REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA: INGENIERIA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE INTEGRACION CURRICULAR

TEMA:

"Estudio del sistema de carga a bordo para vehículos convertidos, caso de estudio: ciudades de altura"

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTORES:

Acosta Cadena Francisco Alexander

Contreras Guzman Benjhi Federico

DIRECTOR:

Ing. Hernandez Rueda Erik Paul, MSc.

Ibarra-Ecuador

2026

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Acosta Cadena Francisco Alexander Contreras Guzman Benjhi Federico

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Estudio del sistema de carga a bordo para vehículos convertidos, caso de estudio: ciudades de altura"
AUTOR (ES):	Acosta Cadena Francisco Alexander Contreras Guzman Benjhi Federico
FECHA: DD/MM/AAAA	15/09/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
PROGRAMA:	**X GRADO POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO AUTOMOTRIZ
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Erik Hernandez, MSc. Ing. Ignacio Benavides, MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los quince días del mes de septiembre de 2026.

Autor(es):

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FRANCISCO ALEXANDER ACOSTA CADENA

(f)……

Acosta Cadena Francisco Alexander

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
BENJHI FEDERICO CONTRERAS GUZMAN

(f)……

Contreras Guzman Benjhi Federico

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 15 de septiembre de 2026

Ing. Hernandez Rueda Erik Paul, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ERIK PAUL HERNANDEZ RUEDA

(f) .....

Ing. Hernandez Rueda Erik Paul, MSc.

C.C.: 1002978060

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular "Estudio del sistema de carga a bordo para vehículos convertidos, caso de estudio: ciudades de altura" elaborado por Acosta Cadena Francisco Alexander, Contreras Guzman Benjhi Federico, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ERIK PAUL HERNANDEZ RUEDA

(f) .....

Ing. Hernandez Rueda Erik Paul, MSc.

C.C.: 1002978060

(f) ..... Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
IGNACIO BAYARDO BENAVIDES CEVALLOS .....

Ing. Ignacio Bayardo Benavides Cevallos, MSc.

C.C.: 1002415949

DEDICATORIA

Este logro es para mi familia, por haber estado presente durante todo este camino y por acompañarme en cada etapa que me llevó hasta aquí. Detrás de este título hay años de esfuerzo, momentos de frustración, dudas, sacrificios y muchas ocasiones en las que tuve que aprender a seguir adelante aun cuando las cosas no salían como esperaba.

A mi padre, Abel, por enseñarme con su ejemplo el valor del trabajo, la responsabilidad y la constancia. Por estar presente durante este proceso y por apoyarme en cada momento en el que necesité seguir avanzando.

A mi madre, Domenica, por ser una parte fundamental de mi vida. Por su apoyo, sus consejos y por estar ahí durante los momentos buenos y también durante aquellos en los que el camino se hizo más pesado. Muchas de las cosas que hoy soy también son resultado de lo que he aprendido de ti.

A mi abuela, Inés, por todo el cariño, apoyo y confianza que me has brindado durante mi vida. Por estar presente y ser parte de tantos momentos que han contribuido a formar la persona que soy hoy.

A mis hermanos, Jhandyr y Jhostyn, por compartir conmigo esta etapa de mi vida. Espero que este logro también les recuerde que ninguna meta importante se consigue sin esfuerzo y que, muchas veces, la diferencia está en tener la disciplina necesaria para continuar cuando las ganas desaparecen.

Y finalmente, a mí mismo, por no haberme detenido. Este título no representa solamente una carrera terminada; representa la prueba de que la constancia puede llevarte mucho más lejos de lo que pensabas.

Acosta Cadena Francisco Alexander

DEDICATORIA

Dedico este logro, principalmente, a Dios, por ser mi guía y fortaleza durante todo este camino, por brindarme la sabiduría y perseverancia necesarias para superar cada dificultad y alcanzar esta meta.

A mi padre, Federico, por su apoyo incondicional y por estar siempre presente, compartiendo mis alegrías y siendo un espacio para desahogarme cuando las cosas no fueron fáciles. Gracias por cada palabra de aliento, por escucharme y ayudarme a sobrellevar las dificultades. Te amo, papá.

A mi madre, Alicia, por ser una de las personas más importantes en mi vida y por enseñarme a ser un hombre correcto y de buenos principios. Gracias por cada enseñanza y por ser uno de los pilares de nuestra familia. Te amo, mamá.

A mi hermana, Hanny, por estar siempre presente, por cada palabra de aliento y por cada ayuda brindada de manera desinteresada. Gracias por acompañarme y formar parte de cada etapa de mi vida. Te quiero mucho y me alegra compartir contigo este logro.

A mi novia, Alisson, por estar a mi lado en una de las etapas más importantes de mi vida. Gracias por impulsarme a superarme, por tus consejos, por estar presente en los momentos difíciles y por motivarme a mantenerme enfocado en mis objetivos. Te amo, me alegra haber coincidido en este camino contigo.

A Francisco, mi compañero de tesis y amigo, por compartir conmigo gran parte de este camino, por su apoyo y por todas las experiencias vividas.

A mis compañeros, por las risas, anécdotas y apoyo durante esta etapa. Gracias a todos por dejar una huella en mi vida y ser parte de este logro.

Contreras Guzman Benjhi Federico

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento, en primer lugar, a Dios, por brindarnos la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para culminar esta etapa y alcanzar esta meta.

A nuestros padres, por su apoyo incondicional, tanto emocional como económico, y por ser un pilar fundamental durante nuestra formación y la culminación de este proyecto.

Al Ing. Erik Paul Hernández Rueda, MSc., nuestro tutor, por su guía, disposición y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo, así como por sus conocimientos y valiosas recomendaciones.

Al Ing. Ignacio Bayardo Benavides Cevallos, MSc., por su asesoría, apoyo y orientación, que contribuyeron al desarrollo y culminación de este proyecto.

A la carrera de Ingeniería Automotriz, por brindarnos los conocimientos, recursos y herramientas necesarias para el desarrollo de este trabajo y nuestra formación profesional.

Finalmente, a la Universidad Técnica del Norte, nuestra casa de estudios, por brindarnos las oportunidades, conocimientos y herramientas necesarias para formarnos como profesionales en el campo automotriz.

Acosta Cadena Francisco Alexander

Contreras Guzman Benjhi Federico

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación analiza el comportamiento energético del vehículo Chevrolet Corsa 2004 convertido a propulsión eléctrica, mediante un estudio experimental desarrollado en la ruta comprendida entre la Universidad Técnica del Norte ubicada aproximadamente a 2200 m s. n. m. y con una presión atmosférica de 78 kPa y la parroquia de Zuleta ubicada aproximadamente a 2800 m s. n. m. y con una presión atmosférica de 72 kPa**.** Considerando tanto el trayecto de ida como el de retorno bajo condiciones reales de operación. El objetivo principal fue evaluar el desempeño energético del sistema de tracción eléctrica implementado, considerando variables como corriente, voltaje, potencia, velocidad, altitud, consumo energético y estado de carga del sistema de baterías. Se utilizó un sistema de adquisición de datos digitales que permitieron registrar la información eléctrica y dinámica durante el ciclo de conducción. Los resultados evidenciaron una influencia directa de las condiciones topográficas sobre el consumo energético del vehículo, registrándose mayores demandas de corriente y potencia durante los tramos de ascenso y una reducción significativa del consumo energético durante los segmentos descendentes pero incapaz de aumentar el nivel de la batería. Asimismo, se determinó un consumo específico aproximado de 146.8 Wh/km y un consumo energético total cercano a 5.89 kWh para una distancia recorrida de 40.12 km. Adicionalmente, se desarrolló un modelo teórico ideal bajo las mismas condiciones de operación, permitiendo comparar el desempeño energético experimental frente a un escenario idealizado. Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que las condiciones topográficas y dinámicas de conducción influyen significativamente sobre la autonomía y eficiencia energética de vehículos eléctricos convertidos que operan en rutas interandinas de altura.

Palabras clave: consumo energético, autonomía, perfil topográfico, movilidad eléctrica, sistema de tracción eléctrica.

ABSTRACT

This research analyzes the energy behavior of a 2004 Chevrolet Corsa converted to electric propulsion through an experimental study conducted on the route between the Universidad Técnica del Norte, located at approximately 2200 m a.s.l. with an atmospheric pressure of 78 kPa, and the parish of Zuleta, located at approximately 2800 m a.s.l. with an atmospheric pressure of 72 kPa. Both the outbound and return trips were considered under real operating conditions. The main objective was to evaluate the energy performance of the implemented electric traction system, considering variables such as current, voltage, power, speed, altitude, energy consumption, and battery state of charge. A digital data acquisition system was used to record electrical and dynamic information during the driving cycle. The results showed a direct influence of topographic conditions on the vehicle's energy consumption, with higher current and power demands recorded during uphill sections and a significant reduction in energy consumption during downhill segments, but without increasing the battery level. Likewise, an approximate specific energy consumption of 146.8 Wh/km and a total energy consumption of approximately 5.89 kWh were determined for a distance of 40.12 km. Additionally, an ideal theoretical model was developed under the same operating conditions, allowing a comparison between the experimental energy performance and an idealized scenario. Finally, the results demonstrate that topographic and driving dynamic conditions significantly influence the range and energy efficiency of converted electric vehicles operating on high-altitude inter-Andean routes.

Keywords: electric vehicle, energy consumption, range, topographic profile, electric mobility, electric traction system.

LISTA DE SIGLAS

AC. Corriente alterna

DC. Corriente directa

VE. Vehículo eléctrico

SOC. State of Charge (Estado de carga de la batería)

UTN. Universidad Técnica del Norte

Wh. Watt-hora

kWh. Kilowatt-hora

Wh/km. Consumo energético específico por kilómetro

A. Amperio

V. Voltio

W. Watt

kW. Kilowatt

GPS. Global Positioning System (Sistema de posicionamiento global)

EVDC. Electric Vehicle Driving Cycle (Ciclo de conducción de vehículo eléctrico)

BMS. Battery Management System (Sistema de gestión de baterías)

Li-ion. Ion-litio

RStudio. Entorno de programación y análisis estadístico basado en R

Data Logger. Sistema de adquisición y registro de datos

Cx. Coeficiente aerodinámico de arrastre

Crr. Coeficiente de resistencia a la rodadura

PMSM. Permanent Magnet Synchronous Motor (Motor síncrono de imanes permanentes)

Brushless AC. Motor síncrono de corriente alterna sin escobillas

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I 20

1.1. Problema de investigación. 20

1.1.1. Problemática a investigar. 20

1.2. Objetivos 21

1.2.1. Objetivo General 21

1.2.2. Objetivos Específicos 21

1.3 Formulación del problema de investigación. 21

1.4 Justificación 22

1.5. Hipótesis o preguntas de investigación 23

CAPÍTULO II 24

2.1 Antecedentes 24

2.2. Vehículos Eléctricos 25

2.3. Ventajas ambientales y técnicas 26

2.4. Clasificación de vehículos eléctricos 26

2.4.1. Vehículos Eléctricos de Batería (BEV - Battery Electric Vehicle). 26

2.4.2. Vehículos Eléctricos de Autonomía Extendida (EREV - Extended-Range Electric Vehicle). 27

2.4.4. Vehículos Híbridos Enchufables (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle) 27

2.4.5. Vehículos eléctricos convertidos (VEC) 27

2.5. Tipos de batería. 29

2.5.1 Baterías de níquel-metal hidruro (NiMH) 29

2.5.2. Baterías de litio-ferrofosfato ($LiFePO_4$ o LFP) 29

2.5.3. Baterías de níquel-manganeso-cobalto (NMC) 30

2.5.4. Baterías de níquel-cobalto-aluminio (NCA) 31

2.6. Sistemas de carga. 31

2.6.1. Componentes Principales 31
2.6.2. Sistema de Gestión de Batería (BMS) 32
2.6.3. Funcionamiento del BMS 32
2.6.4. Tipos de Sistemas de Carga a Bordo 32
2.7. Sistemas de Carga Externa 33
2.7.1. Tipos de Cargadores Externos 33
2.7.2. Tiempos de Carga 34
2.8. Principio de Funcionamiento 34
2.8.1. Conversión de Energía 35
2.8.2. Conversión de Potencia 35
2.8.3. Eficiencia 36
2.9. Recuperación de Energía 36
2.9.1. Tecnologías de Recuperación 37
2.9.2 Convertidores Bidereccionales 37
2.9.3. Integración con Fuentes Renovables 38
2.10. Conversiones Vehiculares 38
2.10.1. Requerimientos Técnicos 38
2.10.2. Seguridad Electrica y Estructural 38
2.10.3. Eficiencia del sistema 39
2.11. Adaptaciones del Sistema de Carga 39
2.11.1. Tipos de Cargadores y Conectores 39
2.12. Integración del sistema de baterías y control 40
2.12.1. Diseño e Instalación de Bancos de Baterías 41
2.12.2. Telemetría y Controladores 41
CAPÍTULO III 43
3.1 Enfoque Metodológico 43
3.2. Fase 1: Definición del Entorno de Estudio y Variables 43
3.2.1. Caracterización de la Ruta de Estudio 43

3.2.2 Definición de variables de estudio. 45
3.3 Fase 2: Instrumentación y sistema de adquisición de datos 46
3.3.1 Medición de corriente eléctrica 46
3.3.2 Monitoreo del sistema de baterías 47
3.3.3 Registro del perfil de conducción 48
3.4 Fase 3: Definición del ciclo de conducción 48
3.5 Fase 4: Ejecución Experimental 49
3.5.1 Características del vehículo de Ensayo 49
3.5.2. Preparación del Ensayo 50
3.5.3 Desarrollo del ensayo 50
3.5.4 Sincronización de datos 51
3.6 Fase 5: Procesamiento y análisis de datos 51
3.6.1 Cálculo de potencia y energía 52
3.6.2 Consumo Energético. 53
3.6.3 Análisis del comportamiento energético 54
3.7 Fase 6: Análisis comparativo 56
CAPITULO IV 57
4.1. Perfil del vehículo del ensayo. 57
4.1.1 Resistencia Aerodinámica 57
4.1.2 Resistencia a la Rodadura 58
4.2. Perfil de conducción del recorrido 59
4.2.1 Perfil velocidad–tiempo 60
4.2.2 Perfil altitudinal del recorrido 61
4.2.3 Identificación de tramos operativos del recorrido experimental 62
4.3. Comportamiento eléctrico del sistema 63
4.3.1 Corriente en función del tiempo 64
4.3.2 Potencia instantánea del sistema 67
4.3.3 Análisis de picos de demanda energética 69

4.4. Consumo energético del vehículo 70

4.4.1 Energía total consumida 72

4.4.2 Consumo específico (Wh/km) 74

4.4.3 Variación del estado de carga (SOC) 75

4.5. Análisis del comportamiento energético 77

4.5.1 Identificación de periodos de consumo 77

4.5.2 Identificación de eventos de regeneración 80

4.5.3 Análisis por tramos (ascenso, descenso, estable) 82

4.6 Análisis comparativo 85

4.6.1 Modelo teórico ideal 86

4.6.2 Comparación entre escenario real e ideal 89

4.6.3 Impacto del perfil topográfico en la autonomía 91

CAPITULO V 93

5.1. Conclusiones 93

5.2. Recomendaciones 94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tecnologías aplicables en baterías para vehículos eléctricos. 41

Tabla 2. Condiciones ambientales referenciales de la zona de estudio. 45

Tabla 3. Variables de estudio. 46

Tabla 4. Distribución de la Masa del Vehículo de Ensayo 49

Tabla 5. Parámetros de entrada utilizados para el modelo teórico ideal 86

Tabla 6. Comparación entre escenario experimental e ideal 90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura del sistema de propulsión eléctrica en un vehículo eléctrico. 28

Figura 2. Convertidor AC-DC tipo boost con corrección del factor de potencia (PFC). 35

Figura 3. Diagrama del sistema de frenado regenerativo en vehículos eléctricos. 37

Figura 4. Arquitectura del sistema de gestión de baterías (BMS) en vehículos eléctricos. 40

Figura 5. Ruta de estudio entre Ibarra y Zuleta. 44

Figura 6. Pinza amperimétrica OWON CM2100Bl..... 47

Figura 7. Ruta de conducción del ensayo entre Ibarra y Zuleta 59

Figura 8. Perfil velocidad vs tiempo del recorrido experimental UTN – Zuleta – UTN. 60

Figura 9. Perfil Altitudinal del Trayecto..... 61

Figura 10. Corriente del sistema en función del tiempo 64

Figura 11. Corriente del sistema simulado en función del tiempo 66

Figura 12. Potencia instantánea del sistema 67

Figura 13. Potencia instantánea del sistema simulado..... 68

Figura 14. Consumo Energético Acumulado..... 70

Figura 15. Consumo Energético Acumulado (simulación) 71

Figura 16. Variación del estado de carga (SOC) simulado..... 76

Figura 17. Relación entre altitud, tendencia de potencia y periodos de consumo 78

Figura 18. Relación entre altitud, tendencia de potencia y periodos de consumo 79

Figura 19. Identificación de eventos de baja demanda energética 80

Figura 20. Identificación de eventos de baja demanda energética simulada 81

Figura 21. Consumo energético por tipo de tramo 83

Figura 22. Consumo energético simulado por tipo de tramo..... 84

INDICE DE ECUACIONES

Formula 1..... 52

Formula 2..... 53

Formula 3..... 53

Formula 4..... 54

Formula 5..... 54

Formula 6..... 88

Formula 7..... 88

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

Tema

Estudio del sistema de carga a bordo para vehículos convertidos, caso de estudio: ciudades de altura.

El problema

1.1. Problema de investigación.

1.1.1. Problemática a investigar.

La transición hacia vehículos eléctricos busca reducir los niveles de emisiones contaminantes y mitigar el cambio climático. Sin embargo, en ciudades de altura con diversidad climática y geografía variable como ocurre en Ecuador, estas condiciones pueden comprometer la eficiencia y durabilidad de los sistemas de propulsión. Los vehículos convertidos pueden presentar dificultades para mantener un comportamiento de carga y descarga estables en condiciones de altitud, lo que resulta en una disminución en la vida útil de las baterías, aumentando costos de mantenimiento y reduciendo la fiabilidad de los vehículos convertidos.

Esta investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento energético del sistema de carga en vehículos convertidos de combustión interna a eléctricos, considerando las condiciones de las ciudades de altura como Ibarra. Se busca estudiar cómo influyen factores como la altitud y las fluctuaciones de voltaje con respecto a la topografía variada que se dará en la zona de estudio Ibarra - Zuleta, haciendo énfasis en la eficiencia y durabilidad del proceso de carga y descarga. A través del análisis técnico y la revisión de parámetros eléctricos, se pretende identificar las principales limitaciones que enfrentan estos sistemas y cómo afectan el desempeño general del vehículo convertido.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Estudiar el sistema de carga a bordo para vehículos convertidos en ciudades de altura.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el perfil de conducción del recorrido en condiciones reales de operación.
- Evaluar el consumo energético del vehículo durante el recorrido
- Determinar la recuperación de energía mediante el frenado regenerativo.
- Comparar comportamiento energético real con un escenario teórico ideal.

1.3 Formulación del problema de investigación.

El presente trabajo se centrará en el análisis del compartimiento energético de un vehículo convertido de gasolina a eléctrico, tomando como caso de estudio el Chevrolet Corsa 1.4L, modelo 2004, propiedad de la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Técnica del Norte. La investigación evaluará el consumo y la recuperación de energía durante condiciones reales de operación, considerando el aporte del frenado regenerativo dentro del balance energético del vehículo.

Se identificarán los factores que influyen en el comportamiento, considerando variables como la altitud y condiciones geográficas presentes en la ruta Ibarra – Zuleta. Además, se analizará la variación del estado de carga de la batería en función del perfil topográfico y las condiciones de conducción.

Posteriormente, se comparará el rendimiento energético del vehículo en distintos tramos de la ruta definida, mediante la recolección de datos en campo y métodos analíticos, sin intervenir físicamente en el diseño del sistema ni modificar sus

componentes originales.

Este trabajo no contempla rediseño, modificación o implementación de nuevos sistemas de carga, ni el desarrollo de tecnologías de baterías. Su alcance se limita a generar un análisis técnico que permita comprender las capacidades y limitaciones actuales del sistema de carga a bordo en vehículos convertidos a eléctricos en entornos de altura y servir como base para futuras investigaciones en movilidad eléctrica.

