



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

**“ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LA BATERÍA HV PARA LA CONVERSIÓN
DE VEHÍCULOS DE COMBUSTIÓN INTERNA A ELÉCTRICOS EN
CIUDADES DE ALTURA.”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz
--

Línea de investigación: Producción Industrial y Tecnología Sostenible

AUTORES:

Johann Steven Garrido López
Jaime Oswaldo Farinango Morales

DIRECTOR:

Ing. Benavides Cevallos Ignacio Bayardo

Ibarra-Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003902747		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Garrido López Johann Steven		
DIRECCIÓN:	Ibarra		
EMAIL:	Jsgarridol@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELF. MOVIL	0962971993

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1754703617		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Farinango Morales Jaime Oswaldo		
DIRECCIÓN:	Cayambe		
EMAIL:	Jofarinangom@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELF. MOVIL	0999112289

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis y selección de la batería HV para la conversión de vehículos de combustión interna a eléctricos en ciudades de altura.
AUTOR (ES):	Johann Steven Garrido López, Jaime Oswaldo Farinango Morales
FECHA: DD/MM/AAAA	20/03/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería Automotriz
ASESOR/ DIRECTOR:	MSc. Paul Hernández / MSc. Ignacio Benavides

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 20 días, del mes de Marzo de 2026

EL AUTOR:

Firma.....

Nombre: Johann Garrido

EL AUTOR:

Firma.....

Nombre: Jaime Farinango

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 20 de Marzo de 2026

MSc. Ignacio Benavides
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.

(f)
MSc. Ignacio Benavides
C.C.: 1002415949

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular “Análisis y selección de la batería HV para la conversión de vehículos de combustión interna a eléctricos en ciudades de altura” elaborado por Johann Steven Garrido López y Jaime Oswaldo Farinango Morales, previo a la obtención del título de INGENIERO AUTOMOTRÍZ, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):

MSc. Ignacio Benavides

C.C.:1002415949

(f):

MSc. Paul Hernández

C.C.:1002978060

DEDICATORIA

En mi calidad de autor y desde mi identidad personal, Johann Garrido, dedico este logro primordialmente a mi familia. A ellos les debo la curiosidad que me llevó a esta ingeniería y la perseverancia necesaria para finalizar mis estudios, han sido mi guía y mi razón más profunda para alcanzar esta meta.

Asimismo, extendiendo esta dedicatoria a mi crecimiento en el campo laboral y al círculo de profesionales de la ingeniería automotriz que me impulsó a culminar este trabajo de titulación, su ejemplo y dedicación constante me recordaron que este cierre académico es apenas el inicio de una vida dedicada al aprendizaje continuo.

DEDICATORIA

A mis padres, Jaime y Angelica, la razón de mi perseverancia. Gracias por creer en mí y darme la fuerza necesaria para culminar mis estudios.

A mis hermanas, Sandra y Viviana, mi apoyo incondicional y mi refugio durante todos estos años.

A mis sobrinos, Jezabel, Edrian, Luis, Mayumi y Zoe, la motivación más pura para seguir superándome y ser un buen ejemplo para ellos.

Todo este esfuerzo lleva su nombre.

— Jaime Farinango

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestra gratitud a la Universidad Técnica del Norte por el respaldo académico y el acceso a las herramientas que permitieron la ejecución de esta investigación. A nuestro director de tesis, MSc. Ignacio Benavides , y a nuestro asesor, MSc. Paul Hernández, les agradecemos su guía técnica y paciencia; así como al personal directivo y docente de la carrera de Ingeniería Automotriz por los conocimientos compartidos durante nuestra formación. Su colaboración conjunta fue fundamental para otorgar el rigor profesional a este proyecto.

RESUMEN EJECUTIVO

La investigación se fundamenta en la creciente tendencia de conversión de vehículos de combustión a eléctricos y la necesidad de optimizar sistemas de almacenamiento LiFePO_4 ante la falta de estudios específicos en ciudades de altura. El objetivo general es analizar el rendimiento y adaptabilidad de la batería LiFePO_4 seleccionada mediante pruebas de capacidades teóricas y reales. La metodología integra un modelado fisicomatemático en Rstudio para predicciones teóricas, el procesamiento de datos cinemáticos y georreferenciados mediante GPS para validación empírica, y simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar la gestión térmica. Los resultados revelan que la autonomía teórica disminuye drásticamente en pendientes del 3.73%, reduciéndose de 304 km a un rango de entre 71 y 65 km, mientras que las pruebas reales exponen una brecha de eficiencia significativa al reportar 137 km a baja velocidad. Además, el análisis térmico evidencia que la pérdida de densidad del aire en elevadas altitudes reduce la capacidad convectiva del sistema en un 29.87%, generando zonas de estancamiento de calor. Se concluye que el desempeño de la batería es altamente sensible a factores externos y que los modelos teóricos tienden a sobreestimar la autonomía al simplificar variables ambientales de altura. Por lo tanto, el diseño de refrigeración por aire es viable, pero requiere optimización geométrica para garantizar la estabilidad térmica en condiciones geográficas complejas.

Palabras clave: LiFePO_4 , conversión vehicular, autonomía, altitud, gestión térmica, Rstudio.

