS

Se llevó a cabo un proceso detallado de recolección de datos en diversas rutas del sistema de transporte urbano, abarcando tanto días de operación regular como jornadas con una afluencia excepcional de pasajeros. El levantamiento de muestras se realizó mediante petición de información a la compañía.

Asimismo, se dio prioridad a aquellas rutas con un elevado consumo energético, identificando los factores que influyen en esta condición, como la topografía del trayecto, específicamente la presencia de pendientes pronunciadas, así como la densidad del tráfico y las condiciones de la infraestructura vial. Estos elementos fueron analizados con el fin de obtener una caracterización precisa del

comportamiento del transporte público y su impacto en el consumo de energía, lo que resulta esencial para evaluar la viabilidad de alternativas más sostenibles, como la posible implementación de autobuses eléctricos en la ciudad.

4.6.1. Identificación y análisis de la ruta con respecto a la red eléctrica

Para llevar a cabo un estudio preciso, es esencial comprender en detalle la ruta y puntos de parada del autobús con la red de distribución eléctrica que será evaluada. Este proceso inicia con la selección del sistema eléctrico de distribución, basándose en el análisis de rutas, simulaciones especializadas y datos proporcionados por la empresa eléctrica y la compañía de buses correspondiente.

El acceso a esta información permite una caracterización más detallada de la infraestructura, facilitando la identificación de los puntos óptimos dentro de la red. Esto resulta clave para optimizar la ubicación de los sistemas de carga, asegurando una mayor eficiencia de tiempos y mejorando la confiabilidad del sistema de transporte. Además, la combinación de herramientas de simulación y datos reales posibilita una evaluación más precisa de condiciones operativas, lo que contribuye a la toma de decisiones estratégicas para su optimización y modernización.

4.6.2. Número de unidades, rutas y red eléctrica

Compañía de Transporte Urbano Sultana de Cotopaxi es una empresa del sector empresa con oficinas en la ciudad de Latacunga, provincia de COTOPAXI que consta con un total de 64 unidades de transporte, con un total de 12 líneas que se puede observar en la Tabla 9.

El número de rutas y líneas en un sistema de transporte público representa la cantidad total de trayectos operativos dentro de una red específica, como se puede observar en la Tabla 8. Conocer esta información es fundamental para evaluar la eficiencia y cobertura del servicio, así como para analizar el impacto de posibles cambios en la infraestructura. En el caso de la transición a autobuses eléctricos, este dato es clave para diseñar estrategias de electrificación y optimizar la ubicación de estaciones de carga.

Por otro lado, la red eléctrica que abastece al sistema de transporte también desempeña un papel crucial en la planificación y confiabilidad del servicio. La capacidad de la infraestructura eléctrica para soportar la demanda de carga de los autobuses influye directamente en la viabilidad de la implementación. Un sistema bien dimensionado permite manejar de manera eficiente la carga de múltiples vehículos sin afectar la estabilidad del suministro.

Además, el análisis conjunto del número de rutas, la demanda energética de las líneas y la capacidad de la red eléctrica facilita la toma de decisiones estratégicas para la modernización del transporte público, garantizando una transición eficiente hacia tecnologías más sostenibles.

Tabla 8. Información topológica y de rutas.

Sección	Descripción	Gráfico																																																
Geoportal Web	Mapa topológico que proporciona información detallada sobre la red eléctrica de Cotopaxi. Este mapa integra capas que facilitan el acceso a datos sobre infraestructuras eléctricas, subestaciones, transformadores, líneas de distribución.																																																	
Ubicación de rutas	Para optar por la información, primero se debe identificar las rutas de interés. El primer paso consiste en analizar la distribución del sistema eléctrico de dichas rutas.	<table border="1"> <tbody> <tr><td>Colo</td><td>LTSL01</td><td>SALTO - SALACHE</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> <tr><td>Colo</td><td>LTSL02</td><td>BELLAVISTA - NIAGARA</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> <tr><td>Colo</td><td>LTSL03</td><td>PATUTAN - LA LAGUNA</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> <tr><td>Colo</td><td>LTSL04</td><td>EL SALTO - YUGSILOMA - POALO</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> <tr><td>Colo</td><td>LTSL05</td><td>SAN JUAN - EL CALVARIO</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> <tr><td>Colo</td><td>LTSL06</td><td>PUSUCHISI - EL SALTO</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> <tr><td>Colo</td><td>LTSL07</td><td>TILIPULO - LOCOA</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> <tr><td>Colo</td><td>LTSL08</td><td>SANTAN - NUEVA VIDA</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> <tr><td>Colo</td><td>LTSL09</td><td>EL SALTO - CEYSA</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> <tr><td>Colo</td><td>LTSL10</td><td>CHUGCHILAN - EL SALTO</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> <tr><td>Colo</td><td>LTSL11</td><td>MAYORISTA - EL SALTO</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> <tr><td>Colo</td><td>LTSL12</td><td>RICHUL - EL SALTO</td><td>05:50:00 - 19:00:00</td></tr> </tbody> </table>	Colo	LTSL01	SALTO - SALACHE	05:50:00 - 19:00:00	Colo	LTSL02	BELLAVISTA - NIAGARA	05:50:00 - 19:00:00	Colo	LTSL03	PATUTAN - LA LAGUNA	05:50:00 - 19:00:00	Colo	LTSL04	EL SALTO - YUGSILOMA - POALO	05:50:00 - 19:00:00	Colo	LTSL05	SAN JUAN - EL CALVARIO	05:50:00 - 19:00:00	Colo	LTSL06	PUSUCHISI - EL SALTO	05:50:00 - 19:00:00	Colo	LTSL07	TILIPULO - LOCOA	05:50:00 - 19:00:00	Colo	LTSL08	SANTAN - NUEVA VIDA	05:50:00 - 19:00:00	Colo	LTSL09	EL SALTO - CEYSA	05:50:00 - 19:00:00	Colo	LTSL10	CHUGCHILAN - EL SALTO	05:50:00 - 19:00:00	Colo	LTSL11	MAYORISTA - EL SALTO	05:50:00 - 19:00:00	Colo	LTSL12	RICHUL - EL SALTO	05:50:00 - 19:00:00
Colo	LTSL01	SALTO - SALACHE	05:50:00 - 19:00:00																																															
Colo	LTSL02	BELLAVISTA - NIAGARA	05:50:00 - 19:00:00																																															
Colo	LTSL03	PATUTAN - LA LAGUNA	05:50:00 - 19:00:00																																															
Colo	LTSL04	EL SALTO - YUGSILOMA - POALO	05:50:00 - 19:00:00																																															
Colo	LTSL05	SAN JUAN - EL CALVARIO	05:50:00 - 19:00:00																																															
Colo	LTSL06	PUSUCHISI - EL SALTO	05:50:00 - 19:00:00																																															
Colo	LTSL07	TILIPULO - LOCOA	05:50:00 - 19:00:00																																															
Colo	LTSL08	SANTAN - NUEVA VIDA	05:50:00 - 19:00:00																																															
Colo	LTSL09	EL SALTO - CEYSA	05:50:00 - 19:00:00																																															
Colo	LTSL10	CHUGCHILAN - EL SALTO	05:50:00 - 19:00:00																																															
Colo	LTSL11	MAYORISTA - EL SALTO	05:50:00 - 19:00:00																																															
Colo	LTSL12	RICHUL - EL SALTO	05:50:00 - 19:00:00																																															

Tabla 9. Líneas de transporte y distancias recorridas.

Nombre de líneas	Descripción	Distancia de recorrido total	Unidad
LTSL01	SALTO - SALACHE	12,7	Km
LTSL02	BELLAVISTA - NIAGARA	22	Km
LTSL03	PATUTAN - LA LAGUNA	21	Km
LTSL04	EL SALTO - YUGSILOMA	16	Km
LTSL05	SAN JUAN - EL CALVARIO	24	Km
LTSL06	PUSUCHISI - EL SALTO	15	Km
LTSL07	TILIPULO - LOCOA	26	Km

Nombre de líneas	Descripción	Distancia de recorrido total	Unidad
LTSL08	SANTAN - NUEVA VIDA	22	Km
LTSL09	EL SALTO - CEYPSA	22	Km
LTSL10	CHUGCHILAN - EL SALTO	26	Km
LTSL11	MAYORISTA - EL SALTO	18,9	Km
LTSL12	PICHUL - EL SALTO	7,7	Km

4.7. MODELO MATEMÁTICO E IMPLEMENTACIÓN EN PYTHON

El modelo adoptado, presenta un enfoque matemático lineal con el objetivo de analizar la confiabilidad en la transición de buses diésel a eléctricos, centrándose en la optimización de los puntos de carga. La función objetivo se orienta a enfocarse en la ruta que mayor convergencia tiene al respecto de las otras, el impacto de interrupciones en la operación del transporte público, considerando factores como la ubicación estratégica de estaciones de carga, la autonomía de las baterías, la demanda energética y la disponibilidad de infraestructura. Este enfoque permite evaluar la frecuencia y duración esperada de interrupciones en el servicio, tomando en cuenta restricciones operativas, patrones de movilidad y necesidades de carga, con el fin de garantizar un sistema eficiente y confiable.

4.7.1. Conjuntos

N : Conjunto de nodos (posibles ubicaciones de estaciones de carga).

R : Conjunto de rutas de buses.

4.7.2. Índices

n : Representa un nodo en el conjunto nodos (posibles ubicaciones de estaciones de carga).

r : Representa una ruta en el conjunto rutas (rutas de los buses eléctricos).

4.7.3. Parámetros

d_r : Demanda energética de la ruta r (kWh).

C_n : Capacidad de carga de la estación en el nodo n (kWh).

d_{rn} : Distancia entre la ruta r y el nodo n (km).

D_{max} : Distancia máxima que un bus puede recorrer sin recargar (km).

4.7.4. Variables de decisión

$x_n \in \{1, 0\}$: 1 si se instala una estación en el nodo n , 0 en caso contrario.

$y_{rn} \in \{0, 1\}$: 1 si la ruta r está asignada a la estación en el nodo n , 0 en caso contrario.

- **Función Objetivo**

$$\min \sum_{n \in N} X_n \quad (4)$$

El propósito de esta función es minimizar el número de estaciones de carga a instalar según la convergencia que tienen los buses acordes a todas las paradas de las rutas, con el fin de ver un posible caso de puntos estratégico de carga para toda la compañía. Con la cantidad de estaciones de carga necesarias mientras se asegura que todas las rutas tengan acceso a una estación que pueda satisfacer su demanda de energía y en base a la demanda energética que se ocupe en el día.