1.4 Justificación

El presente estudio se enfoca en analizar el funcionamiento del sistema energético de vehículos convertidos de gasolina a eléctricos que operan en ciudades de altura como Ibarra, en la provincia de Imbabura [1]. Esta investigación surge de la necesidad entender cómo condiciones geográficas, como la altitud, el tráfico real e imprevistos en ruta influyen en el consumo energético, la recuperación de energía mediante el frenado regenerativo y la variación del estado de carga de la batería durante condiciones reales de operación [2].

El estudio se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7: Energía asequible y no contaminante [3], promoviendo el uso eficiente de la energía, la reducción de emisiones de carbono, contribuyendo a una movilidad eléctrica como una alternativa viable, en concordancia con las estrategias nacionales orientadas a impulsar la transición energética y la movilidad eléctrica en el Ecuador.

Desde el punto de vista investigativo, el proyecto permitirá documentar el comportamiento energético del vehículo en condiciones reales de operación en zonas de altitud, a través del análisis del caso del Chevrolet Corsa 1.4L, modelo 2004, convertido a eléctrico. Se generarán conocimientos que servirán como base para optimizar futuras conversiones, mejorar la gestión energética del vehículo y orientar nuevos proyectos dentro del campo de la movilidad eléctrica en regiones

de altura.

En el ámbito socioeconómico, este análisis puede beneficiar a talleres, usuarios particulares y emprendedores que encuentran en la conversión vehicular una alternativa de menor costo frente a los vehículos eléctricos nuevos, previniendo los desafíos técnicos asociados a su operación [4], [5].

El impacto de este proyecto trasciende el ámbito local, ya que los resultados, recomendaciones y metodologías desarrolladas podrían aplicarse en otras ciudades de altura como Quito, e incluso en contextos internacionales con condiciones similares [6].

1.5. Hipótesis o preguntas de investigación

Este proyecto plantea que el análisis técnico del comportamiento energético de vehículos convertidos a eléctricos, operando en ciudades de altura como Ibarra, permitirá identificar los principales factores que afectan su consumo, recuperación de energía y autonomía.

Se espera que, bajo condiciones de altitud, factores como las pendientes geográficas influyan en el consumo energético del vehículo, generando diferencias entre el comportamiento real y el teórico. A través de la recolección de datos en condiciones reales de operación, se busca analizar cómo responde el vehículo ante un entorno de altura, evaluando el aporte del frenado regenerativo si lo hubiera y su influencia en la recuperación energética durante el trayecto.

En este escenario, se plantean preguntas clave como: ¿de qué manera influyen la variación de altitud en el consumo energético del vehículo?, ¿qué nivel de aporte tiene el frenado regenerativo en la recuperación de energía y la autonomía en rutas con pendiente?, ¿cómo varía el estado de carga de la batería en función del perfil topográfico y las condiciones de conducción? y ¿qué diferencias existen entre el comportamiento energético real y un escenario teórico ideal.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

La transición hacia un modelo de movilidad "carbono cero" ha adquirido relevancia a nivel mundial durante las últimas décadas. Según el Acuerdo de París, se proyecta reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta un 45% para 2030, con el objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono para 2050 [7]. En este contexto, el sector del transporte, que representa aproximadamente el 25% de las emisiones globales de CO_2, se ha convertido en uno de los principales focos de las políticas de sostenibilidad, siendo la electrificación del parque vehicular una estrategia fundamental [8].

La conversión de vehículos de combustión interna a eléctricos aparece en los últimos años como una alternativa sostenible y económica, especialmente en regiones donde la adquisición de vehículos eléctricos nuevos resulta costosa [9]. Sin embargo, la implementación de sistemas de carga a bordo y freno regenerativo en estos vehículos convertidos presenta desafíos particulares en zonas de altitud, como la provincia de Imbabura [10].

Nasr Esfahani et al. [11] analizó los sistemas de cargadores a bordo (OBC) en vehículos eléctricos y destacó la importancia de una integración adecuada con el sistema de gestión de baterías (BMS) y el motor eléctrico para garantizar una carga segura y eficiente. Además, señaló la necesidad de adaptar los OBC en vehículos convertidos para optimizar su rendimiento en diferentes condiciones geográficas.

En cuanto al freno regenerativo, una investigación similar evaluó la eficiencia de este sistema y encontró que su implementación puede reducir significativamente el consumo de potencia en comparación con sistemas de regeneración por movimiento constante [12]. Esto resulta relevante en rutas con variaciones de altitud, donde la recuperación de energía durante el frenado puede mejorar la autonomía del vehículo [13].

Un análisis técnico profundiza en los principios de funcionamiento del freno regenerativo y destaca beneficios como una mayor eficiencia energética, un menor desgaste del sistema de frenos por fricción y la reducción de pérdidas térmicas [10]. El estudio también señala que su desempeño presenta limitaciones en función del tipo de motor, las condiciones de carga de la batería y el entorno topográfico.

Por otra parte, un estudio sobre la eficiencia del freno regenerativo en vehículos eléctricos demostró que la recuperación de energía durante las desaceleraciones contribuye a mejorar la eficiencia energética del vehículo y a incrementar su autonomía, aunque su desempeño depende de las condiciones de operación y del estado de carga de la batería [14]. Estos resultados proporcionan datos cuantitativos que pueden ser útiles para evaluar el desempeño de sistemas de carga en condiciones reales de manejo.

Finalmente, un estudio sobre estaciones de carga para vehículos eléctricos en Ecuador analiza los diferentes modos de carga y su aplicabilidad en zonas públicas y comerciales. Asimismo, resalta la necesidad de desarrollar una infraestructura de carga adecuada para fomentar la adopción de vehículos eléctricos en el país, por lo que mejorar la autonomía de estos vehículos contribuiría a disminuir la dependencia de dicha infraestructura [15].

2.2. Vehículos Eléctricos

Los vehículos eléctricos (VE) constituyen una alternativa tecnológica a los sistemas de transporte tradicionales basados en combustibles fósiles [8]. Su funcionamiento se basa en la conversión directa de energía eléctrica en energía mecánica mediante el uso de máquinas eléctricas, esta transformación energética se logra a través de uno o más motores eléctricos alimentados por un banco de baterías recargables ubicado a bordo del vehículo [16].

2.3. Ventajas ambientales y técnicas

Cuando se analiza el impacto ambiental desde una perspectiva de ciclo de vida, se identifican algunos problemas, especialmente en los vehículos eléctricos de batería conocido como BEV, hasta el 51% de las emisiones totales de CO_2 generadas por un BEV se producen durante su proceso de fabricación, principalmente por la producción de baterías de iones de litio [17]. La extracción de materiales como litio, níquel, cobalto y cobre, esenciales para estas baterías, implica efectos negativos, incluyendo contaminación de agua, degradación del suelo y condiciones laborales precarias en países productores [18]. No obstante, a lo largo de su vida útil, un BEV de tamaño mediano puede emitir entre un 47% y un 58% menos de CO_2 en comparación con un automóvil convencional de gasolina, lo que confirma su potencial como herramienta efectiva para la descarbonización del transporte [19].

2.4. Clasificación de vehículos eléctricos

Desde el punto de vista de su arquitectura, los VE se dividen en categorías según la forma en que gestionan la energía y el tipo de propulsión que utilizan. Esta diferenciación permite entender el grado de electrificación del sistema motriz y las tecnologías asociadas a cada configuración.

2.4.1. Vehículos Eléctricos de Batería (BEV - Battery Electric Vehicle).

Funcionan únicamente con energía eléctrica almacenada en baterías recargables. Son considerados vehículos 100 % eléctricos o "eléctricos puros". El sistema de tracción se basa únicamente en uno o varios motores eléctricos que obtienen su energía de baterías, típicamente de ion-litio [16]. Estos vehículos se recargan mediante conexión a la red eléctrica y no producen emisiones directas durante su uso [20]. La autonomía de un BEV depende principalmente de la capacidad de la batería, la eficiencia del tren motriz y el estilo de conducción, con rangos actuales que oscilan entre 200 km (Renault Megane E-Tech) y más de 500 km (Tesla Model S Long Range) por carga completa [21], [22].

2.4.2. Vehículos Eléctricos de Autonomía Extendida (EREV - Extended-Range Electric Vehicle).

Son similares a los BEV en cuanto a que el motor eléctrico es el único que impulsa las ruedas, pero cuentan con un motor de combustión auxiliar que actúa únicamente como generador, recargando la batería cuando su nivel es bajo. Este motor no está conectado mecánicamente al sistema de tracción, por lo que no impulsa directamente al vehículo [16]. Este diseño permite ampliar significativamente la autonomía del vehículo sin depender exclusivamente de puntos de recarga eléctricos, siendo útil en regiones con infraestructura limitada [23].

2.4.3. Vehículos Híbridos (HEV - Hybrid Electric Vehicle)

Combinan un motor de combustión interna y uno o más motores eléctricos, pero sin capacidad de recarga externa. La batería se recarga mediante el frenado regenerativo o el mismo motor térmico, pero con la limitante de que no pueden circular largas distancias solo con energía eléctrica [24]

2.4.4. Vehículos Híbridos Enchufables (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle)

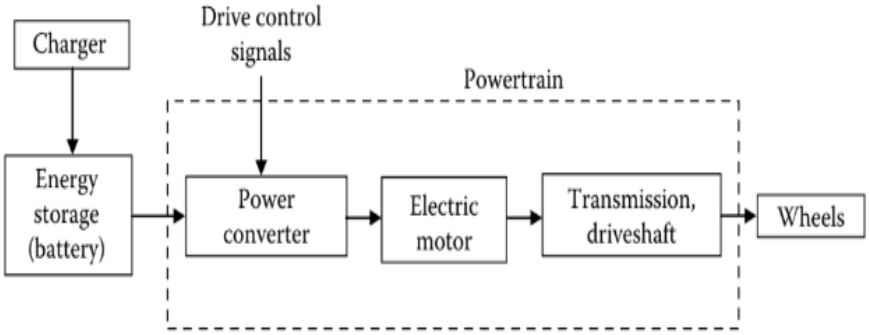
Cuentan con ambos tipos de motores, como los HEV, pero además permiten la recarga de la batería desde la red eléctrica, lo que les permite circular en modo totalmente eléctrico durante trayectos cortos entre 20–80 km (Toyota RAV4 Prime) [25].

2.4.5. Vehículos eléctricos convertidos (VEC)

Los VEC son automotores originalmente diseñados con sistemas de propulsión térmica, que han sido modificados estructural y funcionalmente para operar con un tren motriz completamente eléctrico. Este proceso de transformación, denominado conversión vehicular, se ha posicionado como una solución técnicamente viable y económicamente accesible frente al elevado costo de adquisición de vehículos eléctricos nuevos, particularmente en países en desarrollo o en zonas donde la infraestructura de electromovilidad aún es limitada [26].

La conversión como se puede identificar en la Figura 1, implica la eliminación de los principales sistemas del vehículo de combustión interna: el motor térmico, la transmisión convencional si se desea y el sistema de almacenamiento de combustible. En su lugar, se integran un motor eléctrico de tracción, controladores electrónicos, inversor de potencia y un banco de baterías recargables, junto con el sistema de carga correspondiente. .

Figura 1. *Arquitectura del sistema de propulsión eléctrica en un vehículo eléctrico.*



Adaptado de [16].

También pueden añadirse módulos para el frenado regenerativo, pantallas de monitoreo y sistemas auxiliares adaptados al nuevo tren motriz.

El diseño e integración de estos elementos requiere un análisis riguroso para garantizar compatibilidad electromecánica, balance de masas adecuado y seguridad en operación [26]. Uno de los principales retos es la distribución del peso, ya que las baterías suelen tener una masa considerable (entre 150 y 300 kg en vehículos pequeños), lo que puede modificar el centro de gravedad y afectar la dinámica vehicular si no se reubican de forma adecuada [27]. A esto se agrega la necesidad de implementar sistemas de refrigeración pasiva o activa para los componentes de potencia, especialmente el inversor y el motor eléctrico, cuya eficiencia puede disminuir si operan fuera del rango térmico óptimo (normalmente entre (25 °C y 45 °C) [28].

2.5. Tipos de batería.

En la movilidad eléctrica, la elección del tipo de batería es un factor determinante en el rendimiento, la autonomía y la seguridad del vehículo. Actualmente, los tipos de baterías más utilizados en vehículos eléctricos son: níquel-metal hidruro (NiMH), litio-ferrofosfato o LiFePO4 o LFP, níquel-manganeso-cobalto (NMC) y níquel-cobalto-aluminio (NCA).

Cada tecnología presenta características técnicas específicas que definen su aplicación según el tipo de vehículo, costo, seguridad y condiciones operativas.

2.5.1 Baterías de níquel-metal hidruro (NiMH)

Las baterías de níquel-metal hidruro (NiMH) fueron ampliamente utilizadas en los primeros modelos de vehículos híbridos debido a su mayor estabilidad térmica y menor riesgo de combustión comparadas con las de litio. Aunque su densidad energética es inferior (60–120 Wh/kg), su robustez y tolerancia a la sobrecarga les otorgaron confiabilidad en aplicaciones como el Toyota Prius. Sin embargo, han sido progresivamente reemplazadas en vehículos 100% eléctricos por tecnologías de mayor densidad energética y menor autodescarga [29].

2.5.2. Baterías de litio-ferrofosfato ($LiFePO_4$ o LFP)

Estas baterias han emergido como una de las alternativas más robustas dentro de la industria automotriz, especialmente para vehículos eléctricos de gama media y transporte urbano. Esta tecnología, desarrollada en 1996 por la Universidad de Texas, se basa en el uso de fosfato de hierro y litio como material catódico, lo cual proporciona una estructura cristalina del tipo olivino altamente estable y resistente al calor. Esta característica estructural le otorga una sobresaliente estabilidad térmica, con temperaturas de fuga térmica que superan los 270 °C, muy por encima del umbral de otras químicas como las NMC (níquel-manganeso-cobalto), que pueden presentar inestabilidad térmica a partir de los 150–200 °C [29].

Desde el punto de vista energético, las celdas LFP presentan una densidad energética de entre 90 y 160 Wh/kg, considerablemente menor que la de las baterías NMC, que pueden alcanzar hasta 260 Wh/kg, lo cual implica una menor autonomía por unidad de masa. En aplicaciones automotrices donde la seguridad, la vida útil y el costo por ciclo son más relevantes que la autonomía máxima las LFP resultan altamente competitivas. Su voltaje nominal de 3.2 V por celda requiere más celdas para alcanzar voltajes de trabajo comparables, pero esto se ve compensado por su capacidad de soportar profundidades de descarga (DoD) cercanas al 100 %, sin degradación acelerada, lo que permite un uso más eficiente de la capacidad total [30].

Las baterías LFP superan los 2000 ciclos completos con pérdidas mínimas de capacidad, y bajo ciertos esquemas de carga pueden alcanzar los 4000–7000 ciclos, haciéndolas ideales para vehículos con alta frecuencia de uso. Además, muestran una menor sensibilidad al estrés químico en estados de carga elevados (SoC), lo que las hace más tolerantes a permanecer completamente cargadas sin una pérdida rápida de capacidad, a diferencia de las NMC que sufren una degradación más acelerada bajo estas condiciones [29].

2.5.3. Baterías de níquel-manganeso-cobalto (NMC)

Las baterías de níquel-manganeso-cobalto (NMC) representan una de las químicas más equilibradas en términos de energía, seguridad y vida útil. Con una densidad energética entre 150–220 Wh/kg, son comunes en automóviles eléctricos de uso general, como los producidos por Hyundai, Kia o Renault. Su estructura química permite adaptarse bien a ciclos de carga y descarga variables, ofreciendo una buena autonomía y respuesta térmica cuando se gestionan adecuadamente con un sistema BMS [30].

2.5.4. Baterías de níquel-cobalto-aluminio (NCA)

Las baterías de níquel-cobalto-aluminio (NCA) destacan por su alta densidad energética (hasta 250 Wh/kg), siendo utilizadas principalmente en vehículos eléctricos de alto rendimiento, como los modelos de Tesla. Aunque requieren una gestión térmica estricta debido a su menor estabilidad comparativa, su eficiencia y capacidad para entregar altas potencias las hacen ideales en aplicaciones donde el rendimiento es prioritario. Sin embargo, el elevado contenido de cobalto y níquel incrementa su costo y plantea preocupaciones medioambientales [29].

2.6. Sistemas de carga.

El sistema de carga a bordo (On-Board Charger - OBC) es un componente integrado dentro del vehículo eléctrico que permite la conversión de corriente alterna (AC) de la red eléctrica a corriente continua (DC) para cargar la batería del vehículo. Este sistema constituye uno de los tres componentes fundamentales que determinan la velocidad de carga, junto con la estación de recarga y el cable de carga. El cargador a bordo desempeña un papel crucial al controlar la corriente y el voltaje necesarios para cargar la batería, operando en modos de control de voltaje o corriente según las necesidades del sistema[31].

2.6.1. Componentes Principales

Los sistemas de carga a bordo están conformados por diversos módulos funcionales que operan de forma conjunta.

Convertidores de Potencia: Los cargadores a bordo generalmente incorporan dos etapas de conversión de potencia: un rectificador con corrección de factor de potencia (PFC) para convertir AC de frecuencia de línea a DC, y una conversión DC-DC para cargar la batería, como se puede ver en la Figura 2. Los convertidores AC-DC tipo boost son ampliamente utilizados para aplicaciones de media y alta potencia debido a su alta eficiencia y bajo estrés de corriente[32].

2.6.2. Sistema de Gestión de Batería (BMS)

Este componente monitora los parámetros de las baterías de iones de litio recargables, incluyendo voltaje, corriente y temperatura en tiempo real. El BMS reduce los riesgos asociados con condiciones ambientales adversas y optimiza el rendimiento de la batería, asegurando que el vehículo opere bajo condiciones seguras [32].

2.6.3. Funcionamiento del BMS

El funcionamiento del sistema de carga a bordo sigue un proceso específico cuando se utiliza corriente alterna. La corriente pasa a través del cable de carga al cargador a bordo, que convierte la corriente AC en DC y la envía a la batería a través del Sistema de Gestión de Batería (BMS). Durante la carga con corriente continua, el cargador a bordo se omite y la corriente se dirige directamente a través del BMS a la batería [33].

El cargador a bordo permite controlar la corriente y el voltaje al cual la batería necesita ser cargada, operando en modos de control de voltaje o corriente, cuidando así la vida útil de la batería. Los sistemas más avanzados incorporan tecnologías de conmutación suave, como la conmutación de voltaje cero (ZVS), que se logra introduciendo un tiempo muerto muy corto entre la conmutación de los MOSFETs [33].

2.6.4. Tipos de Sistemas de Carga a Bordo

Cargadores Dedicados: Son equipos diseñados exclusivamente para la recarga de baterías en vehículos eléctricos, funcionando como sistemas autónomos sin integración con otras funciones del vehículo. Se caracterizan por su diseño y versatilidad en la alimentación, ya que pueden operar tanto con corriente alterna monofásica como trifásica. Su función principal es transformar la energía proveniente de la red eléctrica en una forma adecuada para la carga eficiente y segura del sistema de almacenamiento del vehículo, incorporando protecciones electrónicas, sistemas de gestión térmica y de comunicación con el vehículo [34].

Cargadores Integrados: Utilizan el sistema de propulsión, el motor eléctrico y el inversor para la carga de la batería, evitando etapas de conversión separadas. Pueden ofrecer capacidades bidireccionales y niveles de potencia más altos [33].

2.7. Sistemas de Carga Externa

La infraestructura de carga externa comprende las estaciones de carga ubicadas fuera del vehículo, conocidas como Equipo de Suministro de Vehículos Eléctricos (EVSE). Estas estaciones buscan acomodar la creciente adopción de vehículos eléctricos, pasando de sistemas de baja potencia a estaciones de carga ultrarrápida y de escala MW [25].

Las estaciones de carga de alta potencia requieren consideraciones especiales en cuanto a precisión y seguridad de operación. Para 2030, se estima que serán necesarios millones de puertos EVSE, incluyendo públicos privados para apoyar una flota de 33 millones de vehículos eléctricos [35].

2.7.1. Tipos de Cargadores Externos

Carga Rápida DC (DCFC): Los sistemas de carga rápida DC utilizan estaciones de alta potencia para entregar electricidad DC directamente a la batería del vehículo, evitando el cargador a bordo. Con potencias típicamente entre 50 kW y 350 kW, la carga rápida DC reduce drásticamente los tiempos de carga a tan solo 30 minutos o menos para una carga completa[35].

Carga Ultra Rápida (UFC): Los sistemas de carga ultra-rápida representan la tecnología más avanzada, con niveles de potencia que típicamente exceden los 350 kW. Estos sistemas están diseñados con componentes de electrónica de potencia enfocados en transformadores de estado sólido (SST), convertidores DC-DC aislados y etapas convertidoras AC-DC frontales [36].

Carga Inalámbrica Inductiva: La carga inductiva elimina cables físicos transmitiendo energía a través de un campo electromagnético entre una plataforma de carga en el suelo y el vehículo eléctrico. Los sistemas estáticos pueden lograr

una eficiencia del 85% o superior, con etapas individuales alcanzando hasta 97% de eficiencia.

2.7.2. Tiempos de Carga

Los tiempos de carga varían significativamente según el nivel de potencia utilizado: [35]

Nivel 1: Aproximadamente 20 horas para 200 km de autonomía

Nivel 2: Aproximadamente 5 horas para 200 km de autonomía

Nivel 3: 80% de 200 km en aproximadamente 30 minutos

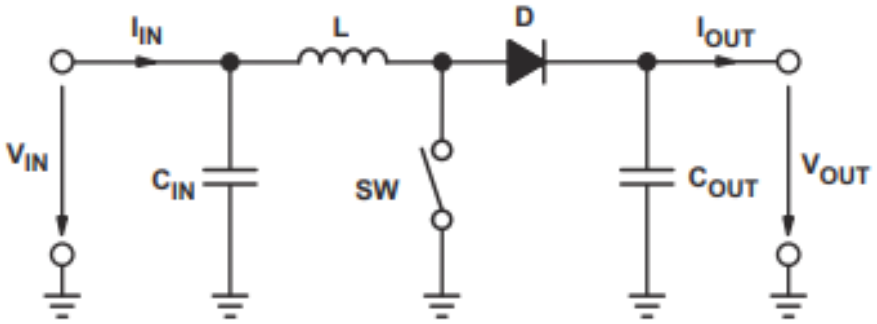
Carga Extrema Rápida (XFC): Aproximadamente 5 minutos con alta densidad energética.

2.8. Principio de Funcionamiento

Los sistemas de carga de vehículos eléctricos se basan en principios fundamentales de conversión de energía eléctrica. Los convertidores AC/DC constituyen los componentes principales para expandir y mejorar el funcionamiento de los vehículos eléctricos, ya que una toma de corriente entrega energía AC mientras que las baterías de los VE funcionan con energía DC [37].

Los convertidores AC-DC tipo boost son ampliamente utilizados debido a su capacidad para proporcionar mayor voltaje de salida DC, menor estrés de corriente y distorsión armónica total (THD), y alta eficiencia dentro del sistema, como se puede ver en la Figura 3 las etapas que pasa el convertidor para una corrección eficaz del factor de potencia (PFC). Estos sistemas incorporan corrección de factor de potencia (PFC) que es crucial en las estaciones de carga de VE para reducir la potencia reactiva, minimizar las pérdidas de línea y maximizar el uso de la infraestructura eléctrica[36].

***Figura 2**. Convertidor AC-DC tipo boost con corrección del factor de potencia (PFC).*



Adaptado de [36].

2.8.1. Conversión de Energía

Los sistemas de carga emplean múltiples convertidores AC-DC y DC-DC con estrategias de control avanzadas para la carga segura y eficiente de la batería. Los convertidores DC-DC aislados proporcionan aislamiento galvánico entre la batería del VE y la red, siendo el Convertidor de Puente Activo Dual (DAB) ampliamente utilizado por su alta eficiencia, confiabilidad, flujo de potencia bidireccional y capacidad buck-boost [37].

2.8.2. Conversión de Potencia

Los sistemas modernos de carga implementan estrategias de control avanzadas para optimizar la transferencia de energía. La carga inteligente utiliza datos en tiempo real y algoritmos inteligentes para optimizar el proceso de carga, satisfaciendo tanto las necesidades inmediatas de los vehículos eléctricos como las demandas más amplias de la red eléctrica [35].

Los sistemas de gestión de carga de vehículos eléctricos integran hardware y software para proporcionar una interfaz fluida que facilita el monitoreo, control y ajuste de las operaciones de carga en función de diversos factores, incluyendo la cantidad de corriente suministrada, el número de vehículos cargándose simultáneamente y la capacidad de la red eléctrica [38].

2.8.3. Eficiencia

La eficiencia energética en la infraestructura de carga de VE es crucial para la operación sostenible y rentable. Los convertidores de alta eficiencia pueden reducir el tiempo de carga y proporcionar servicios adicionales a la red. Los sistemas de carga inteligente pueden mejorar la eficiencia al evitar períodos de demanda pico, minimizando el estrés en la red y maximizando la utilización de recursos. Las medidas de eficiencia energética incluyen [39]:

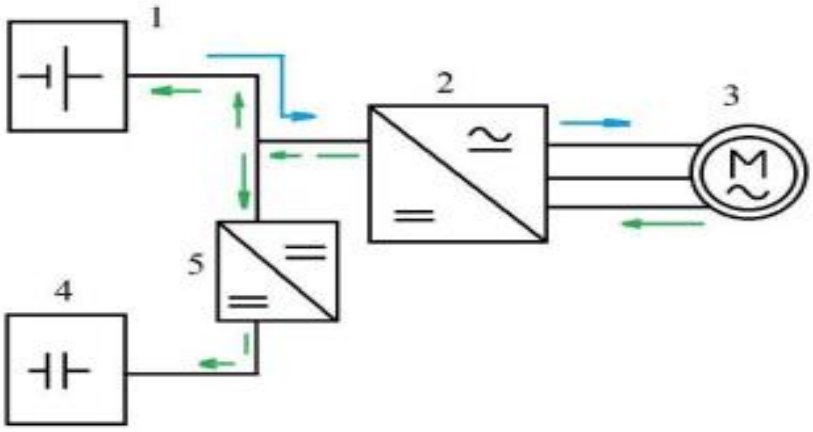
- Utilización de tecnologías de carga avanzadas como la carga rápida
- Implementación de sistemas inteligentes de gestión de energía
- Integración de fuentes de energía renovable
- Instalación de sistemas de almacenamiento de energía en baterías

2.9. Recuperación de Energía

Los sistemas de recuperación de energía en vehículos eléctricos aprovechan la energía cinética que normalmente se perdería durante la desaceleración y el frenado. Estos sistemas comprenden varios componentes fundamentales: una máquina eléctrica que opera en modo generador durante el frenado, convirtiendo la energía cinética del vehículo en energía eléctrica; un sistema de almacenamiento de energía que almacena la energía recuperada durante el frenado; y un controlador que gestiona el proceso de recuperación de energía [40].

En la Figura 4 se presenta el esquema del sistema de recuperación de energía mediante frenado regenerativo, donde se identifican sus principales etapas: (1) la fuente de energía eléctrica asociada al sistema de almacenamiento, (2) el inversor electrónico que gestiona la conversión de energía, (3) el motor eléctrico operando en modo generador durante la desaceleración, (4) el sistema de baterías donde se almacena la energía recuperada y (5) el convertidor DC/DC que regula el flujo energético, evidenciando el proceso de conversión de energía cinética en energía eléctrica y su posterior almacenamiento.

***Figura 3**. Diagrama del sistema de frenado regenerativo en vehículos eléctricos.*



Adaptado de [40].

Los sistemas modernos también incluyen sensores que monitorean los parámetros operativos del sistema, como la velocidad del vehículo, las posiciones de los pedales de freno y acelerador, la velocidad del motor eléctrico y el estado de carga de la batería. El software controla la operación del controlador basándose en los datos de los sensores y otros parámetros [40].

2.9.1. Tecnologías de Recuperación

Sistemas Bidireccionales Vehicle-to-Grid (V2G): La carga bidireccional permite que los vehículos eléctricos no solo extraigan energía de la red para cargar, sino también descarguen energía almacenada de vuelta a la red. Este flujo bidireccional de energía convierte a los VE en recursos móviles de almacenamiento de energía, ofreciendo flexibilidad y soporte a la red eléctrica [38].

2.9.2 Convertidores Bidereccionales

Los sistemas avanzados utilizan convertidores DC-DC bidireccionales que pueden operar como convertidores tipo buck para transferir energía del bus DC al sistema de almacenamiento de energía de la batería, y como convertidores tipo boost para transferir energía en dirección opuesta [31].

2.9.3. Integración con Fuentes Renovables

Los sistemas de carga integrados con fuentes de energía renovable han ganado interés en la industria como una técnica rentable, limpia y sostenible para cargar baterías de VE. Estos sistemas pueden proporcionar servicios auxiliares a la red eléctrica reduciendo la demanda pico y mejorando la calidad de la energía [25].

2.10. Conversiones Vehiculares

Las conversiones vehiculares (o retrofit) son procesos técnicos que transforman vehículos con motores de combustión interna (MCI) en vehículos eléctricos (VE), mediante la sustitución de componentes térmicos por sistemas de propulsión eléctrica. Puede ser la clave para la movilidad sostenible y reducir emisiones de CO_2, prolongar la vida útil de vehículos existentes y disminuir residuos industriales [26].

En regiones urbanas, reduce la contaminación acústica y atmosférica, mientras que en zonas de altura optimiza el rendimiento energético frente a la pérdida de eficiencia de los MCI en condiciones hipóxicas [15]. Su integración podría ayudar economías emergentes, donde el acceso a vehículos eléctricos nuevos es limitado por costos.

2.10.1. Requerimientos Técnicos

Los sistemas de conversión deben cumplir estándares internacionales para garantizar seguridad, eficiencia y homologación.

2.10.2. Seguridad Electrica y Estructural

- **Compatibilidad estructural:** El chasis debe soportar el peso adicional de las baterías. Se requiere análisis por elementos finitos (FEA) para verificar resistencia a vibraciones e impactos [30].
- **Aislamiento eléctrico:** Los circuitos de alto voltaje (>60 V DC) exigen cumplir la normativa ISO 6469-3:2021: protección contra descargas y cortocircuitos.

- **Protección térmica:** Sistemas de desconexión automática en baterías al detectar temperaturas >80°C (según Reglamento R100V2 de la UE).

2.10.3. Eficiencia del sistema

- **Relación potencia-peso**: Motores eléctricos deben mantener una densidad energética ≥2.5 kW/kg para no comprometer la relación peso/potencia original del vehículo.
- **Autonomía mínima**: Baterías con capacidad ≥20 kWh para garantizar >150 km de autonomía en ciclo WLTP (World Harmonised Light Vehicle Test Procedure).

2.11. Adaptaciones del Sistema de Carga

Las adaptaciones del sistema de carga son fundamentales en el proceso de conversión de vehículos a combustión interna a eléctricos, ya que permiten integrar eficientemente las nuevas tecnologías de almacenamiento y suministro energético. Una correcta adaptación garantiza la seguridad, eficiencia y durabilidad del sistema eléctrico del vehículo, asegurando además el cumplimiento de normativas técnicas vigentes [27]. La infraestructura de carga debe adaptarse al perfil operativo del vehículo convertido.

2.11.1. Tipos de Cargadores y Conectores

Los sistemas de carga para vehículos eléctricos pueden clasificarse según la forma de suministro de energía, el nivel de potencia y el tipo de conexión utilizado [34], Estas características determinan el tiempo de carga, la potencia suministrada y los componentes necesarios para realizar la transferencia de energía. Se muestran los siguientes tipos de suministros de energía:

- **Modo 1 (AC 120/230V)**: Carga lenta (8–12 horas), apta para aplicaciones nocturnas en entornos residenciales.
- **Modo 2 (AC 400V, 32A)**: Carga semi-rápida (3–4 horas), con conectores IEC 62196-2 Type 2 (Europa) o SAE J1772 (América).

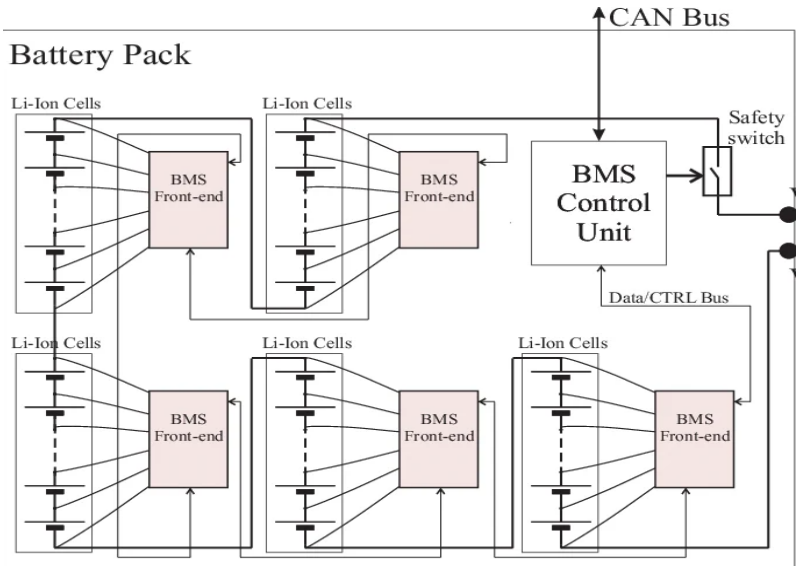
- **Modo 3 (DC 200–1000V)**: Carga ultrarrápida (20–30 min) mediante CCS Combo 2 o CHAdeMO, con refrigeración líquida en cables.

2.12. Integración del sistema de baterías y control

Es un aspecto crítico en la conversión de vehículos a combustión a eléctricos, ya que determina el rendimiento, la autonomía y la seguridad del vehículo. Este proceso implica la correcta disposición del banco de baterías, su fijación estructural, conexiones eléctricas y un aislamiento adecuado [31]. Se incorpora un sistema de gestión de baterías (Battery Management System - BMS) que supervisa parámetros clave como la temperatura, el voltaje y el estado de carga, protegiendo así el sistema ante fallas.

En la Figura 5 se muestra la arquitectura del BMS, donde el banco de baterías se organiza en módulos con unidades de adquisición (BMS Front-end) que monitorean variables críticas[29]. Estos se comunican con una unidad central de control (BMS Control Unit), encargada de la gestión, protección y balanceo de las celdas, integrándose además con el sistema del vehículo mediante comunicación CAN Bus.

Figura 4. *Arquitectura del sistema de gestión de baterías (BMS) en vehículos eléctricos.*



Adaptado de [29].

2.12.1. Diseño e Instalación de Bancos de Baterías

El diseño e instalación de bancos de baterías en vehículos eléctricos requiere la selección adecuada de tecnologías en función de parámetros como la densidad energética, vida útil y aplicación. En este contexto, en la Tabla 1 se presentan las principales tecnologías empleadas en sistemas de almacenamiento, destacando sus características más relevantes para su implementación en vehículos eléctricos [30].

Tabla 1. *Tecnologías aplicables en baterías para vehículos eléctricos.*

Tecnología	Energía específica (Wh/kg)	Ciclos de vida	Aplicación típica
Li-ion NMC	150–220	2.000	Vehículos de alta autonomía
Li-ion LFP	90–160	3.000–5.000	Vehículos urbanos, buses eléctricos
Li-ion LTO	50–80	5.000–10.000	Carga rápida, aplicaciones industriales
Li-ion NCA	200–260	1.000–1.500	Vehículos de alto rendimiento
Plomo-ácido	30–50	500–1.000	Aplicaciones económicas y conversiones básicas

Fuente: Adaptado de [30].

2.12.2. Telemetría y Controladores

Los controladores electrónicos de potencia (Electronic Power Controllers - EPC), basados en inversores IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor), responsables de modular la corriente trifásica que alimenta el motor eléctrico, con eficiencias ≥98% mediante técnicas de conmutación optimizada como PWM (Pulse Width Modulation) y SVM (Space Vector Modulation), combinadas con sistemas de enfriamiento activo (bombas de líquido dieléctrico o disipadores con *heatpipes*) [27].

Los sistemas telemétricos monitorean en tiempo real parámetros como voltaje de batería, temperatura de celdas (±1°C), consumo energético (kWh/km) y estado del Sistema de Gestión de Baterías (Battery Management System - BMS), utilizando interfaces estandarizadas OBD-II (On-Board Diagnostics II) con protocolos CAN Bus (ISO 15765-4) para transmisión de datos a 500 kbps, facilitando un diagnóstico remoto, predicción de fallos y optimización dinámica del rendimiento mediante plataformas IoT [30] .

CAPÍTULO III
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Enfoque Metodológico

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo de tipo experimental en campo, basado en la adquisición y análisis de variables eléctricas y dinámicas durante la operación de un vehículo eléctrico convertido (Chevrolet Corsa 2004). El estudio busca la caracterización del comportamiento energético del vehículo, considerando el consumo y la recuperación de energía en función de las condiciones de operación y del perfil topográfico del recorrido. A diferencia de ensayos controlados en laboratorio, la metodología adoptada utiliza condiciones reales de funcionamiento, permitiendo evaluar el desempeño del sistema bajo un entorno representativo de operación en altura.

3.2. Fase 1: Definición del Entorno de Estudio y Variables

Esta fase se centra en la identificación y parametrización de las variables críticas que influyen en el comportamiento energético del vehículo eléctrico. Estos factores constituyen la base técnica para la definición del entorno de estudio

3.2.1. Caracterización de la Ruta de Estudio

El análisis experimental se desarrolla en el corredor vial comprendido entre la Universidad Técnica del Norte, ubicada en la ciudad de Ibarra, y la parroquia de Zuleta, perteneciente al cantón Ibarra, provincia de Imbabura. El recorrido considerado para el estudio incluye tanto el trayecto de ida (UTN → Zuleta) como el trayecto de regreso (Zuleta → UTN), permitiendo evaluar el comportamiento energético del vehículo eléctrico bajo condiciones reales de operación.

La Figura 6 presenta el trazado general de la ruta de estudio empleada durante el ensayo experimental. De acuerdo con la información obtenida mediante “Apple Maps”, el recorrido presenta una distancia aproximada de 20.06 km por trayecto y un tiempo estimado de desplazamiento cercano a 36 minutos bajo condiciones normales de circulación.

Figura 5. *Ruta de estudio entre Ibarra y Zuleta.*



Fuente: Elaboración propia a partir de Apple Maps.

El recorrido presenta variaciones de pendiente, cambios en el tipo de vía y diferentes regímenes de conducción, incluyendo tramos urbanos con circulación interrumpida, sectores interurbanos y zonas rurales con flujo vehicular más continuo.

La ruta de estudio se desarrolla en un entorno de altura característico de la región interandina ecuatoriana, donde las condiciones topográficas pueden influir directamente sobre la demanda energética del sistema de tracción eléctrica.

Adicionalmente, se consideran parámetros ambientales característicos de la zona de estudio, los cuales permiten contextualizar las condiciones de operación del vehículo durante el ensayo experimental.

Estos valores, obtenidos de estudios previos, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. *Condiciones ambientales referenciales de la zona de estudio.*

Parámetro ambiental	Valor estimado (Zuleta)	Aplicación en el estudio
Altitud	2800 m s.n.m.	Caracterización del entorno
Presión atmosférica	72 kPa	Condición de operación en altura
Temperatura promedio	10–18 °C	Contexto térmico del sistema
Densidad del aire	0.86 kg/m³	Influencia en resistencia aerodinámica

Tomado: M. L. Elsayed, Parámetros, de altura, (2020) [33].

3.2.2 Definición de variables de estudio.

En la presente investigación se consideran variables eléctricas, dinámicas y de entorno, las cuales permiten caracterizar el comportamiento energético del vehículo eléctrico durante el recorrido experimental de ida y retorno entre la Universidad Técnica del Norte y la parroquia de Zuleta.