- **Restricciones**

La restricción que se muestra es quien ayuda con la cobertura de demanda, cada ruta debe recibir suficiente energía de alguna estación.

$$\sum_{n \in N} y_{rn} c_n \geq d_r, \quad \forall_r \in R \quad (5)$$

Esta restricción nos ayuda con el límite de la distancia de los buses ya que los buses se debe asignar estaciones dentro de su rango operativo.

$$\sum_{n \in N} y_{rn} d_{rn} \geq D_{max}, \quad \forall_r \in R \quad (6)$$

Esta regla asegura que las estaciones de carga tengan suficiente capacidad para cargar los autobuses de cada ruta.

$$\sum_{n \in N} y_{r,n} * C_n \geq d_r, \quad \forall_r \in R \quad (7)$$

A cada ruta se debe asignar una estación única de carga.

$$\sum_{n \in N} y_{rn} \geq 1, \quad \forall_r \in R \quad (8)$$

Estas restricciones nos ayudan con el caso hipotético de ver donde sería un punto estratégico para ubicar punto de carga optimo en base a la demanda y la convergencia de todas las rutas.

4.8. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar el modelo matemático, se tomarán en cuenta distintas rutas operadas por la cooperativa de buses en Latacunga. Estas rutas servirán como referencia para evaluar la efectividad del modelo en la optimización de la infraestructura de carga. La validación se realizará mediante la aplicación del modelo a escenarios reales, considerando la demanda energética de los recorridos, la distribución geográfica de las posibles estaciones de carga y las limitaciones operativas de los vehículos eléctricos. A través de simulaciones y análisis de rendimiento, se verificará la capacidad del modelo para ofrecer una solución eficiente y sostenible que garantice la factibilidad del servicio de transporte eléctrico.

Análisis de ruta mediante el uso de Google Maps como se puede evidenciar en los Anexos de la 6 a la 17 e investigación de campo acorde a la información obtenida en las Oficinas de la Cooperativa de buses Sultana de Cotopaxi como se puede observar en la Tabla 9.

Análisis de la red eléctrica mediante el uso de PowerFactory Disailent para validar si existe una red dentro de la ruta que abastezca los puntos de carga a incorporar o instalar.

La metodología se centrará en la simulación y evaluación del comportamiento de la red eléctrica ante la integración de estaciones de carga para buses eléctricos, considerando distintos escenarios operativos, se realizará un análisis de flujo de carga con el fin de determinar cómo la demanda adicional de los buses eléctricos afecta la estabilidad del sistema. Este estudio permitirá identificar posibles caídas de tensión en distintos puntos de la red, sobrecargas en líneas de distribución y transformadores, así como evaluar la capacidad de suministro en función de la infraestructura existente. Se considerarán escenarios de carga simultánea y horarios diferenciados para establecer patrones de consumo y su impacto en la calidad del servicio eléctrico.

Posteriormente, se llevará a cabo un análisis de flujos, enfocado en verificar la capacidad de la red para soportar fallas en presencia de la nueva carga de los buses eléctricos. Se simularán condiciones de demanda en distintas ubicaciones estratégicas.

Además, se realizará un análisis de estabilidad de la red, en el que se evaluará el comportamiento de la red ante variaciones bruscas de carga causadas por la conexión y desconexión de múltiples

estaciones de carga. Este estudio permitirá examinar el impacto en la estabilidad de la frecuencia y los niveles de tensión, asegurando que la operación del sistema eléctrico no se vea comprometida con la integración de los nuevos vehículos, con base en los resultados obtenidos, se diseñarán estrategias de gestión de carga para minimizar el impacto en la red. Se analizarán opciones como la optimización de horarios de recarga en períodos de menor demanda o la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía en puntos estratégicos. Estas medidas permitirán garantizar una integración eficiente y sostenible de los buses eléctricos en el sistema de transporte público en la Ciudad.

Por último el análisis del impacto ambiental de incorporar buses eléctricos en la ciudad debe incluir tanto las emisiones de CO₂ actuales generadas por los buses de combustión interna como las emisiones futuras derivadas de la transición a buses eléctricos. Para las emisiones actuales, se calcula el consumo de combustible de los buses convencionales y las emisiones de CO₂ resultantes, multiplicando el consumo por las emisiones específicas de cada tipo de combustible. En cuanto a las emisiones futuras, aunque los buses eléctricos no emiten CO₂ directamente, es necesario considerar las emisiones indirectas asociadas a la generación de electricidad, que dependen de la fuente de energía utilizada, y calcular las emisiones de CO₂ por kWh con base en la matriz energética local. Esto permitirá obtener una estimación precisa del impacto ambiental tanto en el presente como en el futuro con la incorporación de buses eléctricos.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del modelado en Python para determinar la ubicación óptima de los puntos de carga de los buses eléctricos en Latacunga, considerando las rutas y paradas estratégicas. Además, se lleva a cabo un análisis detallado en PowerFactory para evaluar el impacto de la integración de estas nuevas cargas en la red eléctrica, asegurando que los alimentadores puedan suministrar la demanda requerida sin comprometer la estabilidad del sistema, los resultados obtenidos identifican las zonas óptimas para la instalación de los cargadores. Sin embargo, para garantizar una operación segura y eficiente, teniendo en cuenta los tiempos de parada y recarga de los buses, se prioriza la instalación en las terminales de las rutas. Esta estrategia no solo optimiza el proceso de carga, sino que también minimiza interrupciones en la operación del transporte público. Adicionalmente, el análisis de factibilidad respalda la viabilidad de la sustitución del transporte convencional por flotas eléctricas en Latacunga, demostrando su impacto positivo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. De esta manera, la electrificación del transporte público no solo mejora la eficiencia energética y la sostenibilidad del sistema de movilidad urbana, sino que también contribuye a mitigar el cambio climático y mejorar la calidad del aire en la ciudad.

5.1. PROGRAMACIÓN EN PYTHON

5.1.1. Punto óptimo de convergencia

El código que se realizó en Python corresponde a un modelo de optimización lineal entera mixta (MILP). Este tipo de modelado permitió identificar la ubicación óptima de las estaciones de carga dentro de un conjunto de soluciones factibles en base a los datos de parada de los recorridos de los buses, asegurando que tanto la función objetivo como las restricciones sean de naturaleza lineal y a su vez tomando en cuenta que algunas variables del sistema toman valores enteros.

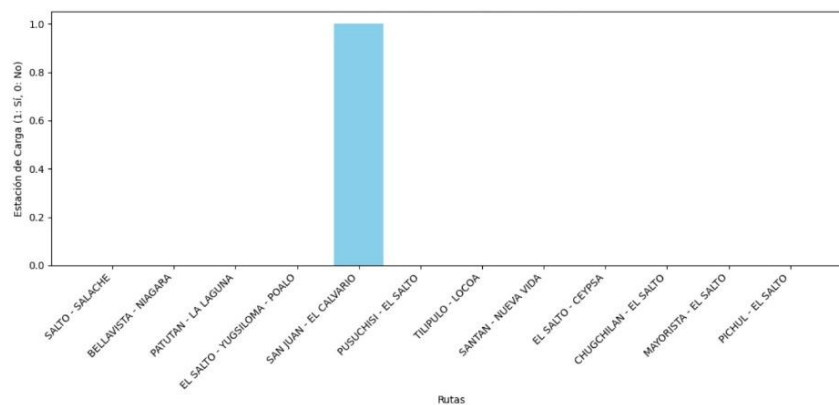


Figura 15. Ruta óptima para la sustitución.

La Figura 15 identifica las paradas con mayor intersección entre las rutas, lo que permite determinar los puntos óptimos para ubicar estaciones de carga para los buses. Sin embargo, debido a que en esta parada intermedia no es viable realizar detenciones prolongadas, se prioriza la instalación de estaciones de carga en las paradas iniciales o terminales, como Patután y Bellavista. Estas ubicaciones no solo evitan interrupciones en el servicio, sino que también son puntos estratégicos debido a su alta afluencia de pasajeros, tiempo de parada del bus considerable y cantidad de unidades que prestan el servicio en dichas rutas. Por esta razón, el análisis se centra en las rutas Patután – La Laguna y Bellavista – El Niágara, que presentan la mayor demanda y conectividad.

5.1.2. Demanda energética vs. Demanda de combustión

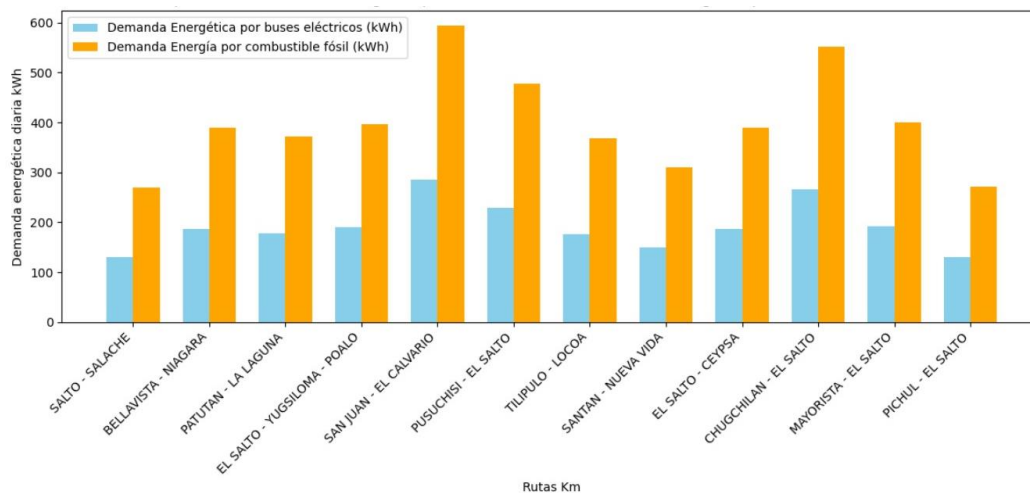


Figura 16. Comparación de demanda energética por buses eléctricos vs. demanda energética por buses convencionales.