Las variables analizadas incluyen parámetros medidos directamente mediante el sistema de adquisición de datos, así como variables derivadas obtenidas a partir del procesamiento experimental de la información registrada para poder evaluar el desempeño energético del sistema de tracción bajo diferentes condiciones de operación, incluyendo cambios de velocidad, variaciones topográficas y condiciones reales de circulación.

La Tabla 3 presenta la clasificación de las variables consideradas durante el desarrollo experimental del estudio.

Tabla 3. *Variables de estudio.*

Tipo de variable	Variable	Unidad
Medida	Corriente (I)	A
Medida	Voltaje (V)	V
Medida	Estado de carga (SOC)	%
Medida	Velocidad	km/h
Medida	Tiempo	s
Medida	Distancia	km
Medida	Altitud	m.s.n.m.
Derivada	Potencia (P)	W
Derivada	Energía (E)	Wh
Derivada	Consumo específico	Wh/km

Fuente: Elaboración propia

3.3 Fase 2: Instrumentación y sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos se realizó mediante la integración de distintos dispositivos de medición, configurados como un sistema de registro distribuido. El sistema estará compuesto por instrumentos de medición eléctrica, dispositivos de geolocalización y herramientas de registro digital, los cuales operarán de manera sincronizada garantizando la coherencia temporal de los datos obtenidos durante el ensayo.

3.3.1 Medición de corriente eléctrica

La medición de la corriente del sistema de tracción se realizó mediante una pinza amperimétrica digital modelo OWON CM2100B, instalada en el conductor de salida - positivo principal del banco de baterías, como se puede observar en la Figura 6.

***Figura 6**. Pinza amperimétrica OWON CM2100Bl*



Fuente: Elaboración Propia

El equipo permite la medición de corriente continua sin contacto directo, por seguridad y facilidad de instalación. La adquisición de datos se efectuó mediante transmisión inalámbrica vía Bluetooth, con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, almacenándose los registros en formato digital (.txt) en un dispositivo móvil para su posterior procesamiento. La ubicación del sensor permitió registrar la corriente total demandada por el sistema durante el ciclo de conducción.

3.3.2 Monitoreo del sistema de baterías

El vehículo dispone de un sistema de visualización integrado, a través del cual se obtiene información del estado del sistema de almacenamiento energético, incluyendo:

- Voltaje total del banco de baterías
- Voltaje individual por celdas
- Estado de carga (SOC)

Debido a que estas variables presentan variaciones graduales en el tiempo, su registro se efectuó de forma puntual durante el ensayo, permitiendo su posterior correlación con las variables eléctricas y dinámicas obtenidas.

3.3.3 Registro del perfil de conducción

El registro del perfil de conducción se realizó mediante una aplicación móvil de adquisición de datos "Track logger", la cual permitió capturar en tiempo real variables dinámicas del vehículo durante el recorrido:

- Velocidad del vehículo
- Tiempo
- Distancia recorrida
- Altitud

Los cuales permiten la reconstrucción del perfil de conducción. Los datos registrados fueron almacenados digitalmente para su posterior procesamiento y sincronización con las variables eléctricas obtenidas durante el ensayo.

3.4 Fase 3: Definición del ciclo de conducción

El ciclo de conducción empleado en la presente investigación se define a partir del recorrido real comprendido entre la Universidad Técnica del Norte, ubicada en la ciudad de Ibarra, y la parroquia de Zuleta, considerando tanto el trayecto de ida como el de retorno. Este recorrido fue seleccionado debido a que representa condiciones reales de operación para un vehículo eléctrico en entornos de altura.

El recorrido incluye diferentes regímenes de operación, como tramos urbanos con circulación interrumpida, arranques, detenciones, aceleraciones y desaceleraciones; sectores suburbanos de transición; y segmentos rurales e interurbanos con un flujo vehicular más continuo. La ruta presenta variaciones en el tipo de vía y cambios de pendiente que influyen directamente en la demanda energética del sistema de tracción eléctrica, incluyendo cambios de velocidad, condiciones de ascenso y

descenso, así como modificaciones en la carga mecánica requerida por el vehículo durante el trayecto.

3.5 Fase 4: Ejecución Experimental

El procedimiento experimental se llevó sobre la ruta de estudio definida bajo condiciones normales de circulación considerando tanto el trayecto de ida como el de retorno. Durante el recorrido se registraron variables eléctricas, dinámicas y de entorno mediante los sistemas de adquisición de datos emparejados con el tiempo como referencia.

3.5.1 Características del vehículo de Ensayo

El vehículo utilizado en el presente estudio corresponde a un Chevrolet Corsa modelo 2004 convertido a propulsión eléctrica, equipado con un sistema de tracción de 18 kW operando en un rango de tensión entre 96 y 108 V, así como un sistema de almacenamiento basado en baterías de ion-litio de 104 V y 100 Ah.

La masa total del vehículo se estableció en 995 kg, considerando la estructura del vehículo, el sistema de conversión eléctrica y la carga correspondiente a los ocupantes durante el ensayo. Esta condición representa el estado operativo real utilizado para el desarrollo de las pruebas experimentales. La distribución de masa considerada para el vehículo de ensayo se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. *Distribución de la Masa del Vehículo de Ensayo*

Componente	Masa (kg)
Chasis aligerado	625
Kit eléctrico	180
Acople y transmisión	45
Ocupantes	145
Masa total	**995**

Fuente: Elaboración propia

La masa total considerada constituye un parámetro fundamental para el análisis dinámico y energético del vehículo, debido a su influencia directa sobre variables como demanda de potencia, resistencia a la rodadura, aceleración y consumo energético durante el ciclo de conducción.

3.5.2. Preparación del Ensayo

Previo al desarrollo del ensayo experimental, se verificó el correcto funcionamiento del sistema de adquisición de datos, asegurando la adecuada comunicación entre los dispositivos de medición, sensores y herramientas de registro empleadas durante la prueba.

Asimismo, se realizó la comprobación operativa del sistema eléctrico del vehículo, incluyendo la verificación del suministro de energía, funcionamiento del sistema de tracción y condiciones generales del banco de baterías antes del inicio del recorrido experimental.

Además, se midió la corriente en estado de reposo, con el vehículo detenido y sin demanda de tracción, con el propósito de identificar posibles consumos asociados a sistemas auxiliares, se registraron las condiciones iniciales del ensayo, incluyendo el estado de carga del banco de baterías (SOC), así como parámetros básicos de operación necesarios para establecer una condición de referencia durante el análisis energético posterior.

El ensayo se desarrolló bajo condiciones normales de operación del vehículo, sin modificaciones adicionales ni alteraciones externas en la carga del vehículo durante el recorrido.

3.5.3 Desarrollo del ensayo

Durante la ejecución del recorrido experimental entre la Universidad Técnica del Norte y la parroquia de Zuleta, considerando tanto el trayecto de ida como el de retorno, se registraron de manera simultánea variables eléctricas, dinámicas y de entorno del vehículo.

El procedimiento experimental contempló el registro continuo de variables eléctricas asociadas al sistema de tracción, así como parámetros dinámicos del vehículo, incluyendo velocidad, tiempo, distancia recorrida y posición geográfica durante el ciclo de conducción.

También se realizó el monitoreo del estado de carga del sistema de baterías (SOC) durante el desarrollo del ensayo, permitiendo evaluar la variación energética del vehículo en función de las condiciones operativas presentes a lo largo del recorrido.

El desarrollo del ensayo permitió obtener un perfil integral del comportamiento bajo diferentes regímenes de conducción, incluyendo condiciones de aceleración, desaceleración, circulación urbana y variaciones topográficas presentes en la ruta experimental.

3.5.4 Sincronización de datos

Los datos obtenidos a partir de las diferentes fuentes de adquisición fueron organizados y sincronizados en función del tiempo de registro, considerando las frecuencias de muestreo correspondientes a cada variable monitoreada durante el ensayo experimental.

Este procedimiento permitió integrar la información eléctrica, dinámica y de posicionamiento en una única base de datos experimental, facilitando el procesamiento y análisis posterior del comportamiento energético.

La sincronización de datos permitió relacionar variables como corriente, velocidad, altitud, potencia, distancia recorrida y estado de carga del sistema de baterías, estableciendo una base experimental coherente para el análisis energético desarrollado en el capítulo de resultados.

3.6 Fase 5: Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de la información se realizó a partir de los datos experimentales registrados durante el recorrido de ida y retorno entre la Universidad Técnica del Norte y la parroquia de Zuleta. Los datos obtenidos mediante el sistema

de adquisición fueron organizados y procesados inicialmente en hojas de cálculo de Excel y posteriormente analizados mediante el software RStudio, con el propósito de evaluar el comportamiento energético del vehículo eléctrico bajo condiciones reales de operación.

El análisis contempló el procesamiento de variables eléctricas, dinámicas y de entorno registradas durante el ensayo experimental, permitiendo establecer relaciones entre el comportamiento del sistema de tracción y las condiciones de conducción presentes a lo largo de la ruta. Se generaron perfiles de comportamiento del sistema, incluyendo análisis de velocidad, altitud, corriente, potencia instantánea, consumo energético acumulado y variación del estado de carga del sistema de baterías (SOC). De igual manera, se evaluó la respuesta energética del vehículo frente a diferentes condiciones operativas, tales como aceleraciones, desaceleraciones, tramos urbanos, ascensos y descensos presentes durante el ciclo de conducción experimental.

El procesamiento de datos permitió obtener una base experimental organizada para el desarrollo del análisis energético y comparativo presentado en el capítulo de resultados.

3.6.1 Cálculo de potencia y energía

El cálculo de la potencia y energía del sistema eléctrico se se determinó a partir del producto entre el voltaje del sistema y la corriente medida en cada instante de tiempo:

Formula 1

$$\boldsymbol{P(t) = V(t) * I(t)}$$

Donde:

- $P(t)$ es la potencia instantánea (W),
- $V(t)$ el voltaje del sistema (V)
- $I(t)$ la corriente (A).

La energía consumida o recuperada durante el ciclo de conducción se obtuvo mediante la integración de la potencia en función del tiempo:

Formula 2

$$E = \int P(t)\, dt$$

Para el procesamiento de los datos, esta integración se realizó de forma discreta a partir de los valores registrados, permitiendo obtener la energía total en unidades de Wh.

3.6.2 Consumo Energético.

El consumo energético del vehículo se determinó a partir de la relación entre la energía total consumida y la distancia recorrida, expresado como consumo específico:

Este procedimiento permitirá determinar el consumo energético real del vehículo en el ciclo de conducción definido, constituyendo un parámetro fundamental para la evaluación del desempeño del sistema de carga a bordo.

Formula 3

$$C_e = \frac{E}{d}$$

Donde:

- C: Consumo específico (Wh/km)
- E: Energía total consumida (Wh)
- d: Distancia recorrida (km)

Este parámetro permite evaluar la eficiencia energética del vehículo bajo distintas condiciones de operación.

3.6.3 Análisis del comportamiento energético

El análisis del comportamiento energético se realizó mediante la identificación de patrones de consumo y recuperación de energía durante el ciclo de conducción, así como su relación con las condiciones de operación del vehículo eléctrico convertido.

Para complementar este análisis, se consideraron las principales fuerzas resistivas que actúan durante el desplazamiento del vehículo, permitiendo interpretar la influencia de las condiciones dinámicas y topográficas sobre la demanda energética del sistema de tracción.

La resistencia aerodinámica se estimó mediante la siguiente expresión:

Formula 4

$$\boldsymbol{R_A = \frac{1}{2} * p * Kf * Cx * V^2}$$

Donde:

- $p =$ Densidad del aire (kg/m^3)
- $kf =$ Área frontal del vehículo (m^2)
- $Cx =$ Coeficiente de arrastre
- $V =$ Velocidad del vehículo m/s

Por otra parte, la resistencia a la rodadura se estimó mediante:

Formula 5

$$\boldsymbol{R_{rodadura} = m * g * fr * \cos\theta}$$

Donde:

- $m =$ Masa total del vehículo (kg)
- $g =$ Aceleración gravitacional 9,81 (m/s^2)
- $fr =$ Resistencia a la rodadura

- θ = Ángulo de inclinación de la vía.

Para el presente estudio, se consideró un coeficiente de resistencia a la rodadura representativo para neumáticos en condiciones normales de operación, así como un radio dinámico del neumático de aproximadamente 0.29 m, correspondiente a la configuración del vehículo.

Se planteó un modelo teórico idealizado del vehículo basado en condiciones con ausencia de perturbaciones externas significativas, con el propósito de comparar el comportamiento energético experimental frente a un escenario de referencia simplificado.

La potencia mecánica ideal requerida por el vehículo se estimó mediante:

$$\boldsymbol{P = F * V}$$

Donde:

- $\boldsymbol{P}$: Potencia requerida $(\boldsymbol{W})$
- $\boldsymbol{F}$: Fuerza resistiva total $(\boldsymbol{N})$
- $\boldsymbol{V}$: Velocidad del vehículo $(\boldsymbol{m/s})$

Estas consideraciones permitieron interpretar las variaciones del consumo energético en función de la velocidad, la pendiente y las condiciones reales de operación del vehículo durante el ciclo de conducción experimental.

El análisis contempló:

- Segmentación del recorrido en tramos de ascenso, descenso y operación estable
- Relación entre perfil altitudinal y consumo energético
- Identificación de periodos de consumo energético (potencia positiva)

- Identificación de eventos de regeneración (potencia negativa)
- Evaluación de la variación del estado de carga (SOC)

3.7 Fase 6: Análisis comparativo

El análisis comparativo se realizó con el propósito de evaluar el desempeño energético del vehículo eléctrico convertido bajo condiciones reales de operación frente a un escenario teórico idealizado.

El escenario experimental corresponde a los datos obtenidos durante el recorrido de ida y retorno, caracterizado por variaciones de velocidad, presencia de pendientes, cambios topográficos y diferentes condiciones de conducción presentes durante el ensayo experimental.

Por otra parte, el escenario teórico ideal fue definido bajo condiciones simplificadas de operación, considerando velocidad, pendientes y altitud del mismo ensayo experimental, representando un comportamiento energético de referencia sin perturbaciones externas relevantes.

Para la comparación entre ambos escenarios se consideraron los siguientes parámetros:

- Energía total consumida
- Consumo específico (Wh/km)
- Variación del estado de carga del sistema de baterías (SOC)
- Comportamiento de la potencia eléctrica

Este análisis permitió cuantificar la influencia del perfil de conducción y de las condiciones topográficas sobre el consumo energético del vehículo, así como identificar las diferencias entre el desempeño real y el esperado bajo condiciones ideales.

CAPITULO IV
RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Perfil del vehículo del ensayo.

Con el propósito de complementar el análisis energético del vehículo se realizó la estimación de las principales fuerzas resistivas presentes durante el desplazamiento, considerando parámetros geométricos, aerodinámicos y operativos del vehículo bajo condiciones reales de conducción.

Estas fuerzas influyen directamente en la demanda energética del sistema de tracción, especialmente durante tramos de ascenso y condiciones de operación con mayor carga mecánica.

Datos de entrada:

- $\boldsymbol{p} = 0.90\ (kg/m^3)$ Densidad del aire
- $\boldsymbol{kf} = 2.1\ (m^2)$ Área frontal del vehículo
- $\boldsymbol{Cx} = 0.38$ Coeficiente de arrastre
- $\boldsymbol{V} = 10.55\ (m/s)$ Velocidad del vehículo

4.1.1 Resistencia Aerodinámica

La resistencia aerodinámica representa la fuerza opuesta al movimiento generada por la interacción entre el vehículo y el aire durante el desplazamiento.

Para su estimación se empleó la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{R_A = \frac{1}{2} * p * Kf * Cx * V^2}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$\boldsymbol{R_A = \frac{1}{2} * (0.90\ kg/m^3) * (2.1 m^2) * (0.38) * (10.55\ m/s^2)}$$

Obteniéndose:

$$R_A \approx 39.9\ N$$

El valor obtenido evidencia que la resistencia aerodinámica presenta una influencia moderada durante el recorrido experimental, debido a que las velocidades de operación registradas fueron relativamente bajas en comparación con condiciones de circulación de alta velocidad. Esta fuerza incrementa progresivamente con el cuadrado de la velocidad, por lo que su influencia energética se vuelve más significativa en tramos de operación continua y velocidades elevadas.

4.1.2 Resistencia a la Rodadura

La resistencia a la rodadura corresponde a la fuerza generada por la deformación de los neumáticos y la interacción mecánica entre el sistema de rodadura y la superficie de la vía.

Datos de entrada:

- $\boldsymbol{m}$ = 958 kg (masa total inercial)
- $\boldsymbol{g}$ = 9.81 m/s2 (Aceleración gravitatoria)
- $\boldsymbol{\theta}$ = arctan (0.12) ≈ 6.84° (Ángulo de inclinación para pendiente del 12%)
- $\boldsymbol{fr}$ = 0.015 (Coeficiente de rodadura para asfalto irregular)

Para su estimación se utilizó la siguiente expresión:

$$R_{rodadura} = m * g * fr * \cos\theta$$

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$R_{rodadura} = 995\ kg * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.015 * \cos(6.84°)$$

Obteniéndose:

$$R_{rodadura} \approx 145.4\ N$$

4.2. Perfil de conducción del recorrido

Este análisis comprende la variación de la velocidad en función del tiempo, el comportamiento altitudinal de la ruta y la identificación de los distintos tramos de conducción, incluyendo zonas urbanas, rurales, ascensos y descensos. La información fue registrada mediante un sistema de adquisición de datos digital "Track logger" sincronizado con la adquisición de variables eléctricas del sistema de tracción. La evaluación del perfil de conducción constituye una base fundamental para el análisis energético del vehículo, debido a que las variaciones de velocidad, pendiente y condiciones de circulación influyen directamente sobre la demanda de potencia, el consumo energético y los eventos de regeneración eléctrica durante el recorrido. En la Figura 7 se presenta la ruta correspondiente al ensayo experimental realizado, utilizada como referencia para la adquisición de datos y el posterior análisis dinámico y energético del vehículo.

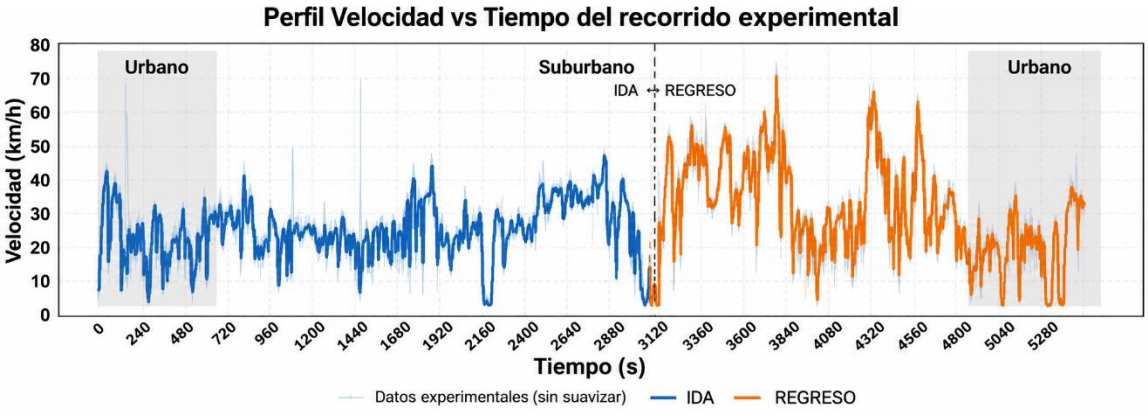
***Figura 7**. Ruta de conducción del ensayo entre Ibarra y Zuleta*



4.2.1 Perfil velocidad–tiempo

Como se observa en la Figura 9, presenta el perfil velocidad–tiempo obtenido durante el recorrido experimental entre la ciudad de Ibarra y la parroquia de Zuleta, permitiendo caracterizar el comportamiento dinámico del vehículo bajo condiciones reales de operación.

Figura 8. *Perfil velocidad vs tiempo del recorrido experimental UTN – Zuleta – UTN.*



Durante el trayecto de ida, representado en color azul, se observan velocidades moderadas con variaciones frecuentes asociadas principalmente a una inclinación positiva como a zonas urbanas y suburbanas, donde existen eventos de desaceleración, detención parcial e interacciones con el tráfico vehicular. Asimismo, conforme avanza el recorrido, se evidencia una conducción más estable en determinados segmentos interurbanos.

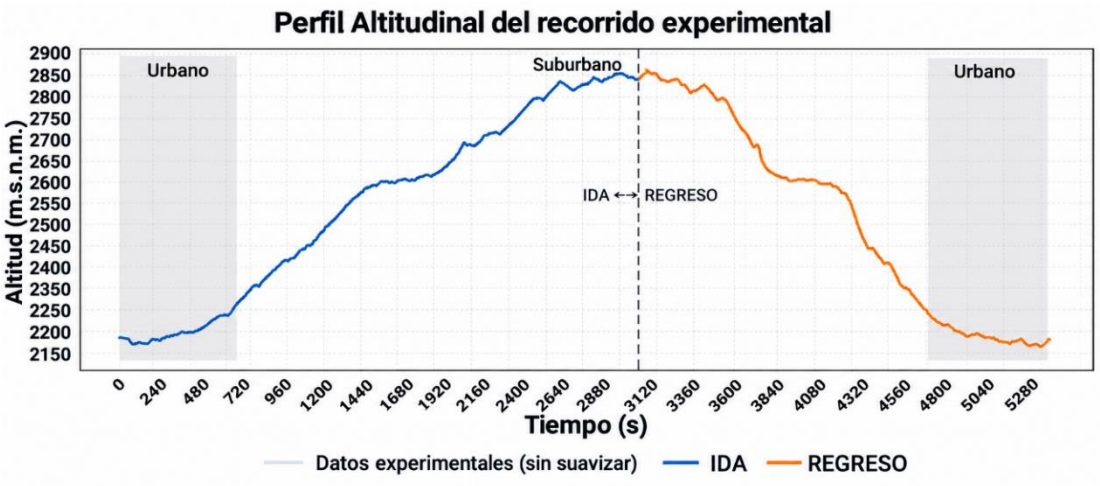
El trayecto de regreso, representado en color naranja, presenta mayores fluctuaciones de velocidad y picos más elevados, alcanzando velocidades cercanas a 70 km/h en algunos sectores del recorrido. Este comportamiento se encuentra relacionado con la presencia predominante de tramos descendentes y una menor carga mecánica requerida por el sistema de tracción eléctrica.

La gráfica permite identificar diferentes regímenes de conducción a lo largo del ensayo experimental, incluyendo condiciones urbanas con circulación interrumpida y segmentos suburbanos con flujo vehicular más continuo. Estas variaciones influyen directamente sobre la demanda energética del vehículo y sobre el comportamiento del sistema eléctrico durante el ciclo de conducción.

4.2.2 Perfil altitudinal del recorrido

El perfil altitudinal obtenido durante el ensayo se presenta en la Figura 10, donde se muestra la variación de la altitud en función del tiempo a lo largo del recorrido entre la ciudad de Ibarra y la parroquia de Zuleta.

Figura 9. *Perfil Altitudinal del Trayecto*



La Figura 10 presenta el perfil altitudinal obtenido durante el recorrido experimental realizado entre la Universidad Técnica del Norte (UTN) y la parroquia de Zuleta, considerando tanto el trayecto de ida como el de regreso. La gráfica fue construida a partir de los datos de altitud registrados durante el ensayo experimental que facilita la interpretación del comportamiento topográfico de la ruta de estudio.

Durante el trayecto de ida, representado en color azul, se observa un incremento progresivo de altitud desde aproximadamente 2200 m.s.n.m. hasta valores cercanos a 2880 m.s.n.m., evidenciando la presencia predominante de tramos de ascenso continuo. Este comportamiento topográfico implica una mayor demanda energética sobre el sistema de tracción eléctrica debido al incremento de carga mecánica requerido para el desplazamiento del vehículo.

Por otro lado el trayecto de regreso, representado en color naranja, presenta una disminución progresiva de altitud conforme el vehículo retorna hacia la ciudad de Ibarra. En este caso predominan condiciones descendentes, las cuales generan una menor exigencia energética sobre el sistema eléctrico, favorecen escenarios de menor demanda de potencia durante determinados segmentos del recorrido y crea posibles escenarios de regeneración energética.

La gráfica permite identificar diferentes condiciones operativas a lo largo de la ruta experimental, incluyendo sectores urbanos de menor variación altitudinal y segmentos suburbanos donde se concentran los cambios topográficos más representativos del ensayo.

El perfil altitudinal constituye un parámetro fundamental dentro del análisis energético del vehículo eléctrico convertido, debido a que las variaciones de pendiente influyen directamente sobre variables como corriente, potencia, consumo energético y estado de carga del sistema de baterías durante el ciclo de conducción experimental.

4.2.3 Identificación de tramos operativos del recorrido experimental

Durante el trayecto se identifican sectores urbanos caracterizados por velocidades moderadas, circulación interrumpida y frecuentes eventos de desaceleración y

detención parcial, principalmente en zonas cercanas al área urbana de la ciudad de Ibarra y sectores poblados próximos al recorrido.

Se identifican tramos suburbanos e interurbanos donde el vehículo presenta un comportamiento de conducción más estable, con mayores velocidades de circulación y menor presencia de interrupciones asociadas al tráfico vehicular.

Desde el punto de vista topográfico, el trayecto de ida presenta predominantemente condiciones de ascenso progresivo hacia zonas de mayor altitud, generando una mayor demanda energética sobre el sistema de tracción eléctrica. Por otra parte, el trayecto de regreso se caracteriza principalmente por condiciones descendentes, permitiendo una reducción de la carga mecánica requerida por el vehículo durante determinados segmentos del recorrido.

Estas condiciones operativas permiten establecer diferentes escenarios de funcionamiento del sistema eléctrico, influyendo directamente sobre variables como corriente, potencia, consumo energético y estado de carga del sistema de baterías durante el ciclo de conducción experimental.

4.3. Comportamiento eléctrico del sistema

El comportamiento eléctrico del sistema de tracción fue analizado a partir de los datos de corriente, voltaje y estado de carga registrados durante el recorrido experimental entre la Universidad Técnica del Norte y la parroquia de Zuleta, considerando tanto el trayecto de ida como el de regreso.

Este análisis permitió evaluar la respuesta del sistema eléctrico bajo diferentes condiciones reales de operación, identificando variaciones en la demanda energética asociadas a cambios de velocidad, aceleraciones, desaceleraciones y variaciones topográficas presentes durante el ciclo de conducción experimental.

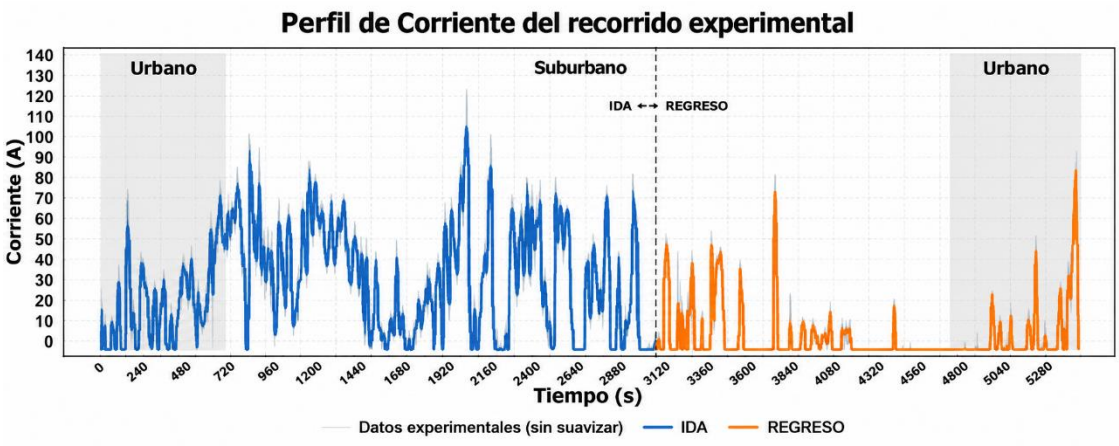
El procesamiento de las variables eléctricas permitió determinar el comportamiento de la potencia instantánea, el consumo energético y la variación del estado de carga del sistema de baterías, estableciendo relaciones directas entre las condiciones de conducción y la respuesta energética del vehículo eléctrico convertido.

4.3.1 Corriente en función del tiempo

Con el propósito de analizar el comportamiento eléctrico del sistema de tracción durante el recorrido experimental, se registró la variación de corriente consumida por el vehículo a lo largo del trayecto entre la Universidad Técnica del Norte (UTN) y la parroquia de Zuleta, considerando tanto el recorrido de ida como el de regreso.

La Figura 11 presenta el perfil de corriente en función del tiempo obtenido durante el ensayo experimental. La gráfica fue construida a partir de los datos registrados por el sistema de adquisición, incorporando una tendencia suavizada que facilita la interpretación de las principales variaciones del comportamiento eléctrico del vehículo.

Figura 10. *Corriente del sistema en función del tiempo*



Durante el trayecto de ida, representado en color azul, se observan mayores niveles de demanda de corriente, alcanzando picos superiores a 100 A en determinados

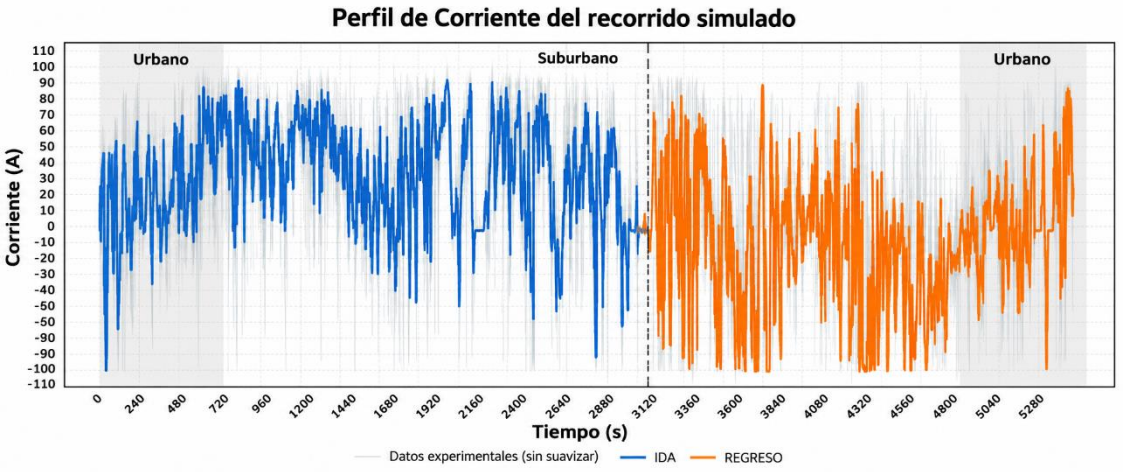
segmentos del recorrido. Este comportamiento se encuentra asociado principalmente a las condiciones de ascenso progresivo, aceleraciones y mayores requerimientos de potencia del sistema de tracción eléctrica durante el desplazamiento hacia zonas de mayor altitud.

El trayecto de regreso, representado en color naranja, evidencia una disminución general de la corriente demandada por el vehículo, observándose intervalos prolongados de baja exigencia energética y menores valores promedio de corriente. Este comportamiento se relaciona directamente con la presencia predominante de tramos descendentes y una menor carga mecánica requerida por el sistema de tracción durante el retorno hacia la ciudad de Ibarra.

Se identificaron múltiples variaciones transitorias de corriente asociadas a cambios de velocidad, aceleraciones, desaceleraciones y condiciones reales de conducción presentes durante el ciclo experimental.

El comportamiento de la corriente registrada evidencia la influencia directa de las condiciones topográficas y operativas sobre la demanda energética del vehículo eléctrico convertido, constituyendo una variable fundamental para el análisis posterior de potencia eléctrica, consumo energético y comportamiento del sistema de baterías. De manera complementaria al análisis experimental de corriente

Figura 11. *Corriente del sistema simulado en función del tiempo*



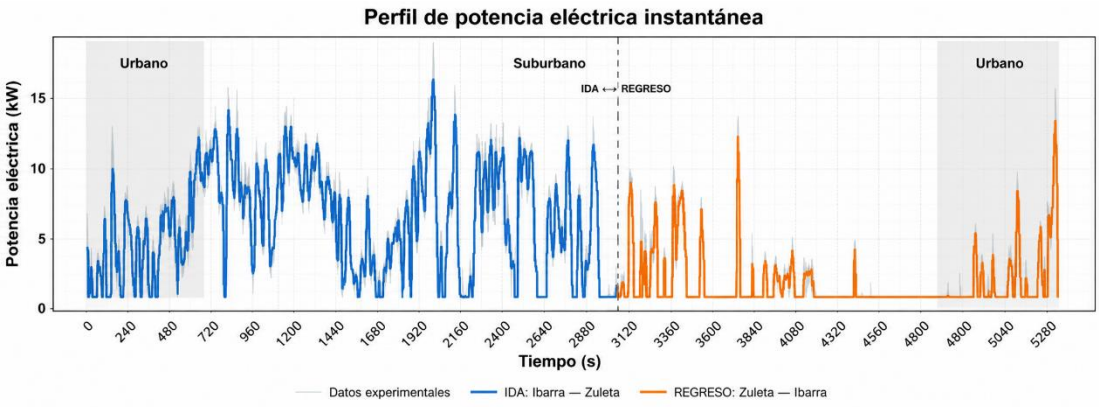
realizado previamente, se evaluó el comportamiento de esta variable mediante los resultados obtenidos en la simulación.

La Figura 11 presenta un comportamiento de corriente similar al observado durante el ensayo experimental, identificándose zonas de alta demanda energética que coinciden con los segmentos de mayor exigencia del recorrido. Asimismo, los niveles máximos de corriente obtenidos mediante simulación se encuentran dentro de rangos comparables a los registrados experimentalmente, evidenciando una adecuada representación de la demanda del sistema de tracción por parte del modelo. A diferencia de los resultados experimentales, se observan múltiples intervalos con valores negativos de corriente, principalmente durante los tramos asociados a pendientes descendentes. Estos eventos representan condiciones en las que el motor eléctrico opera temporalmente como generador, permitiendo la recuperación parcial de energía hacia el sistema de baterías. La presencia de estos valores negativos constituye uno de los principales aportes del modelo de simulación, ya que permite identificar y analizar escenarios de regeneración energética que no pudieron ser cuantificados directamente durante las pruebas experimentales.

4.3.2 Potencia instantánea del sistema

La potencia instantánea del sistema durante el recorrido experimental se presenta en la Figura 12, obtenida a partir del producto entre la corriente registrada y el voltaje nominal del sistema de tracción.

Figura 12. *Potencia instantánea del sistema*



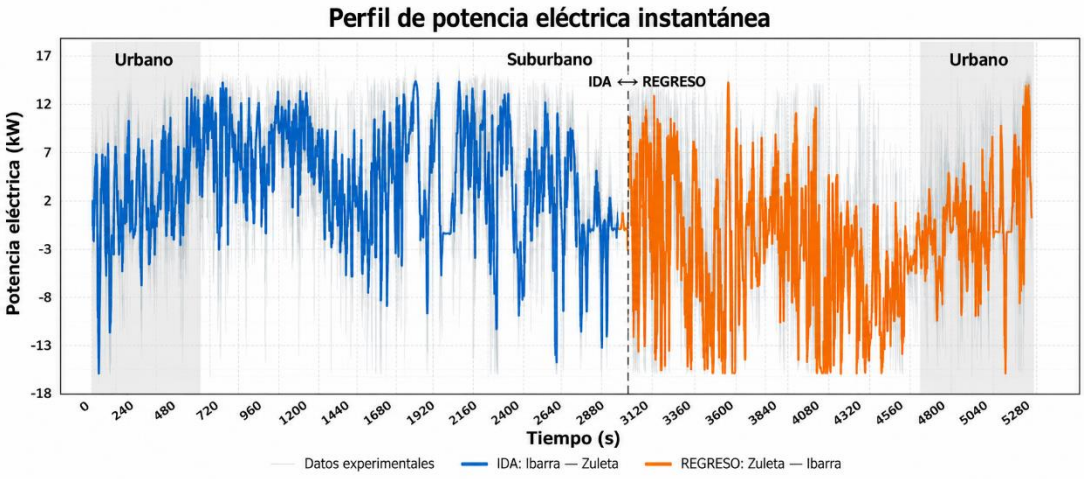
Durante el trayecto de ida, se observan valores positivos elevados de potencia, alcanzando picos superiores a 10 kW en determinados segmentos del recorrido. Este comportamiento se relaciona directamente con las condiciones de ascenso progresivo y mayores requerimientos de tracción presentes durante el desplazamiento hacia zonas de mayor altitud. Durante el trayecto de regreso se evidencia una disminución general de la potencia demandada, así como la presencia de múltiples intervalos con valores negativos de pendiente asociados principalmente a condiciones descendentes. En estos sectores, la demanda energética del sistema disminuye considerablemente debido a la menor carga mecánica requerida por el vehículo.

Se observa una relación directa entre el comportamiento de la pendiente longitudinal y la demanda energética del sistema eléctrico, evidenciando una mayor

potencia requerida en condiciones de ascenso y menores niveles de consumo energético en tramos descendentes.

Este análisis de la potencia instantánea permite caracterizar la respuesta energética del sistema de tracción eléctrica frente a las diferentes condiciones operativas y topográficas presentes durante el recorrido experimental. Para complementar el análisis experimental, se desarrolló una simulación energética bajo las mismas condiciones de operación registradas durante el ensayo.

Figura 13. *Potencia instantánea del sistema simulado*



La Figura 13 muestra el comportamiento de la potencia eléctrica estimada mediante el modelo de simulación para el recorrido. A diferencia de los resultados experimentales, se observa la presencia de valores negativos de potencia en varios segmentos del trayecto, principalmente durante los descensos más pronunciados.

Estos valores negativos indican que el motor opera temporalmente como generador, transformando parte de la energía mecánica del vehículo en energía eléctrica y devolviéndola al sistema de baterías. En consecuencia, también se prevé la existencia de corrientes negativas durante dichos intervalos, evidenciando la posibilidad de recuperación energética mediante frenado regenerativo.

La presencia de estas zonas de potencia negativa permite identificar los sectores del recorrido con mayor potencial de regeneración, demostrando que el perfil topográfico no solo influye en el consumo energético durante los ascensos, sino también debería influir en la capacidad de recuperación de energía durante los descensos.

4.3.3 Análisis de picos de demanda energética

El análisis de picos de demanda energética se realizó con el propósito de identificar los intervalos del recorrido experimental donde el sistema de tracción eléctrica presentó mayores requerimientos de corriente y potencia durante el ciclo de conducción.

A partir del procesamiento de los datos experimentales registrados durante el ensayo, se identificó que los mayores picos de demanda energética ocurrieron principalmente durante el trayecto de ida hacia la parroquia de Zuleta, coincidiendo con sectores de ascenso progresivo y eventos de aceleración del vehículo. En estos segmentos se registraron valores máximos de corriente cercanos a 115 A y picos de potencia superiores a 10 kW, evidenciando una elevada exigencia energética sobre el sistema de tracción eléctrica.