Analizando la Figura 16 con detenimiento, vemos que, en cada ruta comparada, los vehículos a gasolina o diésel (barras naranjas) consumen significativamente más energía que los vehículos eléctricos (barras azules). Imagina que las rutas son como carreras; en cada una, el coche eléctrico llega a la meta gastando mucha menos gasolina que el coche tradicional. Esto nos indica que, al hacer la transición a vehículos eléctricos en estas rutas, se podría reducir considerablemente el consumo de combustibles fósiles y, por ende, la contaminación.

Si se fijan en rutas específicas como "Pusuchisi - El Salto" o "Mayorista - El Salto," la diferencia en el consumo es aún más notoria. Estas rutas son como "puntos calientes" donde la electrificación tendría un impacto mayor y más rápido. En esencia, este gráfico es una hoja de ruta para priorizar

esfuerzos y electrificar aquellas áreas donde podemos hacer una diferencia real y tangible en la lucha contra el cambio climático y en la mejora de la calidad del aire que respiramos.

5.2. CASOS DE ESTUDIO CON RESPECTO A LAS CARGAS Y ALIMENTADORES A IMPLEMENTAR.

Para el análisis de carga en las rutas establecidas, se considera que los puntos de carga se implementarán únicamente en el inicio de cada ruta. Esto se debe a que los buses parten desde Patutan y Bellavista respectivamente y siguen un recorrido circular, retornando al mismo punto de partida.

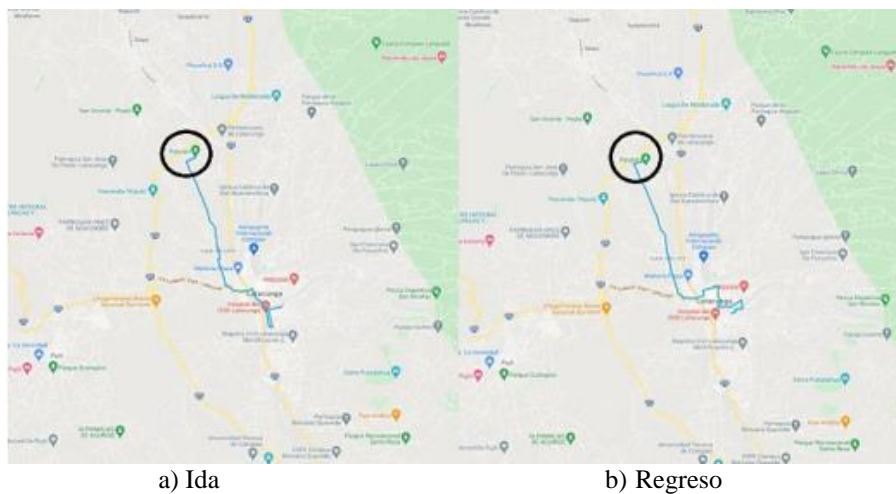


Figura 17. Ruta Patutan - La Laguna.

Las Figura 17-a) y Figura 17-b) muestran la ubicación del predio mediante las siguientes coordenadas $(-0.8779432242381301, -78.64263515767061)$, respectivamente, la ruta de ida y de vuelta con inicio y fin en Patutan. Dado que el punto de partida del bus coincide con el de llegada, se establece este lugar como el sitio óptimo para la instalación de un punto de carga. Además, antes de iniciar un nuevo recorrido, el bus debe esperar un tiempo determinado según la cantidad de unidades en cola, lo que permite aprovechar este período para la recarga de la batería.



Figura 18. Espacio para la instalación.

En la Figura 18 se identifica en el espacio adecuado para la instalación del centro de carga, destacando que coincide con la parada de los buses. Además, en este sitio existe un sistema de distribución en media tensión de 13,8 Kv trifásico, el cual será aprovechado para suministrar energía al puesto de carga.



Figura 19. Ruta Bellavista – Niagara.

Las Figura 19-a) y Figura 19-b) representan la ruta de ida y regreso adicionalmente la ubicación del predio mediante las siguientes coordenadas $(-0.878775, -78.613755)$, teniendo a Bellavista como punto de inicio y finalización. Debido a que el bus comienza y concluye su recorrido en el mismo lugar, este sitio se considera ideal para la instalación de un punto de carga. Además, antes de emprender un nuevo trayecto, el bus debe permanecer en espera por un tiempo determinado según la cantidad de unidades en cola, lo que permite aprovechar este intervalo para la recarga de la batería.



Figura 20. Espacio para la instalación.

En la Figura 20 se identifica en la San Silvestre y Bellavista (Parada 1) el espacio adecuado para la instalación del centro de carga, destacando que coincide con la parada de los buses. Además, en este

sitio existe un sistema de distribución en media tensión de 13,8 Kv trifásico, el cual será aprovechado para suministrar energía al puesto de carga.

Para ambos casos de estudio, se establece que cada unidad se despacha cada 8 minutos, dado que en la parada suelen esperar tres buses, el tiempo de permanencia de cada unidad que llega oscila entre 24 y 30 minutos, lo que permite realizar la recarga antes de reanudar la operación. Además, el lugar seleccionado para la construcción del centro de carga dispone de un amplio espacio y cuenta con un sistema de alimentación trifásico.

5.2.1. Caso en base al alimentador La Brigada – La Calera

Este alimentador como se observa en la Figura 21, corresponde al punto de carga con respecto a la ruta de Patutan – La Laguna se realizó un análisis mediante el Software PowerFactory con el fin de analizar las cargas existentes en todo el alimentador con el propósito de aumentar una carga más al sistema este no afecte.

Posteriormente, se realizó una simplificación con el objetivo de establecer un sistema eléctrico de distribución similar a los casos de estudio previos como se puede observar en la Figura 21. Para alcanzar el resultado presentado, se consideraron diversos aspectos que permitieron elaborar el diagrama unifilar.

- Garantizar que todo el sistema opere bajo un mismo nivel de tensión.
- Definir una sección troncal que actúe como la estructura principal del sistema.
- Identificar las ramificaciones principales, conocidas como laterales.
- Agrupar las cargas considerando su cercanía entre sí y con ello considerando el factor de disponibilidad para los usuarios conectados en la misma.
- Asignar el número de clientes en función de las cargas eléctricas correspondientes.
- Establecer nodos tanto de envío como de recepción de energía.
- Determinar distancias adecuadas entre las distintas secciones del sistema.

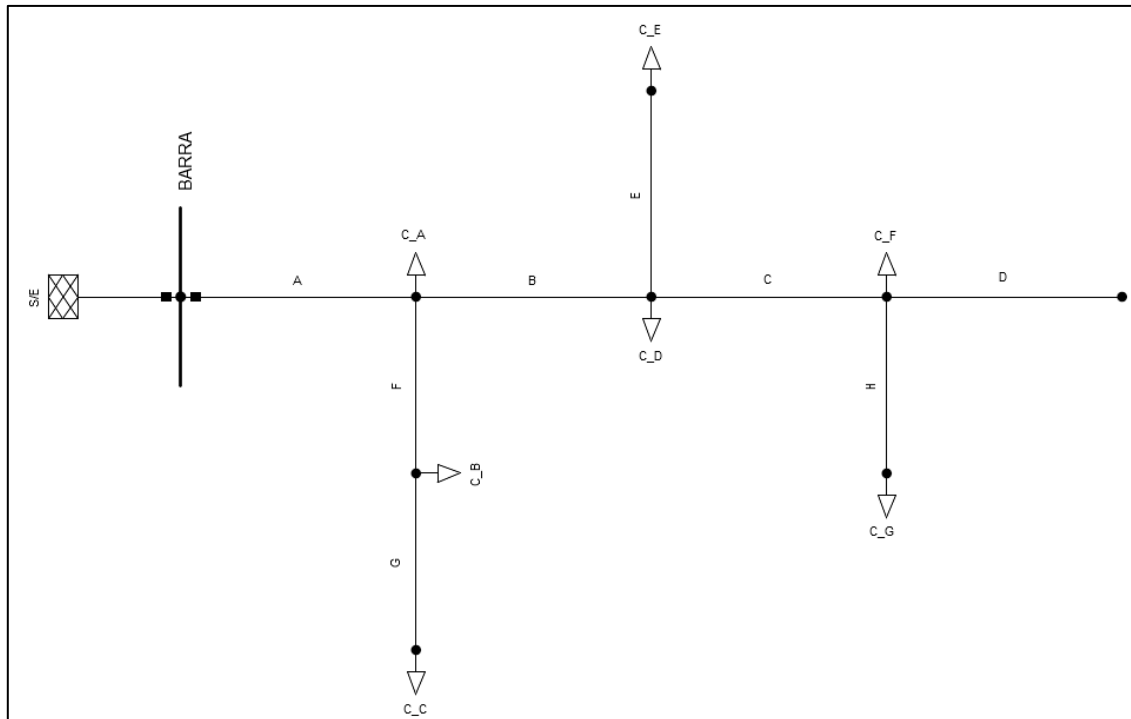


Figura 21. Diagrama unifilar del alimentador La Brigada - La Calera

Para obtener los datos fundamentales del sistema eléctrico del alimentador, se realizó un análisis detallado utilizando la información georreferenciada disponible en ARCGIS. Este análisis permitió determinar la cantidad de clientes en cada sección del sistema y calcular la carga promedio en kilovatios (kW) asociada a los usuarios en cada área. La utilización de ARCGIS, que combina herramientas de mapeo y análisis espacial, facilitó la visualización y gestión de los activos eléctricos, así como la evaluación de la demanda energética en función de la distribución geográfica de los clientes.

La Tabla 10 mostrada a continuación presenta datos de cargas y usuarios conectados al alimentador con el fin de modelar el diagrama en base a datos reales tanto de cargas y usuario conectados al mismo.

Tabla 10. Características alimentador Patutan.