Los mayores niveles de consumo se presentaron en intervalos donde coexistieron pendientes positivas y variaciones rápidas de velocidad, lo que incrementó significativamente la demanda de potencia requerida para mantener el desplazamiento del vehículo hacia zonas de mayor altitud. Durante el trayecto de regreso se observó una reducción considerable de la demanda energética promedio, registrándose menores valores de corriente y potencia en gran parte del recorrido debido a la presencia predominante de tramos descendentes. Sin embargo, se identificaron algunos picos transitorios asociados a aceleraciones puntuales y

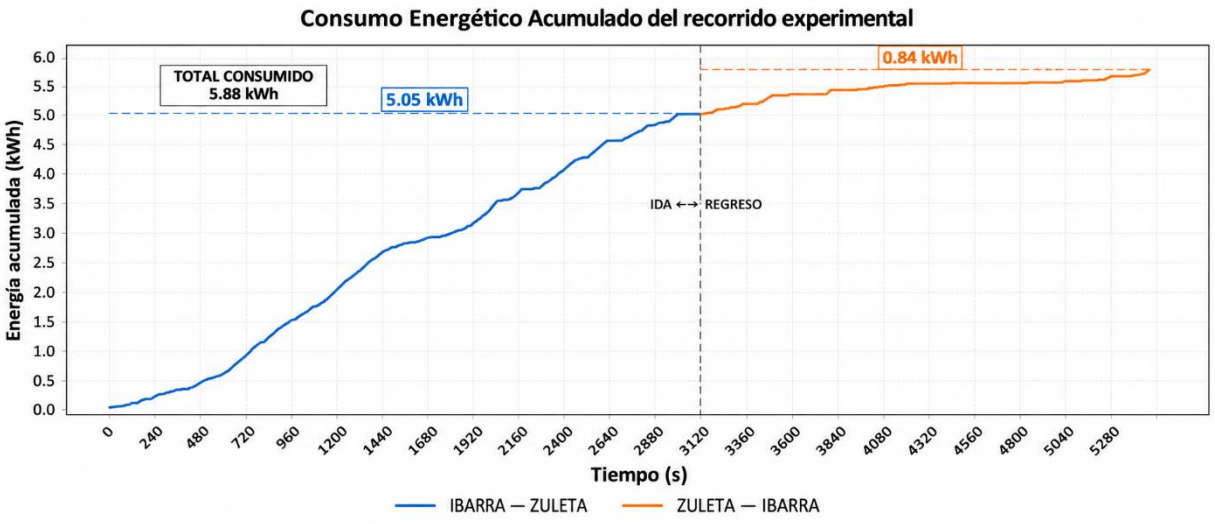
cambios en las condiciones de circulación, alcanzando valores cercanos a 90 A en determinados segmentos del retorno.

4.4. Consumo energético del vehículo

El análisis del consumo energético del vehículo se realizó a partir del procesamiento de la potencia eléctrica registrada durante el recorrido experimental, considerando tanto el trayecto de ida como el de regreso.

La Figura 14 presenta el comportamiento del consumo energético acumulado en función del tiempo durante el ciclo de conducción experimental. La energía acumulada fue obtenida mediante la integración discreta de la potencia instantánea registrada durante el ensayo, permitiendo evaluar la demanda energética total del sistema de tracción eléctrica bajo condiciones reales de operación.

Figura 14. *Consumo Energético Acumulado*

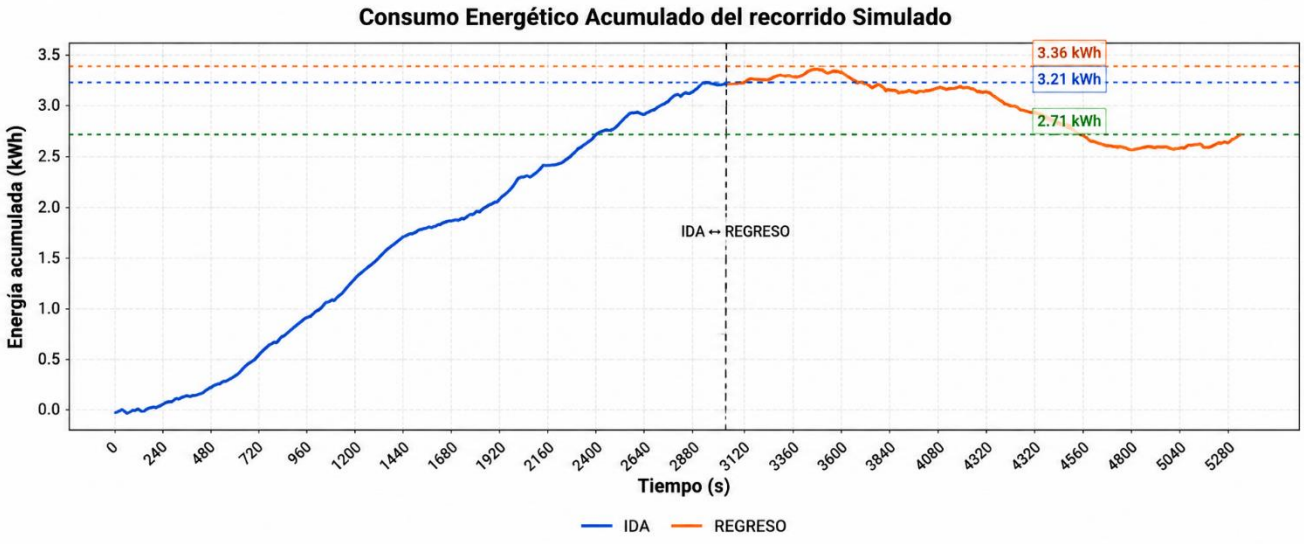


Durante el trayecto de ida, representado en color azul, se observa un incremento progresivo y continuo de la energía acumulada, alcanzando un consumo aproximado de 5.05 kWh al finalizar el desplazamiento hacia Zuleta. Este comportamiento se relaciona directamente con las condiciones predominantes de ascenso y la mayor

demanda energética requerida por el vehículo durante el recorrido hacia zonas de mayor altitud. El trayecto de regreso, representado en color naranja, evidencia un incremento energético considerablemente menor, registrándose un consumo adicional cercano a 0.84 kWh durante el retorno hacia la ciudad de Ibarra. Esta reducción significativa en la demanda energética se encuentra asociada principalmente a la presencia predominante de tramos descendentes y menores requerimientos de potencia del sistema de tracción eléctrica. Como resultado del ciclo completo de conducción experimental, el vehículo presentó un consumo energético acumulado total aproximado de 5.88 kWh para el recorrido UTN – Zuleta – UTN.

Con el fin de evaluar el efecto de la recuperación energética sobre el balance energético global del vehículo, se analizó la evolución del consumo energético acumulado obtenido mediante la simulación del recorrido UTN–Zuleta–UTN. La Figura 15 presenta el comportamiento de la energía neta intercambiada entre la batería y el sistema de tracción a lo largo del trayecto, considerando la acción del frenado regenerativo durante los segmentos descendentes.

Figura 15. *Consumo Energético Acumulado (simulación)*



La Figura 15 muestra que durante el trayecto de ida el consumo energético acumulado aumenta progresivamente hasta alcanzar aproximadamente 3.21 kWh al llegar a Zuleta. Posteriormente, durante el recorrido de regreso, la energía acumulada continúa incrementándose hasta registrar un máximo cercano a 3.36 kWh, valor que representa la mayor demanda energética neta observada durante todo el trayecto.

A partir de este punto se evidencia una reducción progresiva de la energía acumulada, alcanzando valores cercanos a 2.71 kWh al finalizar el recorrido. Este comportamiento únicamente es posible debido a la presencia de potencia y corriente negativas registradas por el modelo durante varios tramos descendentes, donde el motor eléctrico opera como generador y permite recuperar parte de la energía potencial gravitatoria del vehículo.

La diferencia entre el valor máximo acumulado (3.36 kWh) y la energía neta final (2.71 kWh) indica una recuperación aproximada de 0.65 kWh mediante frenado regenerativo, equivalente al 19.3 % de la energía máxima demandada durante el recorrido. Este resultado evidencia que la topografía de la ruta no solo condiciona el consumo energético en los ascensos, sino que también ofrece un potencial significativo para la recuperación de energía en los descensos, contribuyendo a mejorar la eficiencia energética global del vehículo.

4.4.1 Energía total consumida

La energía total consumida durante el ensayo experimental se determinó a partir del procesamiento de los datos de potencia eléctrica registrados a lo largo del recorrido UTN – Zuleta – UTN, mediante la integración de la potencia en función del tiempo.

La energía total del recorrido se obtuvo a partir de la suma de la energía consumida durante los trayectos de ida y regreso:

$$E_{total} = E_{ida} + E_{regreso}$$

Donde:

- $\boldsymbol{E_{total}}$: Energía total consumida durante el recorrido completo ($\boldsymbol{kWh}$)
- $\boldsymbol{E_{ida}}$: Energía consumida durante el trayecto UTN → Zuleta ($\boldsymbol{kWh}$)
- $\boldsymbol{E_{regreso}}$: Energía consumida durante el trayecto Zuleta → UTN ($\boldsymbol{kWh}$)

Sustituyendo los valores experimentales en la ecuación**:**

$$\boldsymbol{E_{total} = 5.05\ kWh + 0.88\ kWh}$$

Obteniéndose:

$$\boldsymbol{E_{total} = 5.89\ kWh}$$

El tiempo total de operación registrado durante el ensayo experimental fue de aproximadamente $\boldsymbol{5400\ s}$, obtenido a partir de la suma de los tiempos correspondientes al trayecto de ida y regreso. Convirtiendo el tiempo total a horas: $\boldsymbol{1.50\ h}$

La potencia promedio del sistema durante el recorrido experimental se estimó mediante:

$$\boldsymbol{P_{prom} = \frac{E}{t}}$$

Sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente:

$$\boldsymbol{P_{prom} = \frac{5.89\ kWh}{1.50\ h}}$$

Obteniéndose:

$$\boldsymbol{P_{prom} = 3.93\ kW}$$

El valor obtenido representa la demanda energética promedio del sistema de tracción eléctrica durante el recorrido experimental completo, integrando los efectos asociados a aceleraciones, cambios de velocidad, condiciones de tráfico y variaciones topográficas presentes durante el ciclo de conducción.

Y sustituyendo los valores experimentales en la ecuación de energía total consumida**:**

$$\boldsymbol{Energía\ (kWh) = \frac{Potencia\ (W)}{1000} \times Tiempo\ (horas)}$$

Donde:

- E: Energía consumida (kWh)
- P: Potencia eléctrica (W)
- t: Tiempo de operación (h)

Sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente:

$$\boldsymbol{E = 3.93\ kW\ x\ 1.50\ h}$$

Obteniéndose:

$$\boldsymbol{E \approx 5.89\ kWh}$$

Este procedimiento se implementa de forma discreta en hoja de cálculo, considerando los intervalos de muestreo registrados durante la adquisición de datos. El valor obtenido representa la energía neta demandada por el sistema de tracción eléctrica durante el recorrido completo, integrando los efectos asociados a aceleraciones, cambios de velocidad y variaciones topográficas presentes durante el ensayo experimental.

4.4.2 Consumo específico (Wh/km)

El consumo específico del vehículo se determinó a partir de la relación entre la energía total consumida y la distancia recorrida durante el ensayo

El consumo específico se estimó mediante la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{C = \frac{E}{d}}$$

Se determinó una energía total consumida de 5.89 kWh, equivalente a 5890 Wh, y una distancia recorrida aproximada de 40.12 km.

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$C = \frac{5890\ (Wh)}{40.12\ (km)}$$

Obteniéndose**:**

$$\boldsymbol{C \approx 146.8\ Wh/km}$$

El valor obtenido representa el consumo energético específico del vehículo eléctrico convertido bajo condiciones reales de operación, considerando las variaciones de velocidad, cambios topográficos y diferentes niveles de demanda energética presentes durante el ciclo de conducción experimental.

Este parámetro constituye un indicador fundamental para evaluar la eficiencia energética del sistema de tracción eléctrica y permite establecer comparaciones con otros vehículos eléctricos bajo condiciones similares de operación.

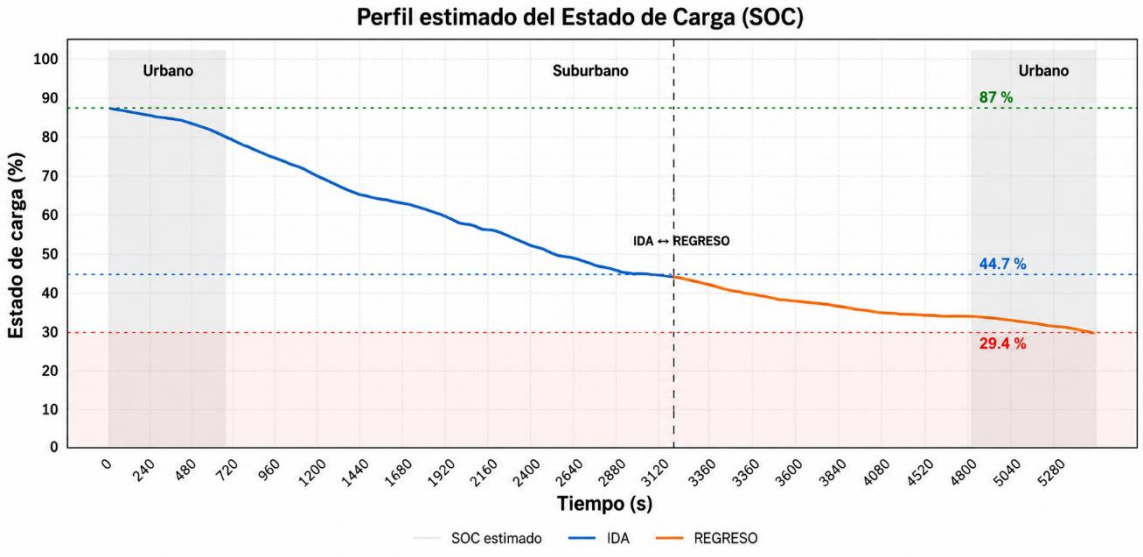
4.4.3 Variación del estado de carga (SOC)

Con el propósito de evaluar el comportamiento energético del sistema de almacenamiento durante el recorrido experimental, se analizó la variación del estado de carga (SOC) de las baterías a lo largo del trayecto.

Durante el trayecto de ida (UTN → Zuleta), el estado de carga disminuye desde un valor inicial de 90% hasta 36%, evidenciando una reducción significativa de energía disponible en el sistema de baterías. Este comportamiento se encuentra directamente asociado a las condiciones de ascenso predominantes en la ruta. Durante el trayecto de regreso (Zuleta → UTN), el SOC presenta una disminución considerablemente menor, pasando de 36% a 10%. Esta reducción más moderada se relaciona principalmente con las condiciones descendentes de la ruta, donde la carga mecánica requerida por el motor eléctrico disminuye notablemente.

Para evaluar el comportamiento de la batería durante el recorrido, se estimó la variación del estado de carga (SOC) considerando las condiciones de operación registradas y el efecto del frenado regenerativo incorporado en el modelo. La Figura 17 presenta la evolución del SOC a lo largo del trayecto UTN–Zuleta–UTN.

Figura 16. *Variación del estado de carga (SOC) simulado*



La Figura 16 muestra una disminución progresiva del estado de carga de la batería desde aproximadamente el 90 % al inicio del recorrido hasta cerca del 45 % al finalizar el trayecto. Durante el trayecto de ida, el SOC desciende hasta valores cercanos al 44.7 %, reflejando la elevada demanda energética asociada a los tramos de ascenso predominantes en esta sección del recorrido.

En el trayecto de regreso se observa una pendiente de descarga menos pronunciada, lo que indica una menor demanda energética neta de la batería respecto a la registrada durante la ida. Aunque se identifican pequeñas variaciones asociadas a eventos puntuales de recuperación energética, estas no generan incrementos significativos del SOC, sino que contribuyen principalmente a reducir la velocidad de descarga de la batería.

Al comparar estos resultados con los obtenidos experimentalmente, donde el SOC disminuyó aproximadamente del 90 % al 36 % en la ida y alcanzó valores cercanos al 10 % al final del recorrido, se evidencia que el modelo predice un comportamiento menos agresivo de descarga durante el regreso. Este resultado sugiere que la recuperación energética y las condiciones topográficas favorables de los tramos descendentes podrían mejorar el aprovechamiento energético del vehículo, reduciendo la energía neta extraída de la batería durante la segunda mitad de la ruta.

4.5. Análisis del comportamiento energético

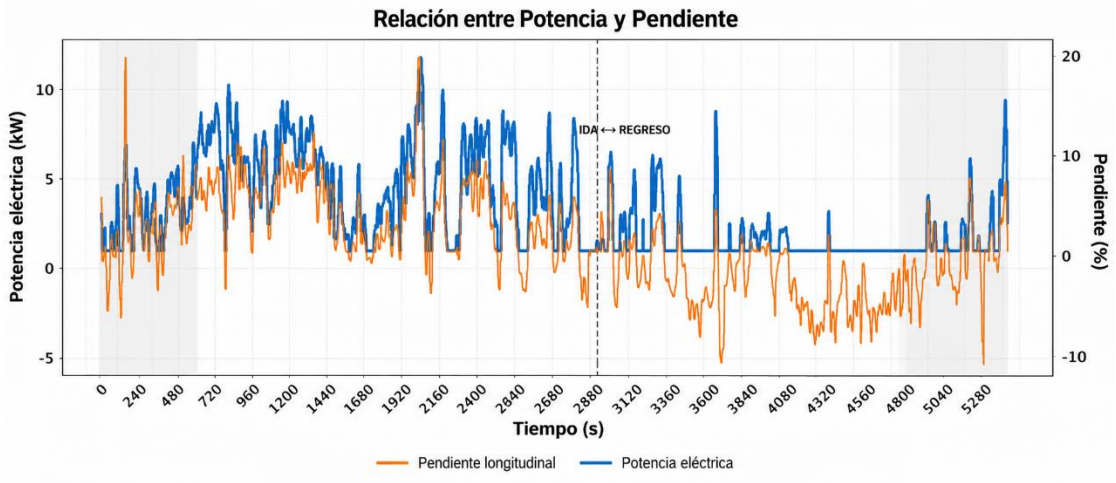
El análisis del comportamiento energético del vehículo eléctrico convertido se realizó a partir de la correlación entre el perfil de conducción, la potencia instantánea y las condiciones topográficas presentes durante el recorrido experimental.

Este análisis permitió identificar la influencia directa de las variaciones de pendiente y de las condiciones dinámicas de conducción sobre la demanda energética del sistema de tracción eléctrica, así como sobre el comportamiento de consumo y recuperación de energía durante el ciclo de conducción experimental.

4.5.1 Identificación de periodos de consumo

La Figura 17 presenta la relación entre la potencia eléctrica instantánea del sistema y la pendiente longitudinal registrada durante el recorrido experimental, permitiendo identificar los principales periodos de consumo energético asociados a las diferentes condiciones topográficas del trayecto.

Figura 17. *Relación entre altitud, tendencia de potencia y periodos de consumo*



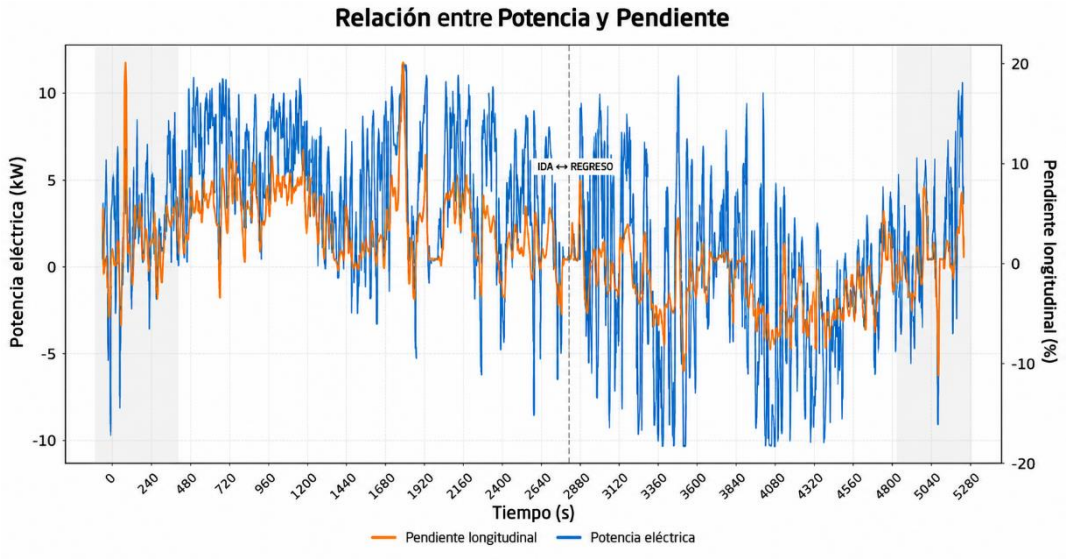
Durante el trayecto de ida se observan los mayores niveles de demanda energética, coincidiendo principalmente con sectores de pendiente positiva y condiciones de ascenso progresivo hacia zonas de mayor altitud. En estos segmentos, la potencia instantánea alcanzó valores superiores a 10 kW, evidenciando un incremento significativo en la carga mecánica requerida por el sistema de tracción eléctrica.

Este comportamiento se encuentra directamente relacionado con la necesidad de vencer las fuerzas resistivas asociadas a la componente gravitacional del vehículo, lo que genera un aumento considerable en la demanda de potencia y corriente durante los tramos ascendentes del recorrido.

Durante el trayecto de regreso predominan condiciones de pendiente negativa, observándose una reducción general de la potencia demandada por el sistema.

Con el fin de analizar la capacidad del modelo para representar el comportamiento energético del vehículo eléctrico convertido, se evaluó la relación entre la potencia eléctrica estimada y la pendiente longitudinal del recorrido simulado.

Figura 18. *Relación entre altitud, tendencia de potencia y periodos de consumo*



La Figura 18 presenta la distribución de los valores de potencia obtenidos para las diferentes condiciones topográficas registradas durante la ruta UTN–Zuleta–UTN. Evidencia una distribución de potencia coherente con los resultados obtenidos experimentalmente, observándose que la mayor parte de los datos se concentra en rangos similares a los registrados durante el ensayo real. Asimismo, se identifican valores de potencia cercanos a 10 kW y únicamente algunos eventos puntuales que superan este nivel, manteniendo una tendencia general consistente con el comportamiento observado experimentalmente.

Esta similitud entre los resultados simulados y experimentales sugiere que el modelo digital representa adecuadamente la influencia de las condiciones de operación sobre la demanda energética del vehículo, reproduciendo de manera satisfactoria los niveles de potencia característicos del recorrido analizado. A diferencia de los resultados experimentales, el modelo presenta una cantidad notoria de valores negativos de potencia. Estos eventos corresponden a condiciones en las que el motor opera como generador, permitiendo la recuperación parcial de energía mediante frenado regenerativo. Mientras que en el ensayo experimental los tramos de baja demanda energética se representaron principalmente mediante valores cercanos a

cero, la simulación permite identificar y cuantificar escenarios de regeneración energética, proporcionando una representación más completa del intercambio energético entre el sistema de tracción y el banco de baterías.

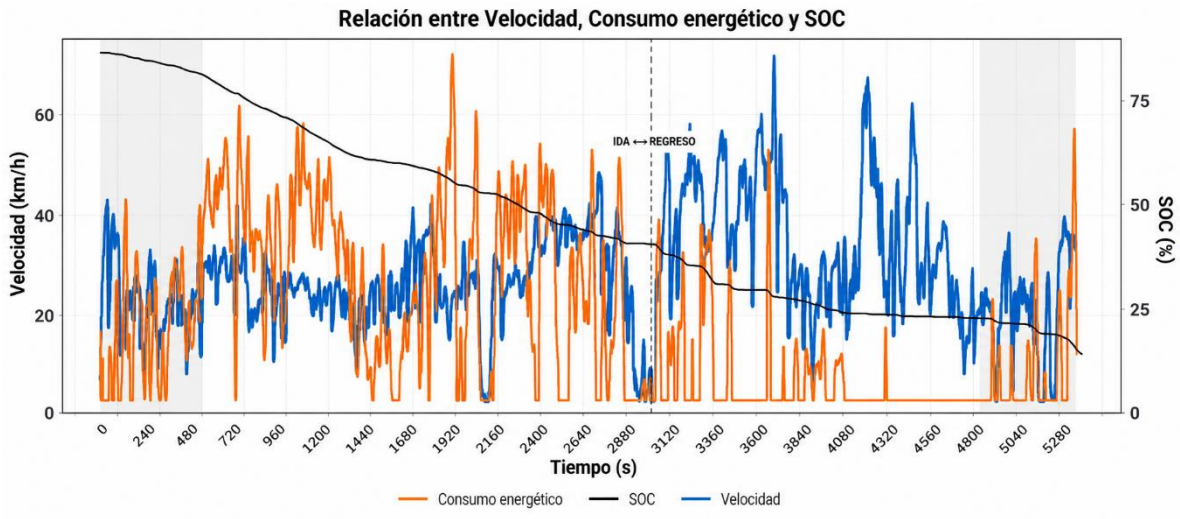
4.5.2 Identificación de eventos de regeneración

Durante los tramos descendentes y condiciones de menor carga mecánica, el sistema de tracción eléctrica presentó una reducción considerable en la demanda energética, asociada principalmente a la asistencia gravitacional generada por la pendiente del terreno durante el trayecto de regreso hacia la ciudad de Ibarra.

La Figura 19 presenta la relación entre velocidad, consumo energético y variación del estado de carga del sistema de baterías (SOC) durante el recorrido experimental.

A partir del análisis conjunto de estas variables fue posible identificar intervalos donde el vehículo operó bajo menores requerimientos energéticos, especialmente en sectores de descenso y conducción más estable.

Figura 19. *Identificación de eventos de baja demanda energética*



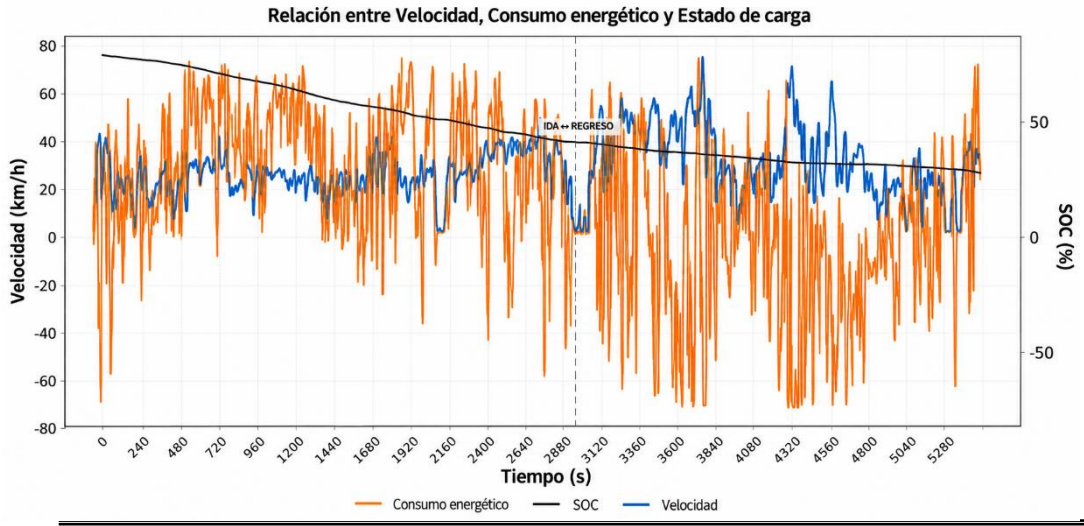
En estos segmentos se observan disminuciones importantes en el consumo energético instantáneo, acompañadas por condiciones de velocidad moderada y una reducción progresivamente más lenta del estado de carga del sistema de baterías.

Este comportamiento evidencia una disminución significativa de la energía requerida por el sistema de tracción durante determinados intervalos del recorrido. Durante el trayecto de regreso se identifican múltiples periodos donde el consumo energético tiende a aproximarse a valores mínimos, particularmente en sectores descendentes donde la carga mecánica sobre el vehículo disminuye considerablemente. Estas condiciones representan indicios de posibles eventos de recuperación parcial de energía o escenarios de muy baja demanda energética del sistema eléctrico.

El comportamiento del SOC evidencia una reducción más pronunciada durante el trayecto de ida, pasando aproximadamente del 90 % al 36 %, mientras que durante el recorrido de regreso la disminución del estado de carga ocurre de manera más lenta, alcanzando valores cercanos al 10 % al finalizar el ensayo experimental.

Debido a las limitaciones del sistema de adquisición implementado y a la ausencia de medición directa de corriente regenerativa hacia el banco de baterías, los eventos identificados corresponden principalmente a indicios de reducción de consumo energético y posibles escenarios de recuperación parcial de energía, más que a una cuantificación directa del proceso de regeneración eléctrica. Con el propósito de complementar los resultados obtenidos experimentalmente, se desarrolló el mismo análisis considerando las variables estimadas mediante el modelo de simulación.

Figura 20. *Identificación de eventos de baja demanda energética simulada*



La Figura 20 muestra una relación consistente entre la velocidad del vehículo, la corriente demandada por el sistema de tracción y la variación del estado de carga de la batería. Durante la mayor parte del recorrido predominan valores positivos de corriente asociados al consumo energético requerido para el desplazamiento del vehículo, mientras que el SOC presenta una disminución progresiva acorde con la energía suministrada por el banco de baterías.

A diferencia de los resultados experimentales, se observan intervalos puntuales con valores negativos de corriente. Estos eventos corresponden a escenarios de recuperación energética donde el motor eléctrico opera temporalmente como

generador, permitiendo el retorno de energía hacia el sistema de almacenamiento. Aunque la magnitud de estos eventos es reducida y no genera incrementos apreciables en el SOC, sí contribuye a disminuir la tasa de descarga de la batería durante determinados segmentos del recorrido.

Este comportamiento se refleja en una reducción menos pronunciada del estado de carga respecto a los resultados experimentales. Mientras que en el ensayo real el SOC disminuyó desde aproximadamente el 90 % hasta valores cercanos al 10 % al finalizar el recorrido, la simulación predice una descarga considerablemente menor 30%, evidenciando el efecto acumulativo de los eventos de regeneración y de las condiciones favorables presentes durante los tramos de retorno. Estos resultados refuerzan la capacidad del modelo para representar fenómenos energéticos que no pudieron ser cuantificados directamente durante la adquisición experimental de datos.

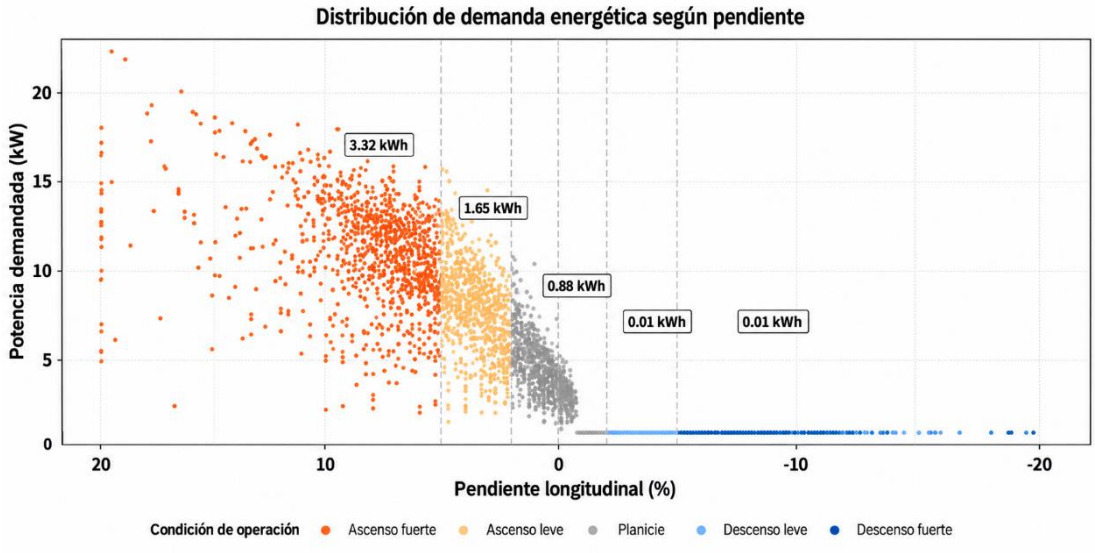
4.5.3 Análisis por tramos (ascenso, descenso, estable)

Para evaluar la influencia de las condiciones topográficas sobre el comportamiento energético del vehículo eléctrico convertido, el recorrido experimental fue segmentado según la pendiente longitudinal registrada durante el ensayo,

permitiendo identificar condiciones de ascenso fuerte, ascenso leve, planicie, descenso leve y descenso fuerte.

La Figura 21 presenta la distribución de demanda energética del vehículo en función de la pendiente longitudinal del recorrido, relacionando los niveles de potencia eléctrica demandada con las diferentes condiciones topográficas presentes durante el ciclo de conducción experimental.

Figura 21. *Consumo energético por tipo de tramo*



Como se observa en la gráfica, los tramos de ascenso fuerte concentran los mayores niveles de demanda energética, alcanzando valores de potencia superiores a 20 kW en determinados segmentos del recorrido. Asimismo, estos sectores representan el mayor consumo energético acumulado del ensayo, registrando aproximadamente 3.32 kWh del consumo totagl del vehículo.

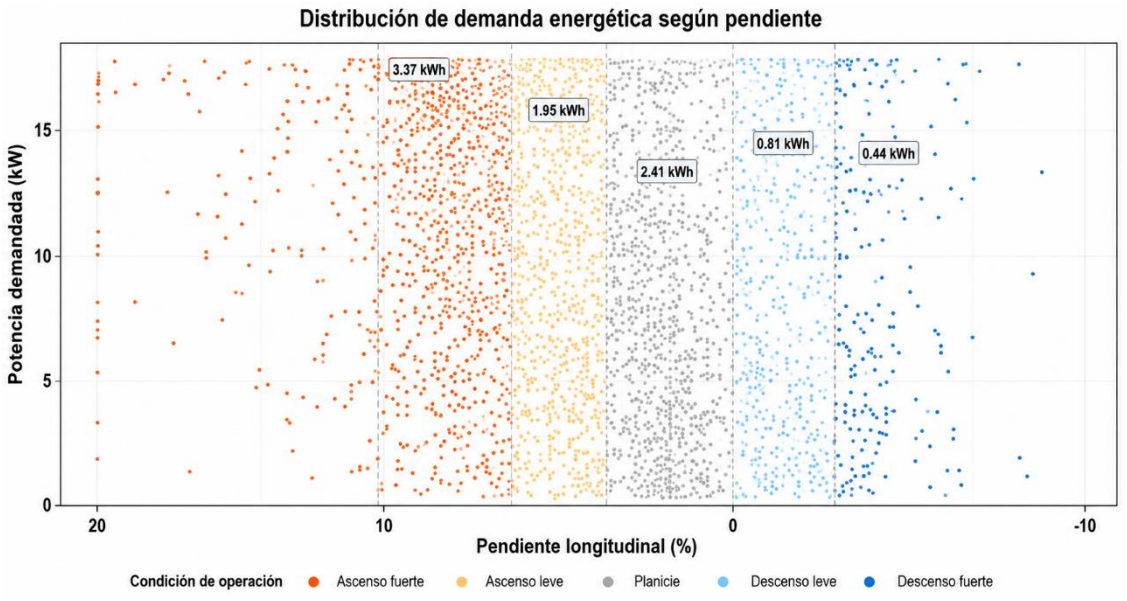
Los tramos de ascenso leve presentan una demanda energética moderadamente elevada, con valores de potencia principalmente comprendidos entre 4 y 12 kW, acumulando aproximadamente 1.65 kWh durante el recorrido experimental.

En condiciones simplificadas, el comportamiento energético del vehículo presenta una menor variabilidad y menores niveles de potencia demandada, registrándose un consumo aproximado de 0.88 kWh asociado a condiciones más estables de operación.

Durante los tramos de descenso leve y descenso fuerte se observa una reducción significativa de la demanda energética, evidenciándose valores mínimos de potencia requeridos por el sistema de tracción eléctrica. En estos segmentos, el consumo energético registrado fue considerablemente menor, alcanzando valores cercanos a 0.01 kWh en determinadas condiciones descendentes.

De manera complementaria se evaluó la relación entre la pendiente longitudinal y la potencia eléctrica utilizando los resultados obtenidos mediante simulación.

***Figura 22**. Consumo energético simulado por tipo de tramo*



La Figura 22 muestra una distribución de potencia consistente con el comportamiento observado experimentalmente, donde los mayores requerimientos energéticos se concentran en condiciones de pendiente positiva. Asimismo, la mayor parte de los datos se ubica dentro de rangos de potencia similares a los

obtenidos durante el ensayo real, lo que evidencia una adecuada representación de la demanda energética por parte del modelo de simulación.

Una diferencia importante respecto a los resultados experimentales es la presencia de una cantidad significativa de valores negativos de potencia asociados principalmente a pendientes negativas. Estos eventos representan condiciones en las que el motor eléctrico opera como generador, permitiendo la recuperación parcial de energía durante los descensos del recorrido.

La concentración de estos puntos en la zona de pendientes descendentes confirma la relación directa entre la topografía de la ruta y el potencial de regeneración energética del vehículo. De esta manera, el modelo no solo reproduce satisfactoriamente los niveles de potencia observados experimentalmente, sino que además permite identificar y cuantificar fenómenos de recuperación energética que no pudieron ser registrados directamente durante las pruebas experimentales

4.6 Análisis comparativo

El análisis comparativo se desarrolló con el propósito de evaluar las diferencias entre el comportamiento energético experimental del vehículo eléctrico convertido y un escenario teórico idealizado de operación.

El escenario experimental corresponde a los datos obtenidos durante el recorrido completo UTN – Zuleta – UTN, caracterizado por variaciones de velocidad, presencia de pendientes, aceleraciones, desaceleraciones y diferentes condiciones reales de circulación presentes durante el ensayo. El modelo teórico ideal fue planteado bajo condiciones simplificadas de operación por la misma ruta y requerimientos del vehículo.

La comparación entre ambos escenarios permite identificar la influencia directa de factores como la topografía, las fuerzas resistivas, las variaciones de velocidad y las condiciones dinámicas de conducción sobre el consumo energético y el desempeño general del vehículo eléctrico convertido.

Este análisis facilita la interpretación del impacto que tienen las condiciones reales de operación sobre variables como potencia demandada, consumo específico, estado de carga del sistema de baterías y autonomía estimada del vehículo durante el ciclo de conducción experimental.

4.6.1 Modelo teórico ideal

Para el desarrollo del modelo teórico ideal se consideró el mismo perfil de conducción obtenido durante la prueba experimental.

Bajo estas ondiciones, el consumo energético del vehículo depende principalmente de las fuerzas resistivas aerodinámicas y de rodadura, permitiendo estimar un comportamiento energético de referencia para el sistema de tracción eléctrica implementado.

El modelo ideal fue desarrollado utilizando parámetros representativos del vehículo obtenidos durante el ensayo experimental, como masa total, velocidad promedio, coeficientes resistivos y condiciones ambientales de operación en altura. Los parámetros utilizados para el análisis se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de entrada utilizados para el modelo teórico ideal

Parámetro	Símbolo	Valor
Masa total del vehículo	$(\boldsymbol{m})$	$995\ kg$
Velocidad promedio representativa	$(\boldsymbol{V})$	$40\ km/h$ $\approx 11.11\ m/s$
Densidad del aire en altura	$(\boldsymbol{p})$	$0.90\ kg/m^3$
Área frontal estimada	$(\boldsymbol{Kf})$	$2.1\ m^2$
Coeficiente aerodinámico	$(\boldsymbol{Cx})$	0.38

Coeficiente de resistencia a la rodadura	$(\boldsymbol{Crr})$	0.015
Aceleración gravitatoria	$(\boldsymbol{g})$	9.81 m/s^2
Ángulo de inclinación equivalente	$(\boldsymbol{\theta})$	0°
Distancia total de referencia	$(\boldsymbol{d})$	40.12 km

Los parámetros presentados en la Tabla 5 fueron utilizados para estimar el comportamiento energético ideal del vehículo eléctrico convertido bajo condiciones uniformes de operación. A partir de estos valores, se calcularon las principales fuerzas resistivas que actúan sobre el vehículo durante el desplazamiento, permitiendo posteriormente estimar la potencia requerida, la energía consumida y el consumo específico ideal del sistema.