SECCIÓN	DISTANCIA (Km)	CARGA	USUARIOS	CARGA MEDIA (KW)	KVA
1	0,71	A	259	1446,50	1808,12
2	0,82	B	362	2607,63	3259,53
3	1,03	C	583	2174,79	2718,49

SECCIÓN	DISTANCIA (Km)	CARGA	USUARIOS	CARGA MEDIA (KW)	KVA
4	1,02	D	575	4096,89	5121,11
5	1,33	E	1511	4895,20	6119,00
6	1,30	F	1312	4365,15	5456,44
7	1,23	G	521	1868,84	2336,05
8	0,96	H	415	1655,04	2068,80
NUMERO DE CLIENTES			5538		

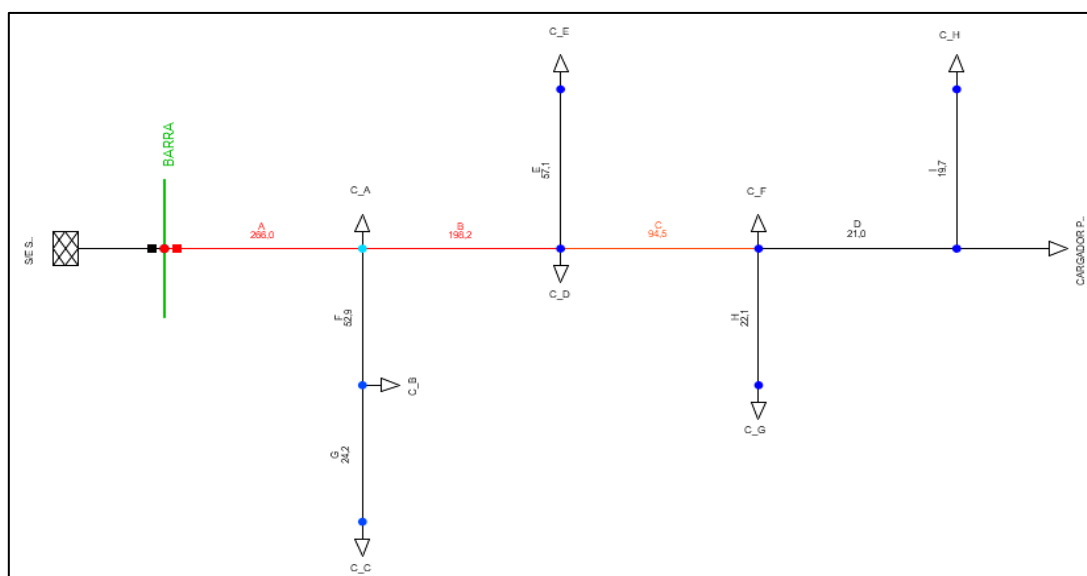


Figura 22. Diagrama unifilar del alimentador La Brigada - La Calera con aumento del punto de carga.

A partir de la modelación, se introduce una variación en el sistema eléctrico para evaluar el impacto de integrar un cargador de buses eléctricos con un consumo de 129 kW, considerando la necesidad de una infraestructura de carga eficiente sin afectar la estabilidad de la red como se muestra en la Figura 22. Los resultados de la simulación muestran que la inclusión de esta carga en cierto punto no genera caídas de voltaje ni sobrecargas, manteniendo los niveles dentro de márgenes operativos aceptables gracias a su moderada demanda energética y a la adecuada distribución de carga en la red, pero cabe recalcar que si el sistema original en si ya existe una sobrecarga en un tramo de la red por la alta densidad de usuarios en dichas zonas. En sí, la ubicación estratégica del punto de carga en el nodo a trabajar con infraestructura robusta minimiza impactos negativos y permite una integración eficiente.

5.2.2. Caso en base al alimentador Yugsiloma – Alaquéz – San Buenaventura

Tabla 11. Características alimentador Bellavista.

SECCIÓN	DISTANCIA (Km)	CARGA	USUARIOS	CARGA MEDIA (KW)	KVA
1	0,75	A	207	405,60	507,00
2	0,91	B	293	746,24	932,80
3	1,23	C	587	1419,83	1774,79
4	1,22	D	570	1013,81	1267,26
5	1,45	E	946	9867,95	12334,94
6	1,63	F	1281	8380,83	10476,04
7	0,56	G	144	573,65	717,06
NUMERO DE CLIENTES			4028		

Este alimentador corresponde al punto de carga con respecto a la ruta de Bellavista – El Niagara se realizó de igual manera un análisis de la red existente mediante la simplificación en un modelo unifilar con datos de cargas y usuarios existente, como se puede observar la Figura 23 con los datos de la Tabla 11.

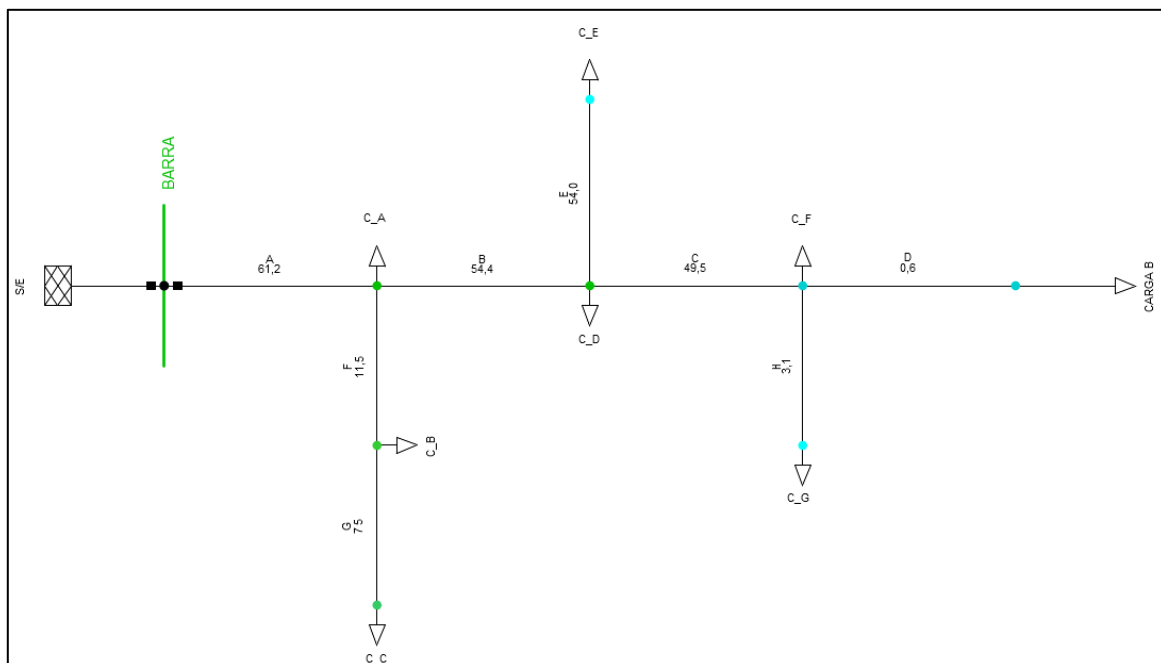


Figura 23. Diagrama unifilar del alimentador Yugsiloma - Alaquéz - San Buenaventura con aumento del punto de carga.

El análisis de la modelación evidencia que la red eléctrica actual tiene la capacidad de abastecer un cargador de buses eléctricos de 129 kW sin necesidad de realizar expansiones o reforzamientos en la infraestructura. Los resultados de la simulación indican que la integración de esta carga no compromete la estabilidad del sistema, ya que los niveles de voltaje se mantienen dentro de los rangos óptimos de operación. Esto sugiere que la red posee una capacidad suficiente para absorber la demanda adicional sin afectar su desempeño ni la calidad del suministro eléctrico. Además, la distribución eficiente de la carga dentro del sistema permite que la implementación del cargador se realice sin generar sobrecargas ni congestión en las líneas existentes, lo que demuestra que la infraestructura actual es adecuada para soportar este tipo de integración sin comprometer su eficiencia operativa.

5.2.3. Transporte terrestre en Latacunga

En Latacunga posee diferentes cooperativas de transporte terrestre.

Tabla 12. Modalidades de servicio de las diferentes flotas en Cotopaxi.

Flotas	Modalidad de servicio
CitiBus	Urbano y rural
Sultana de Cotopaxi	Urbano y rural

Como se puede observar la Tabla 12 nos da información de las diferentes flotas que posee Latacunga que operan en modalidades similares. Para el estudio del tema en mención se enfocará en la Compañía de Transporte Urbano Sultana de Cotopaxi.

Por concerniente en la Tabla 9 se puede evidenciar la cantidad de rutas que tiene la compañía en mención con su respectiva distancia total.

Según la Tabla 13 y la Figura 24. En Latacunga, el análisis de los tiempos de recorrido de las líneas de transporte público revela patrones interesantes. La mayoría de las rutas, como LTSL01 y LTSL02, mantienen tiempos de viaje constantes a lo largo del día, lo que sugiere que el tráfico y la demanda son bastante estables. Sin embargo, algunas líneas como LTSL06 presentan tiempos variables, lo que indica que factores externos como el tráfico pueden influir en la duración del viaje. Además, la línea LTSL11 opera solo en horarios específicos, como por la mañana y al mediodía, lo que sugiere que está diseñada para atender al mercado Mayorista durante sus horas de mayor actividad. Conocer estos

horarios y rutas es fundamental para los usuarios del transporte público en Latacunga, ya que permite una mejor planificación y optimización del sistema de transporte en la ciudad.

Tabla 13. Tiempos de duración por recorrido.

Descripción	Nombre de líneas	Tiempo de recorrido (horas)		
		<i>Mañana</i>	<i>Medio día</i>	<i>Tarde</i>
SALTO - SALACHE	LTSL01	1:02	1:02	1:02
BELLAVISTA - NIAGARA	LTSL02	1:15	1:15	1:15
PATUTAN - LA LAGUNA	LTSL03	1:15	1:15	1:15
EL SALTO - YUGSILOMA	LTSL04	1:52	1:52	1:52
SAN JUAN - EL CALVARIO	LTSL05	1:00	1:00	1:00
PUSUCHISI - EL SALTO	LTSL06	0:18	0:43	0:25
TILIPULO - LOCOA	LTSL07	1:09	1:09	1:09
SANTAN - NUEVA VIDA	LTSL08	1:08	1:08	1:08
EL SALTO - CEYPSA	LTSL09	1:06	1:01	1:01
CHUGCHILAN - EL SALTO	LTSL10	0:35	0:57	0:57
MAYORISTA - EL SALTO	LTSL11	0:20	0:20	0
PICHUL - EL SALTO	LTSL12	0:52	0:52	0:52

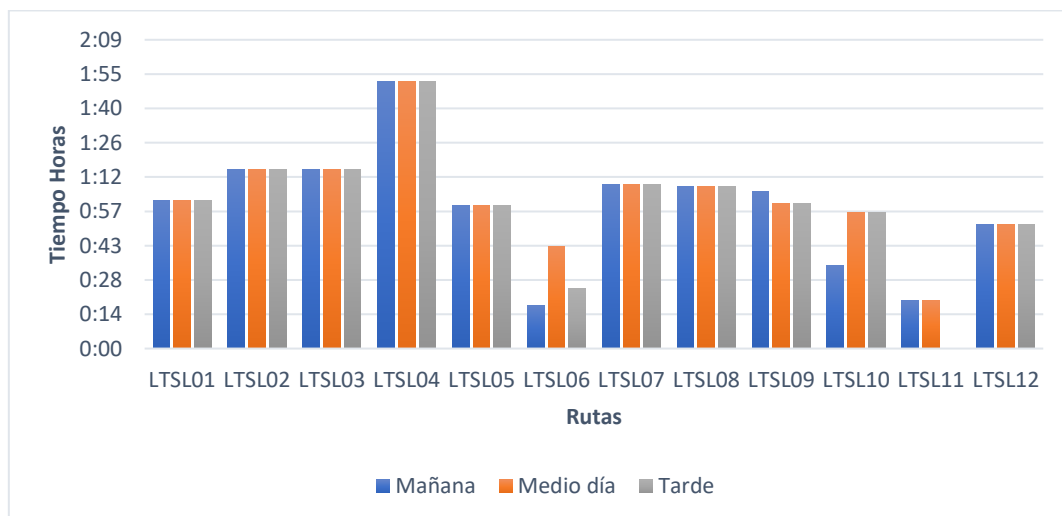


Figura 24. Comparación de tiempos de recorrido en distintos horarios.

5.2.4. Viabilidad técnica de los buses

La viabilidad técnica del bus Hino AK es favorable, ya que su diseño está adaptado a las condiciones de las carreteras ecuatorianas, garantizando un rendimiento óptimo y durabilidad. Este chasis, desarrollado en colaboración con Hino Japón, incluye características como un sistema de frenado 100% aire y ABS, lo que mejora la seguridad y el control. Su motor Hino J08E UD cumple con la normativa Euro 3, ofreciendo 247 HP y un torque máximo de 739 Nm, junto con una transmisión

manual de 6 marchas que proporciona la potencia necesaria para diversas condiciones de conducción. Además, los buses Hino AK están diseñados para recorrer más de un millón de kilómetros sin reparaciones mayores si se realiza un mantenimiento adecuado. El análisis estructural del chasis es esencial para entender su comportamiento mecánico y asegurar su durabilidad a largo plazo. En conjunto, estos aspectos hacen del bus Hino AK una opción viable y confiable para el transporte público [10].

Se analizó cómo factores como la inclinación de las rutas y el peso del vehículo afectan la eficiencia energética en el transporte eléctrico. BYD estima un consumo promedio de 1,7 kWh por kilómetro, considerando tanto el uso del tren motriz como la energía destinada a los sistemas auxiliares del vehículo. Este tipo de transporte destaca por su alta eficiencia energética, especialmente al operar dentro de un margen de seguridad (SOC). El modelo BYD K9G cumple con los requerimientos técnicos y satisface la demanda energética incluso en las rutas más exigentes. Para garantizar su operación durante toda la jornada, es necesario recargar las unidades eléctricas al menos una vez al día, evitando descargas profundas que puedan comprometer su rendimiento y vida útil [44].

En la Tabla 14 se puede evidenciar la comparación entre el Hino AK a diésel y el BYD K9G eléctrico.

Tabla 14. Comparaciones técnicas de los buses.

Característica	Hino AK	BYD K9G
Tipo de Motor	Diésel, motor HINO J08E-UD	Eléctrico
Potencia	247 HP	402 HP
Torque máximo	739 Nm	Torque instantáneo
Capacidad de Pasajeros	45	80
Sistema de Frenos	100% aire, ABS	Regenerativo
Transmisión	Manual, 6 marchas	Sin caja de cambios
Emisiones CO2	Normativa Euro 3 (0,621%)	Cero emisiones
Autonomía	No aplica	250+ km
Tiempo de Carga	No aplica	4-5 horas
Accesibilidad	Piso alto	Piso alto
Sistema de Seguridad	Cinturones de seguridad	Software para puertas
Dimensiones (L x A x H)	11140 mm x 2445 mm x 2100 mm	12000 mm x 2550 mm x 3300 mm
Peso Bruto Vehicular	14200 kg	No especificado

Durante un periodo de prueba de cinco meses, que tuvo lugar entre noviembre de 2017 y marzo de 2018, el bus eléctrico K9G circuló por las calles de Guayaquil. Durante este tiempo, logró un recorrido diario promedio de 230 kilómetros, finalizando cada día con un 20% de carga en su batería. Este ensayo demostró la viabilidad del transporte eléctrico en la ciudad, beneficiando a miles de usuarios que optaron por esta alternativa más sostenible [53].

El análisis realizado en Guayaquil destaca la influencia de la densidad del aire en el consumo de combustible, lo que es crucial para determinar si este estudio puede aplicarse a Latacunga, que se encuentra a una altitud de 2,850 msnm, en comparación con Guayaquil, que está entre 4 y 6 msnm. En la región Sierra, se observó que el consumo de combustible varió entre 6.793 y 6.911 L/100 km, mientras que, en la Costa se registró un consumo de entre 7.188 y 7.224 L/100 km. Esto indica que en Guayaquil hay un mayor consumo de combustible, un 5.9% más que en la Sierra, lo que sugiere que la resistencia aerodinámica impacta más en la región costera [54], [55], [56].

5.2.5. Viabilidad económica

El costo del bus eléctrico BYD K9G se ha analizado en el contexto de dos rutas específicas, donde se observó que los precios de los pasajes son casi idénticos. La cantidad de pasajeros, las vueltas por unidad y la distancia recorrida se determinaron a través de una solicitud dirigida a la compañía de transporte. En cuanto al mantenimiento, se establece un costo de \$0.05 por kilómetro, que, al multiplicarse por la distancia recorrida en la ruta el día y los 365 días del año, proporciona un valor anual significativo. Se puede observar dichos valores en la Tabla 15. Por otra parte la vida útil del vehículo está fijada en 25 años según la ordenanza metropolitana No. 092, lo que permite proyectar los costos y beneficios a largo plazo [44], [57].

Este análisis es crucial para entender la viabilidad económica del bus eléctrico en el transporte urbano. Con un mantenimiento relativamente bajo y una vida útil prolongada, el BYD K9G no solo representa una inversión inicial significativa, sino que también promete ingresos estables a lo largo de su vida operativa. Esto sugiere que, a pesar de los costos iniciales más altos en comparación con los buses diésel, los beneficios operativos y la reducción de emisiones pueden hacer que esta opción sea más atractiva en el futuro.

Tabla 15. Costos de amortización de las unidades.

Bus eléctrico BYD K9G			Unidades
Ruta	Bellavista - Niagara	Patutan - La Laguna	
Cantidad de unidades en ruta	6	6	U
Vueltas por unidad	5	5	U
Cantidad de pasajeros por vuelta	70	75	U
Total de pasajeros en el día por unidad	350	375	U
Precio del pasaje	0,30	0,30	USD
Ingreso del pasaje día	105,00	112,50	USD/Día
Mantenimiento año	2007,50	1916,25	USD/Año
Ingreso anual por unidad menos mantenimiento	36317,50	39146,25	USD/Año
Ingreso anual total de unidades	217905,00	234877,50	USD/Año
Vida útil Bus eléctrico	25	25	Año
Valor anual de amortización por unidad	907937,50	978656,25	USD/Año
Valor total de las unidades en 25 años de vida útil (6% Inflación)	5774482,50	6224253,75	USD

Al comparar los costos iniciales entre un bus diésel Hino AK y un bus eléctrico BYD K9G, se observa una diferencia significativa en el precio. Mientras que el Hino AK tiene un valor de \$132,900, el BYD K9G cuesta \$419,500, lo que representa más del triple del costo del bus diésel. Esta diferencia refleja la tecnología avanzada de los buses eléctricos, como su motor libre de emisiones, baterías de alta capacidad y sistemas de seguridad modernos, como se puede evidenciar en la Tabla 16.

Sin embargo, aunque el costo inicial del bus eléctrico es considerablemente más alto, es importante evaluar otros factores a largo plazo, como los menores costos de mantenimiento (aproximadamente \$0.05 por kilómetro frente a \$0.30 por kilómetro en buses diésel), la ausencia de gastos en combustibles fósiles y su vida útil prolongada. Además, los buses eléctricos ofrecen beneficios ambientales al no emitir CO₂, lo que contribuye a una movilidad más sostenible. Por lo tanto, aunque la inversión inicial es mayor, el ahorro operativo y los beneficios ecológicos pueden justificar la elección de un bus eléctrico en proyectos de transporte público a largo plazo [44], [58].

Tabla 16. Precio de la unidad, TIR y VAN.

Tipo bus	Modelo	Valor bus	Unidad	TIR	VAN
Diesel	AK	132900,00	USD	0,90	1205235,12
Eléctrico	K9G	419500,00	USD	0,28	896257,62

Para entender mejor los indicadores financieros de TIR (Tasa Interna de Retorno) y VAN (Valor Actual Neto) en el contexto de las opciones eléctrica y diésel, es importante saber qué significan y

cómo se interpretan. La TIR nos muestra la tasa de retorno que un proyecto puede generar sobre su inversión inicial. En este caso, el proyecto diésel tiene una TIR mucho más alta (90,33%) que el proyecto eléctrico (28,08%), lo que indica que el proyecto diésel es considerablemente más rentable. Por otro lado, el VAN nos dice si un proyecto es rentable o no. Aquí, el proyecto diésel también tiene un VAN más alto (1205235,12) que el proyecto eléctrico (896257,62), lo que significa que genera más beneficios netos estos datos se pueden observar en la Tabla 16.

El análisis de inversión para las rutas de los buses eléctricos BYD K9G, tanto en Bellavista - Niagara como en Patutan - La Laguna, muestra un compromiso significativo hacia la modernización del transporte público. En ambas rutas, el costo total de inversión asciende a \$2657922, que incluye elementos esenciales como un transformador trifásico de 150 kVA, valorado en \$55922, y un terreno de 1750 m² por \$70000. También se contempla la instalación de tres cargadores eléctricos a un costo total de \$15000, además de la adquisición de seis buses K9G, cada uno con un precio unitario de \$419500, sumando un total de \$2517000 solo en buses [59], [60].