- La resistencia aerodinámica se determinó mediante:

$$\boldsymbol{R_A = \frac{1}{2} * p * Kf * Cx * V^2}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$\boldsymbol{R_A = \frac{1}{2} * (0.90\ kg/m^3) * (2.1 m^2) * (0.38) * (11.11\ m/s^2)}$$

Obteniéndose:

$$\boldsymbol{R_A \approx 44.3\ N}$$

- La resistencia a la rodadura se estimó mediante:

$$\boldsymbol{R_{rodadura} = m * g * fr * \cos\theta}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$\boldsymbol{R_{rodadura} = 995\ kg * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.015 * \cos(0°)}$$

Obteniéndose:

$$R_{rodadura} \approx 146.4\ N$$

- La potencia teórica ideal requerida por el vehículo se estimó como primero la fuerza total ideal:

Formula 6

$$F_{total} = R_A + R_{rodadura}$$

Sustituyendo:

$$F_{total} = 44.3\ N + 146.4\ N$$

Obteniéndose:

$$F_{total} = 190.7\ N$$

- Luego, la potencia mecánica ideal requerida se calcula como:

Formula 7

$$P_{ideal} = F_{total} * V$$

Sustituyendo:

$$P_{ideal} = 190.7\ N * 11.11\ m/s$$

Obteniéndose:

$$P_{ideal} \approx 2.12\ kW$$

- La energía ideal consumida se estimó mediante:

Para la misma distancia del ensayo:

$$d = 40.12\ km$$

A velocidad constante:

$$V = 40\ km/h$$

El tiempo ideal es:

$$t = \frac{d}{V}$$

$$t = \frac{40.12\ km}{40\ km/h}$$

$$t = 1.003\ h$$

Entonces:

$$E_{ideal} = P_{ideal} * t$$

$$E_{ideal} = 2.12\ kW * 1.003\ h$$

Obteniéndose:

$$E_{ideal} = 2.13\ kWh$$

- El consumo específico se estimó mediante:

$$C_{ideal} = \frac{E_{ideal}}{d}$$

Sustituyendo:

$$C_{ideal} = \frac{2130\ Wh}{40.12\ km}$$

Obteniéndose:

$$C_{ideal} = 53.1\ Wh/km$$

Los resultados obtenidos evidencian una disminución significativa del consumo energético respecto al escenario experimental real, debido principalmente a la eliminación de las cargas asociadas al perfil topográfico y a las variaciones dinámicas presentes durante el recorrido.

El consumo específico ideal estimado representa un escenario de máxima eficiencia energética para el vehículo eléctrico convertido, sirviendo como base comparativa para evaluar el impacto de las condiciones reales de operación sobre la autonomía y el desempeño energético del sistema de tracción.

4.6.2 Comparación entre escenario real e ideal

Con el propósito de evaluar la influencia de las condiciones reales de operación sobre el desempeño energético del vehículo eléctrico convertido, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente y el modelo teórico desarrollado.

La Tabla 6 presenta la comparación de los principales parámetros energéticos obtenidos para ambos escenarios.

Tabla 6. Comparación entre escenario experimental e ideal

Parámetro	Escenario ideal	Escenario experimental	Comparación
Potencia promedio	2.12 kW	3.93 kW	+85.4 %
Energía total consumida	2.13 kWh	5.89 kWh	*2.77 veces +
Consumo específico	53.1 Wh/km	146.8 Wh/km	*2.76 veces +
Velocidad promedio	40.0 km/h	37.98 km/h	−5.1 %
Condición topográfica	Ruta registrada	Ruta registrada	—
Régimen de conducción	Velocidad variable	Velocidad variable	—
Perturbaciones dinámicas	Mínimas	Reales de operación	—

Como se observa en la Tabla 6, el escenario experimental presentó un incremento considerable en la demanda energética respecto al modelo teórico ideal.

La potencia promedio registrada experimentalmente fue aproximadamente un $\mathbf{85}$ % superior a la estimada bajo condiciones ideales, comportamiento asociado principalmente a las variaciones topográficas, aceleraciones, desaceleraciones y cambios dinámicos de velocidad presentes durante el recorrido real.

La energía total consumida durante el ensayo experimental alcanzó aproximadamente $\mathbf{5.89}\ \boldsymbol{kWh}$, mientras que el modelo teórico ideal estimó un consumo cercano a $\mathbf{2.13}\ \boldsymbol{kWh}$ para la misma distancia recorrida. Esta diferencia representa un incremento energético superior al doble, evidenciando la influencia directa de las condiciones reales de conducción sobre el desempeño energético del vehículo.

El consumo específico experimental alcanzó aproximadamente $\mathbf{146.8}\ \boldsymbol{Wh/km}$,

valor considerablemente superior al estimado para el escenario ideal ($\mathbf{53.1\ Wh/km}$). Este comportamiento confirma que factores como la topografía, las aceleraciones transitorias y la variabilidad del perfil de conducción generan un aumento significativo en la demanda energética del sistema de tracción eléctrica.

Este análisis comparativo evidencia que el modelo teórico ideal constituye una referencia útil para evaluar el comportamiento energético del vehículo eléctrico convertido, mientras que los resultados experimentales permiten representar de manera más precisa las condiciones reales de operación a las que se encuentra sometido el sistema eléctrico durante la circulación.

4.6.3 Impacto del perfil topográfico en la autonomía

El perfil topográfico del recorrido experimental presentó una influencia directa sobre el consumo energético y la autonomía estimada del vehículo eléctrico convertido, debido principalmente a la presencia de tramos de ascenso prolongado y variaciones altitudinales significativas durante la ruta.

Durante los sectores de ascenso, el sistema de tracción eléctrica requirió mayores niveles de corriente y potencia para vencer las fuerzas resistivas asociadas a la pendiente y a la masa total del vehículo, provocando un incremento considerable en la demanda energética.

Como consecuencia, el consumo específico experimental obtenido durante el ensayo fue significativamente superior al estimado bajo condiciones ideales de operación. A partir de estos valores, se realizó una estimación comparativa de la autonomía teórica del vehículo para ambos escenarios, considerando una capacidad energética disponible del sistema de baterías de aproximadamente:

$$\boldsymbol{E_{bat} = 10400\ Wh}$$

La autonomía teórica ideal se estimó mediante:

$$\boldsymbol{Autonomía_{ideal} = \frac{10400\ Wh}{53.1\ km}}$$

Obteniéndose:

$$\boldsymbol{Autonomía_{ideal} = 196\ km}$$

Mientras que para el escenario experimental:

$$\boldsymbol{Autonomía_{real} = \frac{10400\ Wh}{146.8\ km}}$$

Obteniéndose:

$$\boldsymbol{Autonomía_{real} = 71\ km}$$

Los resultados evidencian una reducción significativa de la autonomía disponible bajo condiciones reales de operación, registrándose una disminución aproximada del **64** % respecto al escenario idealizado.

Esta diferencia se encuentra asociada principalmente al impacto energético generado por las pendientes, variaciones de velocidad, aceleraciones y condiciones dinámicas presentes durante el recorrido experimental.

El análisis demuestra que el perfil topográfico constituye uno de los factores de mayor influencia sobre el desempeño energético de vehículos eléctricos convertidos que operan en regiones de altura y rutas con ascensos prolongados.

CAPITULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La caracterización del perfil de conducción del recorrido UTN–Zuleta–UTN (40.12 km) evidenció una relación directa entre las variaciones de pendiente y la demanda eléctrica del sistema de tracción. Durante los tramos de ascenso, el vehículo alcanzó potencias superiores a 10 kW y corrientes cercanas a 115 A, mientras que en el tramo de regreso —predominantemente descendente— el consumo energético registrado (0.84 kWh) representó apenas el 16.6 % del consumo del tramo de ida (5.05 kWh). Esta diferencia se reflejó también en el estado de carga (SOC) de la batería, que disminuyó de 90 % a 36 % durante el ascenso, frente a una caída de 36 % a 10 % durante el descenso, confirmando que el perfil topográfico es el factor de mayor incidencia sobre el comportamiento energético del vehículo.

La evaluación del consumo energético del vehículo durante el recorrido completo determinó un consumo total de 5.89 kWh, con una potencia promedio de 3.93 kW y un consumo específico de 146.8 Wh/km. Estos valores confirman que, bajo condiciones reales de operación en altura, el sistema de tracción eléctrica opera con una demanda energética considerablemente superior a la de un régimen de conducción uniforme alcanzando un consumo específico 2.76 veces mayor que el estimado para el escenario ideal de 53.1 Wh/km, debido a la combinación de pendientes pronunciadas, aceleraciones variables y cambio de velocidad propios de la ruta interandina evaluada.

En cuanto a la recuperación de energía mediante frenado regenerativo, durante el recorrido experimental no se evidenció un flujo de corriente de retorno hacia el banco de baterías en los tramos descendentes, por lo que no se pudo cuantificar una recuperación energética efectiva durante la prueba. En contraste, el modelo de simulación desarrollado para el mismo recorrido, que incorpora el efecto del frenado regenerativo, estimó una recuperación teórica de 0.65 kWh, equivalente al 19.3 % de

la energía neta máxima demandada (3.36 kWh). La diferencia entre ambos resultados indica que, aunque el modelo establece un potencial teórico de recuperación de energía durante los descensos, dicho comportamiento no se manifestó experimentalmente en el vehículo evaluado, al no registrarse corriente de retorno hacia el banco de baterías.

La comparación entre el escenario experimental y el modelo teórico ideal mostró diferencias sustanciales en los tres parámetros energéticos principales: la potencia promedio real (3.93 kW) fue un 85.4 % superior a la ideal (2.12 kW); la energía total consumida (5.89 kWh) fue 2.8 veces mayor que la estimada en el escenario ideal (2.13 kWh); y el consumo específico real (146.8 Wh/km) fue igualmente 2.8 veces superior al ideal (53.1 Wh/km). Como consecuencia directa, la autonomía estimada del vehículo se redujo de 196 km en el escenario ideal a 71 km en condiciones reales, una disminución del 64 %. Estos resultados confirman que la topografía y la dinámica de conducción constituyen el factor determinante en la brecha de desempeño observada.

5.2. Recomendaciones

Realizar futuros estudios considerando diferentes perfiles topográficos, condiciones climáticas y regímenes de conducción, incorporando variables como pendiente, tráfico y velocidad en el desarrollo de modelos predictivos de consumo energético para vehículos eléctricos convertidos que operen en regiones de altura.

Implementar sistemas de adquisición de datos con mayor resolución y frecuencia de muestreo, que permitan obtener información más precisa sobre las variables eléctricas y dinámicas involucradas en el consumo energético total y específico del vehículo.

Incorporar medición directa de corriente regenerativa hacia el banco de baterías, dado que el modelo de simulación estimó un potencial de recuperación de 0.65 kWh (19.3 % de la energía neta máxima demandada) que no pudo verificarse con la instrumentación utilizada en el ensayo experimental.

Evaluar estrategias de conducción eficiente, distintas configuraciones de baterías y sistemas de gestión energética más avanzados, orientados a reducir la brecha observada entre el consumo real y el escenario ideal y a mejorar el desempeño global del sistema de tracción eléctrica.

Promover el desarrollo de proyectos de movilidad eléctrica adaptados a las condiciones geográficas y topográficas del Ecuador, tomando como base los resultados experimentales de este estudio para optimizar el sistema de carga a bordo en futuras conversiones.

Referencias bibliográficas.

[1] J. A. Guasgua, D. O. Álvarez, P. V. Mazón, and J. C. Flores, "Movilidad sostenible. Caso de estudio: Ecuador," *CONECTIVIDAD*, vol. 6, no. 3, pp. 236–245, Jul. 2025, doi: 10.37431/CONECTIVIDAD.V6I3.216.

[2] G. Lee, J. Song, J. Han, Y. Lim, and S. Park, "Study on energy consumption characteristics of passenger electric vehicle according to the regenerative braking stages during real-world driving conditions," *Energy*, vol. 283, p. 128745, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.128745.

[3] "Sustainable Development Goal 7: Energía asequible y no contaminante | Naciones Unidas en Ecuador." Accessed: Aug. 02, 2026. [Online]. Available: https://ecuador.un.org/es/sdgs/7?utm_source=chatgpt.com

[4] M. Faizal, S. Y. Feng, M. F. Zureel, B. E. Sinidol, D. Wong, and G. K. Jian, "A review on challenges and opportunities of electric vehicles (EVs)," *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, vol. 42, no. 4, pp. 130–137, 2019, doi: 10.26480/JMERD.04.2019.130.137.

[5] B. A. Mayingi, B. A. Thango, and D. Okojie, "Techno-Economic Retrofit Feasibility Assessment of an ICE-to-EV Retrofit for a Light Commercial Pickup Platform," *World Electric Vehicle Journal 2026, Vol. 17, Page 250*, vol. 17, no. 5, p. 250, May 2026, doi: 10.3390/WEVJ17050250.

[6] Z. Jia *et al.*, "A transferable vehicle energy consumption evaluation framework for quantifying vehicle electrification energy benefits," *npj Sustainable Mobility and Transport 2025 2:1*, vol. 2, no. 1, pp. 21-, May 2025, doi: 10.1038/s44333-025-00040-w.

[7] "Global Warming of 1.5 °C —." Accessed: Aug. 02, 2026. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/sr15/

[8] "Transport," *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*, pp. 1049–1160, Aug. 2023, doi: 10.1017/9781009157926.012.

[9] S. Ok and Dr. S. Vennilashree, "A REVIEW ON ELECTRIC VEHICLES: TECHNOLOGIES AND CHALLENGES," *Lex localis - Journal of Local Self-Government*, vol. 23, no. S6, pp. 2060–2094, Oct. 2025, doi: 10.52152/XGBXC645.

[10] F. Barrero and E. M. Szumska, "Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges," *Energies 2025, Vol. 18, Page 2422*, vol. 18, no. 10, p. 2422, May 2025, doi: 10.3390/EN18102422.

[11] F. Nasr Esfahani, A. Darwish, X. Ma, and P. Twigg, "Non-Integrated and Integrated On-Board Battery Chargers (iOBCs) for Electric Vehicles (EVs): A Critical Review," *Energies 2024, Vol. 17, Page 2285*, vol. 17, no. 10, p. 2285, May 2024, doi: 10.3390/EN17102285.

[12] G. Wager, J. Whale, and T. Braunl, "Performance evaluation of regenerative braking systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 232, no. 10, pp. 1414–1427, Sep. 2018, doi: 10.1177/0954407017728651;WEBSITE:WEBSITE:SAGE;ISSUE:ISSUE:DOI.

[13] C. Qiu and G. Wang, "New evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electric vehicles," *Energy Convers. Manag.*, vol. 119, pp. 389–398, Jul. 2016, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2016.04.044.

[14] J. Valladolid, M. Calle, and A. Guiracocha, "Analysis of regenerative braking efficiency in an electric vehicle through experimental tests," *Ingenius*, vol. 2023, no. 29, pp. 24–31, Jan. 2023, doi: 10.17163/INGS.N29.2023.02.

[15] L. Maita Jaramillo and D. Díaz-Sinche, "Advancing Electric Mobility in Andean Countries: A Systematic Review and Case Study of Ecuador," *Sustainability 2025, Vol. 17, Page 8075*, vol. 17, no. 17, p. 8075, Sep. 2025, doi: 10.3390/SU17178075.

[16] I. Husain, "Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, SECOND EDITION," *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, Second Edition*, pp. 1–487, Jan. 2010, doi: 10.1201/9781439894972.

[17] M. Romare and L. Dahllöf, "The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles," 2017, Accessed: Aug. 03, 2026. [Online]. Available: www.ivl.se

[18] xeni and ka, "The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions", Accessed: Aug. 03, 2026. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/

[19] W. Wu, N. Cong, X. Zhang, Q. Yue, and M. Zhang, "Life cycle assessment and carbon reduction potential prediction of electric vehicles batteries," *Science of The Total Environment*, vol. 903, p. 166620, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.166620.

[20] X. Xia and P. Li, "A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries," *Science of The Total Environment*, vol. 814, p. 152870, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.152870.

[21] "Model S - Luxury Electric Sedan | Tesla." Accessed: Aug. 03, 2026. [Online]. Available: https://www.tesla.com/models

[22] "Renault Group, constructeur automobile - Renault Group." Accessed: Aug. 03, 2026. [Online]. Available: https://www.renaultgroup.com/

[23] H. Xu *et al.*, "Energy Management Strategies for Extended-Range Electric Vehicles with Real Driving Emission Constraints," *Applied Sciences 2025, Vol. 15, Page 142*, vol. 15, no. 1, p. 142, Dec. 2024, doi: 10.3390/APP15010142.

[24] G. Wu, X. Zhang, and Z. Dong, “Powertrain architectures of electrified vehicles: Review, classification and comparison,” *J. Franklin Inst.*, vol. 352, no. 2, pp. 425–448, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.JFRANKLIN.2014.04.018.

[25] S. Jurecki *et al.*, “A Comprehensive Review of Electric Vehicles in Energy Systems: Integration with Renewable Energy Sources, Charging Levels, Different Types, and Standards,” *Energies 2023, Vol. 16, Page 630*, vol. 16, no. 2, p. 630, Jan. 2023, doi: 10.3390/EN16020630.

[26] R. Noval *et al.*, “Electric vehicle conversion for sustainable transportation: A journal review,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 3215, no. 1, Nov. 2024, doi: 10.1063/5.0240969/3322045.

[27] V. Katic, B. Dumnic, Z. Corba, and D. Milicevic, “Electrification of the vehicle propulsion system: An overview,” *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, vol. 27, no. 2, pp. 299–316, 2014, doi: 10.2298/FUEE1402299K.

[28] F. S. Hwang *et al.*, “Review of battery thermal management systems in electric vehicles,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 192, p. 114171, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.RSER.2023.114171.

[29] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, “A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 834–854, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.05.001.

[30] K. Ogura and M. L. Kolhe, “Battery technologies for electric vehicles,” *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, pp. 139–167, Jul. 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5.

[31] K. Zhou, H. Yang, Y. Zhang, Y. Che, Y. Huang, and X. Li, “A review of the latest research on the topological structure and control strategies of on-board charging systems for electric vehicles,” *J. Energy Storage*, vol. 97, p. 112820, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.EST.2024.112820.

[32] F. Nasr Esfahani, A. Darwish, X. Ma, and P. Twigg, “Non-Integrated and Integrated On-Board Battery Chargers (iOBCs) for Electric Vehicles (EVs): A Critical Review,” *Energies 2024, Vol. 17, Page 2285*, vol. 17, no. 10, p. 2285, May 2024, doi: 10.3390/EN17102285.

[33] A. R. Dar, A. Haque, M. A. Khan, V. S. B. Kurukuru, and S. Mehfuz, “On-Board Chargers for Electric Vehicles: A Comprehensive Performance and Efficiency Review,” *Energies 2024, Vol. 17, Page 4534*, vol. 17, no. 18, p. 4534, Sep. 2024, doi: 10.3390/EN17184534.

[34] P. Dini, S. Saponara, and A. Colicelli, “Overview on Battery Charging Systems for Electric Vehicles,” *Electronics 2023, Vol. 12, Page 4295*, vol. 12, no. 20, p. 4295, Oct. 2023, doi: 10.3390/ELECTRONICS12204295.

[35] P. Dini, S. Saponara, and A. Colicelli, “Overview on Battery Charging Systems for Electric Vehicles,” *Electronics 2023, Vol. 12, Page 4295*, vol. 12, no. 20, p. 4295, Oct. 2023, doi: 10.3390/ELECTRONICS12204295.

[36] K. Zhou, H. Yang, Y. Zhang, Y. Che, Y. Huang, and X. Li, "A review of the latest research on the topological structure and control strategies of on-board charging systems for electric vehicles," *J. Energy Storage*, vol. 97, p. 112820, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.EST.2024.112820.

[37] F. Nasr Esfahani, A. Darwish, X. Ma, and P. Twigg, "Non-Integrated and Integrated On-Board Battery Chargers (iOBCs) for Electric Vehicles (EVs): A Critical Review," *Energies 2024, Vol. 17, Page 2285*, vol. 17, no. 10, p. 2285, May 2024, doi: 10.3390/EN17102285.

[38] S. Jurecki *et al.*, "A Comprehensive Review of Electric Vehicles in Energy Systems: Integration with Renewable Energy Sources, Charging Levels, Different Types, and Standards," *Energies 2023, Vol. 16, Page 630*, vol. 16, no. 2, p. 630, Jan. 2023, doi: 10.3390/EN16020630.

[39] A. R. Dar, A. Haque, M. A. Khan, V. S. B. Kurukuru, and S. Mehfuz, "On-Board Chargers for Electric Vehicles: A Comprehensive Performance and Efficiency Review," *Energies 2024, Vol. 17, Page 4534*, vol. 17, no. 18, p. 4534, Sep. 2024, doi: 10.3390/EN17184534.

[40] F. Barrero and E. M. Szumska, "Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges," *Energies 2025, Vol. 18, Page 2422*, vol. 18, no. 10, p. 2422, May 2025, doi: 10.3390/EN18102422.