Estos costos se pueden observar de manera más detallada en la Tabla 17.

Este nivel de inversión refleja no solo la intención de mejorar la infraestructura del transporte público, sino también el potencial para generar ingresos sostenibles a largo plazo. Al integrar tecnología eléctrica en el sistema de transporte, se espera no solo reducir costos operativos y de mantenimiento a lo largo del tiempo, sino también contribuir a una movilidad más ecológica y eficiente. La inversión inicial puede parecer alta, pero considerando la vida útil del bus eléctrico y los beneficios ambientales asociados, se presenta como una opción viable y necesaria para el desarrollo urbano sostenible en Latacunga.

Tabla 17. Costos de inversión.

Ruta	Inversión		Unidad
	Bellavista - Niagara	Patutan - La Laguna	
Valor de transformador 3F, 150 kVA	55922,00	55922,00	USD
Valor del predio de 1750m ²	70000,00	70000,00	USD
Cantidad de cargadores	3	3	U
Valor de cargadores individual	5000,00	5000,00	USD
Valor total de cargadores	15000,00	15000,00	USD

Inversión			Unidad
Ruta	Bellavista - Niagara	Patutan - La Laguna	
Cantidad de unidades en ruta	6	6	U
Precio unitario de bus K9G	419500,00	419500,00	USD
Precio total buses	2517000,00	2517000,00	USD
Precio total inversión	2657922,00	2657922,00	USD

El tiempo de recuperación de la inversión para los buses eléctricos BYD K9G en las rutas Bellavista - Niagara y Patutan - La Laguna es de 12 y 11 años, respectivamente como se indica en la Tabla 18. Estos plazos indican que, aunque la inversión inicial en tecnología eléctrica puede ser alta, los beneficios económicos a largo plazo son significativos. En el caso de Bellavista - Niagara, la recuperación se extiende a un año más que en Patutan - La Laguna, lo que podría atribuirse a factores como la cantidad de pasajeros, la frecuencia de las rutas o los costos operativos asociados.

Estos tiempos de recuperación son razonables considerando la vida útil de 25 años de los buses, lo que sugiere que, después de este periodo, las unidades seguirán generando ingresos sin los costos iniciales de inversión. Además, el uso de buses eléctricos no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir las emisiones de CO₂, sino que también puede resultar en ahorros operativos a largo plazo gracias a menores costos de mantenimiento y combustible. En resumen, aunque el retorno de la inversión toma varios años, el análisis sugiere que invertir en buses eléctricos es una decisión financieramente viable y beneficiosa para el transporte público en el futuro.

Tabla 18. Tiempo de recuperación de inversión

Ruta	Tiempo de recuperación de inversión	Unidad
Bellavista - Niagara	12	Años
Patutan - La Laguna	11	Años

5.2.6. Viabilidad ambiental

De los vehículos eléctricos en Ecuador es alentadora, pero su éxito depende de la colaboración entre el gobierno, la industria y la sociedad. Las emisiones indirectas de estos vehículos varían según la fuente de energía utilizada. A pesar del alto impacto ambiental asociado con la producción de baterías,

este puede ser mitigado mediante prácticas sostenibles y un adecuado reciclaje. La clave para maximizar los beneficios ambientales radica en avanzar hacia fuentes de energía más limpias y en implementar sistemas de reciclaje eficientes que minimicen el impacto negativo. La transición hacia la movilidad eléctrica no solo contribuirá a la reducción de emisiones contaminantes, sino que también mejorará la calidad del aire en las ciudades, apoyando así un desarrollo urbano más sostenible.

Con los datos recopilados y analizados, se realizó un estudio de viabilidad ambiental considerando el impacto de la distancia recorrida diariamente y el consumo de diésel por las unidades de transporte. A través de estos cálculos, se evaluó la combustión de combustible para obtener resultados favorables en términos de sostenibilidad.

Tabla 19. Resumen rutas de Sultana de Cotopaxi.

Nombre de líneas	Descripción	Distancia por recorrido (Km)	Frecuencia de recorrido	Recorrido total diario (Km)	Combustible consumido (Km)/Gal	Combustible total al día (Gal)
LTSL01	SALTO - SALACHE	12,70	6	76,20	11,50	6,63
LTSL02	BELLAVISTA - NIAGARA	22	5	110	11,50	9,57
LTSL03	PATUTAN - LA LAGUNA	21	5	105	11,50	9,13
LTSL04	EL SALTO - YUGSILOMA	16	7	112	11,50	9,74
LTSL05	SAN JUAN - EL CALVARIO	24	7	168	11,50	14,61
LTSL06	PUSUCHISI - EL SALTO	15	9	135	11,50	11,74
LTSL07	TILIPULO - LOCOA	26	4	104	11,50	9,04
LTSL08	SANTAN - NUEVA VIDA	22	4	88	11,50	7,65
LTSL09	EL SALTO - CEYPSA	22	5	110	11,50	9,57
LTSL10	CHUGCHILAN - EL SALTO	26	6	156	11,50	13,57
LTSL11	MAYORISTA - EL SALTO	18,90	6	113,40	11,50	9,86
LTSL12	PICHUL - EL SALTO	7,70	10	77	11,50	6,70

La Tabla 19 presenta la distancia total recorrida por los buses y el total de galones de diésel quemados a lo largo del día. Este valor se calcula multiplicando la distancia de un recorrido completo por la cantidad de veces que cada bus repite dicha ruta en una jornada y el valor lo dividimos por el promedio

de kilómetros por galón quemados que viene a ser de 11,50 (Km/Gal) valor promedio para todas las unidades. Este análisis permite evaluar el uso de combustible y el desgaste de las unidades.

$$\text{Recorrido total} = \text{Distancia del recorrido} * \text{Frecuencia del recorrido} \quad (9)$$

$$\text{Combustible total} = \frac{\text{Recorrido total (Km)}}{\text{Combustible quemado (Km/Gal)}} \quad (10)$$

Determinado el consumo diario de combustible, se procede a calcular las emisiones totales generadas por cada unidad. Para ello, se aplica un factor de emisión de 2,69 kg de CO₂ equivalente por litro de diésel consumido, según los valores establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos para este tipo de vehículos.

$$\text{Factor de emisión por Gal de CO}_2 = 2,69 \text{ kg de CO}_2 \text{ lt} * 3,78541 \frac{\text{Gal}}{\text{lt}} \quad (11)$$

$$\text{Factor de emisión por Gal de CO}_2 = 10,18 \text{ kg de CO}_2 \text{ Gal}$$

Tabla 20. Emisiones de CO₂ en todas las rutas.

Nombre de líneas	Descripción	Gasto diario Gal	Kg de CO ₂ por Galón	Emisiones de CO ₂ (kg)
LTSL01	SALTO - SALACHE	6,63	10,18	67,45
LTSL02	BELLAVISTA - NIAGARA	9,57	10,18	97,37
LTSL03	PATUTAN - LA LAGUNA	9,13	10,18	92,95
LTSL04	EL SALTO - YUGSILOMA	9,74	10,18	99,14
LTSL05	SAN JUAN - EL CALVARIO	14,61	10,18	148,72
LTSL06	PUSUCHISI - EL SALTO	11,74	10,18	119,50
LTSL07	TILIPULO - LOCOA	9,04	10,18	92,06
LTSL08	SANTAN - NUEVA VIDA	7,65	10,18	77,90
LTSL09	EL SALTO - CEYPSA	9,57	10,18	97,37
LTSL10	CHUGCHILAN - EL SALTO	13,57	10,18	138,09
LTSL11	MAYORISTA - EL SALTO	9,86	10,18	100,38
LTSL12	PICHUL - EL SALTO	6,70	10,18	68,16

Como se observa en la Tabla 20 se entiende que una vez calculadas las emisiones de CO₂ en todas las rutas, el análisis se enfoca en las emisiones anuales de las rutas LTSL02 y LTSL03 con todas las unidades que componen esas rutas, ya que en estas se prevé la incorporación de los centros de carga como se puede observar los resultados en la Tabla 21 mediante las ecuaciones 12 y 13.

$$\text{CO}_2 \text{ anuales (kg)} = \text{Emisiones de CO}_2 \text{ (kg)} * 365 \quad (12)$$

$$CO_2 \text{ anuales} (ton) = CO_2 \text{ anuales} (kg) * \frac{1}{1000(kg)} \quad (13)$$

Tabla 21. Emisiones anuales de CO2 por unidad por ruta.

Nombre de líneas	Descripción	Emisiones de CO2 (kg)	Emisiones de CO2 anual (kg)	Emisiones de CO2 (ton)
LTSL02	BELLAVISTA - NIAGARA	97,37	35540,05	35,54
LTSL03	PATUTAN - LA LAGUNA	92,95	33926,75	33,93

$$Emisiones \text{ LTSL} (ton) = LTSL02 + LTSL03 \quad (14)$$

$$Emisiones \text{ LTSL} (ton) = 35,54 \text{ ton } CO_2 + 33,93 \text{ ton } CO_2$$

$$Emisiones \text{ LTSL} (ton) = 69,47 \text{ ton } CO_2$$

$$Total \text{ de emisiones} (ton) = 69,47 \text{ ton } CO_2 * 12 \text{ buses} \quad (15)$$

$$Total \text{ de emisiones de } CO_2 \text{ anuales} (ton) = 833,60 \text{ ton } CO_2$$

Para lo que corresponde las emisiones emitidas por perdidas se trabaja con el factor de emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado (SNI) de Ecuador se actualiza cada año y puede experimentar ligeras variaciones. De acuerdo con el "Informe del Factor de Emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador" correspondiente al 2022, emitido por el CENACE, dicho factor se establece en 0,102 toneladas de CO₂ por MWh [61].

Entonces si la carga es de 129 kW y opera las 10 horas al día, recalculamos las emisiones de CO₂ con el factor de emisión (0,102 tCO₂/MWh).

$$Energía \text{ diaria} = 129 \text{ kW} * 10 \text{ h} = 1290 \text{ kWh} = 1,29 \text{ MWh}$$

$$Energía \text{ anual} = 1,29 * 365 = 470,85 \text{ MWh}$$

$$Emisiones \text{ de } CO_2 \text{ anual} (ton) = 470,85 * 0,102 = 48,03 \text{ ton de } CO_2 \text{ al año}$$

$$Emisiones \text{ de } CO_2 \text{ anual} (ton) \text{ en los dos puntos de carga} = 96,06 \text{ ton } CO_2 \text{ año}$$

Tabla 22. Emisiones de CO2 por carga y diésel

Descripción	Valor	Unidad
Emisiones CO2 por carga	96,06	Ton
Emisiones CO2 por diésel	833,6	Ton

Se comparan las emisiones actuales de buses diésel respecto a la LTSL02 y LTSL03 con las emisiones de los puntos de carga de los buses eléctricos.

$$\text{Reducción \%} = \left(\frac{\text{Emisiones}_{fósiles} - \text{Emisiones}_{eléctricas}}{\text{Emisiones}_{fósiles}} \right) \times 100 \quad (16)$$

$$\text{Reducción \%} = \left(\frac{833,60 - 96,06}{833,60} \right) \times 100$$

$$\text{Reducción \%} = 89\%$$

El reemplazo de los buses diésel por buses eléctricos reduciría las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 89%. Esto representa una reducción muy significativa, lo que contribuiría de manera importante a la disminución de la huella de carbono del transporte público. Además, se espera que, con el tiempo, la matriz energética se vuelva más limpia, lo que reduciría aún más las emisiones de los buses eléctricos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- El presente trabajo reveló que el transporte eléctrico urbano está experimentando una transformación significativa hacia un modelo más sostenible y eficiente. La clave de este cambio radica en la electrificación de las flotas de vehículos, el desarrollo de infraestructuras de recarga más accesibles, y la integración de servicios a través de plataformas que ofrecen movilidad como servicio.
- Se analizan las rutas de la compañía que son 12 de la cual el trabajo de estudio se realizó en las rutas Bellavista - Niagara y Patutan - El Salto por tener un tiempo de recorrido de 1:15 horas con tiempo significativo de parada en el extremo de la ruta, con la posesión de buses convencionales con su mayoría en marca Hino AK.
- El análisis revela que independientemente del horario en que se realice el recorrido, el bus debe cumplir con el mismo horario establecido por la compañía. Además, se observa que el promedio de pasajeros a lo largo de todo el recorrido de las rutas estudiadas es de aproximadamente 70 personas. Esto sugiere una demanda constante a lo largo del día durante los 5 recorridos que realiza cada unidad.
- La implementación del bus eléctrico K9G representa un avance significativo en la movilidad urbana, con una autonomía de 250 km y una batería de 324 kWh que permite un rendimiento eficiente con sus 402HP. Con un ingreso anual por unidad de \$36317,50 y una notable reducción del 89% en las emisiones de CO₂ al sustituir buses tradicionales en las rutas Bellavista - Niagara y Patutan - El Salto, este modelo no solo contribuye a un transporte más limpio, sino que también se traduce en beneficio económico para la ciudad.
- El autobús Diesel AK parece ser más rentable que el autobús Eléctrico K9G en términos de TIR y VAN, lo que sugiere que invertir en un Diesel podría ser más atractivo a corto plazo. Sin embargo, es importante considerar otros factores. Los autobuses Diesel tienen un impacto ambiental negativo, mientras que los eléctricos son más sostenibles. Además, aunque los eléctricos tienen un costo inicial más alto, sus costos operativos a largo plazo son menores. Las políticas gubernamentales también pueden influir en la rentabilidad de los eléctricos, ofreciendo incentivos que podrían mejorar su viabilidad financiera en el futuro.

6.2. RECOMENDACIONES

- Para maximizar el impacto ambiental de la compañía, se sugiere ampliar el análisis a los demás alimentadores de las rutas restantes. Actualmente, la sustitución teórica de 12 unidades ha logrado una reducción del 7,9% en las emisiones de CO₂. Sin embargo, al estudiar todos los alimentadores, se podría identificar oportunidades adicionales para optimizar la infraestructura y aumentar significativamente este porcentaje. Esto permitiría una transición más efectiva hacia un transporte público más sostenible y eficiente en toda la red urbana.
- Como medida complementaria para próximos estudios se sugiere evaluar el sistema existente, con el fin de suministrar o inyectar mediante energías renovables u alguna otra fuente de almacenamiento de energía la gestión de carga inteligente, para optimizar el desempeño del sistema ya que en cierto tramo de la red existe sobre carga y esto podría afectar futuras expansiones de la red en la ruta Patutan – La Laguna.
- Para la continuación del estudio del presente trabajo es crucial considerar una serie de restricciones interconectadas. Desde el punto de vista técnico, la capacidad de la red eléctrica y la ubicación estratégica de los puntos de carga son fundamentales para asegurar una operación eficiente. Económicamente, los costos de infraestructura y energéticos deben ser rentables y sostenibles a largo plazo. Ambientalmente, la reducción de emisiones y el uso eficiente de recursos son esenciales para cumplir con las políticas de sostenibilidad.

7. REFERENCIAS

- [1] «Top 3: Los líderes del mercado de buses eléctricos en Europa - Mobility Portal: Noticias sobre vehículos eléctricos». Accedido: 17 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://mobilityportal.lat/top-3-los-lideres-del-mercado-de-buses-electricos-en-europa/>
- [2] «Los buses eléctricos transforman el transporte público», Moviliblog. Accedido: 17 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.iadb.org/transporte/es/los-autobuses-electricos-pueden-transformar-el-transporte-publico-de-america-latina/>
- [3] W. L. Alvear Muevecela, «Diseño del sistema eléctrico en baja tensión para estaciones de carga de autobuses eléctricos», bachelorThesis, 2019. Accedido: 17 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32467>
- [4] P. M. López Domínguez y P. Aguilar Izeta, «LA MOVILIDAD URBANA: NOTAS PARA SU DISCUSIÓN ACADÉMICA», *TLATEMOANI*, n.º 32, pp. 88-99, dic. 2019.
- [5] R. Garrido Hidalgo, *Modelación de sistemas de distribución de carga*, 1.ª ed. Santiago - Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001. Accedido: 12 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://isbn.cloud/9789561406179/modelacion-de-sistemas-de-distribucion-de-carga/>
- [6] S. E. Argüello Erazo, R. N. Villa Uvidia, y J. P. Palahuachi Sumba, *Historia y evolución de la gestión del transporte público urbano en la provincia de Chimborazo*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2020. [En línea]. Disponible en: [cimogsys.esPOCH.edu.ec/direccion-publicaciones/public/docs/books/2021-01-26-153522-Historia%20y%20evolucion%20de%20la%20gestion%20del%20transporte%20\(1\).pdf](http://cimogsys.esPOCH.edu.ec/direccion-publicaciones/public/docs/books/2021-01-26-153522-Historia%20y%20evolucion%20de%20la%20gestion%20del%20transporte%20(1).pdf)
- [7] F. E. Romero Yanchapaxi, *El Transporte terrestre de pasajeros en Ecuador y Quito: perspectiva histórica situación actual*. Quito - Ecuador: Instituto Nacional de Estadística y Censos. [En línea]. Disponible en: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Estudios/Estudios_Economicos/Transporte_Quito.pdf
- [8] D. R. Hansen y M. M. Mowen, *Cost management: accounting and control*, 5. ed., Internat. student ed. Mason, Ohio London: Thomson/South-Western, 2006. [En línea]. Disponible en: https://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/e2T9C3_administracion%20de%20costos%20contabilidad%20control%20usar1.pdf
- [9] F. Payri y J. M. Desantes, *MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS*, 5.ª ed. Barcelona - España: REVERTÉ, 2015. [En línea]. Disponible en: https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/130ad267-fe67-4ec7-8363-51b16ffe11a6/TOC_0809_04_01.pdf?guest=true
- [10] «Especificaciones técnicas», Hino. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://app-national.hubspotdocuments.com/documents/21716028/view/688579857?accessId=ec3dcd>
- [11] Ministerio de Energía Chile, «Plataforma de Electromovilidad - Introducción a la electromovilidad, definiciones». Accedido: 23 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://energia.gob.cl/electromovilidad/introduccion>
- [12] M. McQueen, G. Abou-Zeid, J. MacArthur, y K. Clifton, «Transportation Transformation: Is Micromobility Making a Macro Impact on Sustainability?», *J. Plan. Lit.*, vol. 36, n.º 1, pp. 46-61, feb. 2021, doi: 10.1177/0885412220972696.
- [13] J. Scheurenbrand, C. Engel, F. Peters, y N. Köhl, «Holistically Defining E-Mobility: A Modern Approach to Systematic Literature Reviews», *Proc. First Karlsr. Serv. Summit Workshop - Adv. Serv. Res. Karlsr. Ger. Febr. 2015 Ed R Görlitz*, pp. 17-27, 2015.
- [14] D. Zunino Singh, P. Jirónn, G. Guicci, y C. Ulriksen Moretti, *Nuevos términos clave para los estudios de movilidad en América Latina*. Teseo, 2023. Accedido: 24 de enero de 2025. [En

- línea]. Disponible en:
<https://www.teseopress.com/terminosclaveparalosestudiosdemovilidadenamericalatina/chapter/electromovilidad/>
- [15] D. R. Idrovo Pulla y C. S. Loayza Flores, «Análisis comparativo de los costos operativos entre un vehículo de combustión interna y un vehículo eléctrico en la ciudad de Cuenca», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15082/1/UPS-CT007441.pdf>
- [16] O. Ispanixtlahuatl, O. Amador, y Chirino, «Autos eléctricos: ¿solución real o cambio de problema ambiental? - UNAM Global», UNAM Global. Accedido: 27 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://unamglobal.unam.mx/global_revista/autos-electricos-solucion-real-o-cambio-de-problema-ambiental/
- [17] P. Díez González, «PRINCIPIOS BÁSICOS DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO», Tesis de Pregrado, UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, España, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/222807924.pdf>
- [18] D. F. Sarango Casanova, «Caracterización tecnológica del vehículo eléctrico híbrido a través de la definición de su tren de potencia y modelo matemático», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil - Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22520/1/UPS-GT003720.pdf>
- [19] M. S. Alegre Buj, «MODELADO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO E HÍBRIDO PARALELO POR MEDIO DE MATLAB/SIMULINK Y PLANIFICACIÓN DE ESTACIONES DE CARGA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y ALGORITMOS GENÉTICOS», Tesis de Posgrado, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid - España, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://apidspace.lindh.uned.es/server/api/core/bitstreams/9b12bb1f-49bf-4fda-a35e-8eb4684c9b52/content>
- [20] E. A. Nanaki, «Chapter 2 - Electric vehicles», en *Electric Vehicles for Smart Cities*, E. A. Nanaki, Ed., Elsevier, 2021, pp. 13-49. doi: 10.1016/B978-0-12-815801-2.00006-X.
- [21] L. F. Quintero Abril, «EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS VEHÍCULOS CON TECNOLOGÍA HÍBRIDA EN EL SECTOR ASEGURADOR PARA LA EMPRESA CESVI COLOMBIA S.A», Tesis de Pregrado, Fundación Universidad de América, Bogotá, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7893/1/4081053-2020-1-IM.pdf>
- [22] E. E. & R. E. U. S. Department of Energy, «Vehículos eléctricos híbridos y enchufables», p. 4, ago. 2015.
- [23] C. E. Reynolds Sr., «An Overview of Hybrid Electric Vehicle (HEV) Technologies», ATE Central. Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://atecentral.net/r23088/an_overview_of_hybrid_electric_vehicle_hev_technologies
- [24] P. W. Ullán, «Vehículos híbridos. Pasado, presente y futuro.», Tesis de Posgrado, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona - España, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/329690/tfm-wali-o-pablo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [25] C. Gorbea, T. Spielmannleitner, U. Lindemann, y E. Fricke, «ANALYSIS OF HYBRID VEHICLE ARCHITECTURES USING MULTIPLE DOMAIN MATRICES», *Int. Des. Struct. MATRIX Conf. DSM'08*, vol. 10TH, p. 13, nov. 2008.
- [26] P. G. Anselma, A. Biswas, G. Belingardi, y A. Emadi, «Rapid assessment of the fuel economy capability of parallel and series-parallel hybrid electric vehicles», *Appl. Energy*, vol. 275, p. 115319, oct. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115319.

- [27] A. Ahmed, P. Yelamali, y R. Udayakumar, «Modelling and simulation of hybrid technology in vehicles», *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 589-594, feb. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2019.11.123.
- [28] Y. Wang, X. Wang, Y. Sun, y S. You, «Model predictive control strategy for energy optimization of series-parallel hybrid electric vehicle», *J. Clean. Prod.*, vol. 199, pp. 348-358, oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.191.
- [29] R. P. Cevallos Cedeño y E. D. Erazo Achina, «TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ», Tesis de Pregrado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra - Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/15407/2/04%20AUT%20027%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- [30] C. S. Carrión de la Cruz y A. G. Mora Granda, «Análisis comparativo de la eficiencia del vehículo eléctrico Kia Soul en recorridos en la ciudad de Loja y en la ciudad de Machala utilizando Machine Learning para establecer factores de mayor afección en esta», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21520/1/UPS-CT009470.pdf>
- [31] «Hyundai Ecuador». Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hyundai.com.ec/>
- [32] L. F. Santacruz Guevara, «ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS», Tesis de Pregrado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra - Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/14862/2/04%20MAUT%20257%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- [33] «Infographics», Hyundai Motor Group. Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hyundaimotorgroup.com/news/infographics>
- [34] F. M. Moreno, «Vehículos Eléctricos. Historia, Estado Actual Y Retos Futuros», *Eur. Sci. J.*, pp. 118-131, may 2016.
- [35] R. Berizzo, «Convertidor e inversor: electrónica básica de los vehículos eléctricos», p. 7, julio de 2021.
- [36] Hebei Nanfeng Automobile Equipment (Group) Co.,Ltd, «Unidad de control del vehículo (VCU) para vehículos de nueva energía - Conocimiento». Accedido: 2 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.autopreheaters.com/info/vehicle-control-unit-vcu-for-new-energy-vehi-99357271.html>
- [37] L. Munford, «Vehículo eléctrico», *RED Electr. Esp.*, p. 96, 2019.
- [38] LugEnergy2020ESP, «Modos de Carga de Coche Eléctrico: 4 Tipos», LugEnergy. Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.lugenergy.com/modos-de-recarga-vehiculos-electricos/>
- [39] «Cargadores Coches Eléctricos-Sialsolhome», Sialsolhome. Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sialsolhome.com/categoria-producto/cargadores-coches-electricos/>
- [40] Dirección de Movilidad y Transporte, «Tipos de cargadores en autos híbridos enchufables y eléctrico», Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, Secretaría de Energía SENER., México D.F., dic. 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/794569/ficha_tecnica_cargadores.pdf
- [41] V. M. Ruiz Castillo y H. F. Villacreses Novillo, «Análisis de los costos operativos entre el Sistema de Transporte Público Urbano y el Tranvía de la Ciudad de Cuenca en el 2014», bachelorThesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2015. Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7762>

- [42] R. R. Paez Advincula, «Grado de importancia de las finanzas y costos en el sector empresarial», *Ind. Data*, vol. 21, n.º 2, Art. n.º 2, dic. 2018, doi: 10.15381/idata.v21i2.15609.
- [43] K. Molina Cedeño, P. Molina Cedeño, y J. S. Laje Montoya, «La contabilidad de costos y su relación en el ámbito de aplicación de las entidades manufactureras o industriales», *J. Sci. Res. Rev. Cienc. E Investig.*, vol. 4, n.º 1, pp. 15-20, ene. 2019, doi: 10.5281/zenodo.3240566.
- [44] «Bus Eléctrico K9G», BYD. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bydelectrico.com/ec/portfolio/bus-electrico-k9g/>
- [45] «Autobús eléctrico BYD B12», BYD. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bydeurope.com/byd-ebus-b12>
- [46] Dirección de Comunicación Social, «POLÍTICA NACIONAL DE MOVILIDAD URBANA SOSTENIBLE – Ministerio de Transporte y Obras Públicas», Política Nacional de Modalidad Urbana Sostenible - PNMUS. Accedido: 8 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.obraspublicas.gob.ec/politica-nacional-de-movilidad-urbana-sostenible-2/>
- [47] A. V. Sánchez Cárdenas y V. H. Baquero Medina, «INFORME PRELIMINAR», EMPRESA PÚBLICA DE MOVILIDAD DEL CANTÓN LATACUNGA, Latacunga - Ecuador, mar. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://movilidadlatacunga.gob.ec/content/uploads/2024/05/INFORME-DE-RENDICION-DE-CUENTAS-A-LA-GESTION-INSTITUCIONAL-DE-LA-EPMOL-PERIODO-2023-2.pdf>
- [48] «literal_d.pdf». Accedido: 23 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.latacunga.gob.ec/images/pdf/Lotaip/2021/jun/literal_d.pdf
- [49] Agencia Nacional de Tránsito, «Resolución No. 002-DIR-2021-ANT», Scribd. Accedido: 23 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/558480015/Resolucion-002-DIR-2021-ANT-Cuadro-Tarifario-de-Servicios-ANT-2021>
- [50] J. Fontalvo Díaz, P. Ramírez Peñaherrera, J. Constante Argüello, J. Fonseca Palacios, y C. Cruz Salazar, «Capítulo 1 - Energía, sociedad y ambiente», en *Balance Energetico Nacional 2023*, Primera., Quito - Ecuador: Ministerio de Energía y Minas - MEM, 2023, p. 32. [En línea]. Disponible en: https://www.rekursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2024/08/BEN_2023-cap_1.pdf
- [51] WorldBank, «World Bank Group - International Development, Poverty and Sustainability». Accedido: 18 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldbank.org/ext/en/home>
- [52] «Home | Transport & Environment». Accedido: 18 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.transportenvironment.org/>
- [53] «En marzo de 2019 Ecuador contará con la primera flota de buses eléctricos», BYD. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bydelectrico.com/ec/tag/bus-electrico/>
- [54] Empresa Pública Municipal de Tránsito de Guayaquil EP, «ANEXO CARACTERIZACIÓN URBANÍSTICA DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL», Municipalidad de Guayaquil, Guayaquil - Ecuador, Licitación TDR6. [En línea]. Disponible en: https://www.guayaquil.gob.ec/wp-content/uploads/Documentos/Autoridad%20de%20Transito%20Municipal/Proceso%20de%20Seleccion%20de%20Aliado%20Estrategico/Anexos%20Pliego%20Control%20de%20Tra%C%81nsito%2017-dic-2014/00_600_TDR6_ASP%20TERR.pdf
- [55] E. Grijalva, J. Acosta, E. Mancheno, E. Grijalva, J. Acosta, y E. Mancheno, «Influencia de la densidad del aire en el consumo de combustible en vehículos livianos», *Rev. Digit. Novasineria*, vol. 4, n.º 2, pp. 140-151, nov. 2021, doi: 10.37135/ns.01.08.09.
- [56] «Latacunga – Prefectura Cotopaxi». Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cotopaxi.gob.ec/test.cotopaxi.gob.ec/index.php/latacunga/>

- [57] Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, «Especificaciones Técnicas». Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. [En línea]. Disponible en: <https://www.pasajerosquito.gob.ec/concurso/especifica.pdf>
- [58] J. B. Chávez Zambrano, «Análisis y selección de un autobús eléctrico mediante la determinación del requerimiento de energía para impulsar movilidad sostenible en una ruta destinada al servicio de transporte urbano en la Ciudad de Riobamba», Tesis de Pregrado, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba – Ecuador, 2024. Accedido: 18 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/22696>
- [59] «41 Terrenos en Venta en Latacunga, Cotopaxi | PROPERATI». Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.properati.com.ec/s/latacunga/terreno/venta>
- [60] «Transformador Trifasico Pedestal (Pad Mounted) 150 KVA Rymel - INELDEC Paneles Solares Colombia Baterias de litio Energia Solar». Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ineldec.com/producto/transformador-trifasico-pedestal-pad-mounted-150-kva-rymel-magnetron/>
- [61] Ministerio de Energía y Minas, «Factor de emisión de CO2 del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador INFORME 2022». Ministerio de Energía y Minas, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.cenace.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/09/Informe-Factor-de-CO2-2022.pdf?>
- [62] Municipio de Quito, «ESTUDIO DE CASO». Municipio de Quito. [En línea]. Disponible en: <https://americadosul.iclei.org/wp-content/uploads/sites/78/2023/08/casestudy-quito-equador-es-vf.pdf>