ABSTRACT

The research is based on the growing trend of converting internal combustion vehicles to electric and the need to optimize LiFePO_4 storage systems due to the lack of specific studies in high-altitude cities. The general objective is to analyze the performance and adaptability of the selected LiFePO_4 battery through tests of its theoretical and real capacities. The methodology integrates physical-mathematical modeling in RStudio for theoretical predictions, the processing of kinematic and georeferenced data via GPS for empirical validation, and computational fluid dynamics (CFD) simulations to evaluate thermal management. Results reveal that theoretical autonomy decreases drastically on 3.73% slopes, dropping from 304 km to a range between 71 and 65 km, while real-world tests expose a significant efficiency gap by reporting 137 km at low speeds. Furthermore, thermal analysis highlights that the loss of air density at high altitudes reduces the system's convective capacity by 29.87%, generating heat stagnation zones. It is concluded that battery performance is highly sensitive to external factors and that theoretical models tend to overestimate autonomy by simplifying environmental variables of altitude. Therefore, the air-cooling design is viable but requires geometric optimization to ensure thermal stability under complex geographical conditions.

Keywords: LiFePO_4 , vehicle conversion, autonomy, altitude, thermal management, RStudio.

LISTA DE SIGLAS

LA. Plomo Acido

Li-ion. Iones de Litio

HBESS. Sistemas Híbridos de Almacenamiento de Energía

EV. Vehículos Eléctricos

VRLA. Baterías de Plomo-Ácido Reguladas por Válvula

LFP. Fosfato de Hierro y Litio

SOC. Estado de Carga

LiFePO₄. Baterías de Fosfato de Hierro y Litio

NiMH. Níquel Hidruro Metálico

BTMS. Sistemas de Gestión Térmica

NMC. Níquel Manganeso Cobalto

NCA. Níquel Cobalto Aluminio

BMS. Gestión de Baterías

SOH. Estado de Salud

LMFP. Litio Manganeso Fosfato de Hierro

ICV. Vehículo de Combustión Interna

PCM. Espuma Metálica y Minicanales Contraflujo

TR. Fuga Térmica

MSOBC. Cargador de Batería Modular Integrado a Bordo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.

Contenido

CAPÍTULO I	17
1 INTRODUCCIÓN	17
1.1 Problema de investigación.	17
1.2 Justificación	17
Objetivos	19
Alcance	19
CAPÍTULO II	21
2 MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Tipos de baterías	21
2.2 Baterías LiFePO ₄	22
2.3 Criterios de selección de baterías en ciudades de altura	26
2.4 Análisis térmico y de rendimiento en baterías HV en condiciones de baja presión	29
2.5 Consideraciones de seguridad y durabilidad.....	31
2.6 Resistencias al Movimiento: La Suma de Fuerzas	33
2.7 Rstudio como procesador de datos	35
2.8 ANSYS fluent	36
CAPÍTULO III.....	37
3 MATERIALES Y MÉTODOS	37
Metodología para Comparar el Rendimiento Teórico vs. Real en Condiciones de Altura.....	37
3.1 Variables Para los Cálculos (Según la velocidad y pendiente):.....	37
3.2 Especificaciones de la batería LiFePO ₄ :	38
3.3 Modelado del Consumo Energético en Rstudio.....	38
3.3.1 MODELO PREDICTIVO (CÓDIGO BASE 1: SIMULADOR TEÓRICO).....	38
3.3.2 Potencia Requerida a 40Km/h	42
3.3.3 Potencia Requerida a 60km/h	43
3.3.4 Potencia Requerida a 80km/h	44
3.4 Análisis en Pendientes Locales	45
3.4.1 Potencia Requerida a 40km/h y 3.73% de pendiente promedio	45
3.4.2 Potencia Requerida a 60km/h y 3.73% de pendiente promedio	46
3.4.3 Potencia Requerida a 80km/h y 3.73% de pendiente promedio	48

3.5 Simulación y validación teórica comparando consumo en pendientes vs. Terreno plano en el trayecto de 20km Ibarra-Zuleta.....	49
3.5.1 Herramientas:.....	49
3.5.2 Definición de Parámetros de Estudio.....	49
3.5.3 Recopilación de Registro de Posición en Pruebas Empíricas en Altura.....	50
3.6 Variables Para los Cálculos (Según el GPS Logger):.....	51
3.6.1 MODELO EXPERIMENTAL (CÓDIGO BASE 2: ANALIZADOR GPS).....	51
3.6.2 Protocolo de Pruebas.....	54
3.6.3 Parámetros a Registrar	54
3.7 Análisis Comparativo.....	66
3.7.1 Procesamiento de Datos	66
3.7.2 Factores Críticos de Discrepancia.....	67
3.7.3 Presentación de Resultados.....	67
3. 8 Metodología para Diseñar una cámara de ventilación forzada por Aire para la Batería LiFePO ₄	68
3.8.1 Definición de Requerimientos Técnicos	68
3.8.2 Objetivo de la Simulación.....	68
3.9 Pre-Procesamiento y Discretización del Dominio	69
3.9.1 Tratamiento de la Geometría	69
3.9.2 Generación de la Malla (Meshing)	71
3.10 Configuración del Solver (Setup)	72
3.10.1 Modelos Físicos y Gobernantes	72
3.10.2 Modelo de Turbulencia	73
3.11 Condiciones de Contorno (Boundary Conditions).....	74
3.12 Solución y Control Temporal.....	75
3.13 Post-Procesamiento y Visualización de Resultados	75
CAPITULO IV.....	82
4.1 RESULTADOS Y DISCUSION	82
CAPITULO V.....	84
5.1 Conclusiones.....	84
5.2 Recomendaciones	85
ANEXOS	87
Anexo 1: Código 1 (Teorico).....	87
Anexo 2: Código 2 (Gps).....	92
REFERENCIAS.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Pruebas experimentales D2 con consumo de potencia auxiliar.....	27
Tabla 2: Variables para los cálculos en Rstudio	37
Tabla 3: Resultado de los cálculos a 40km/h.....	42
Tabla 4: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	42
Tabla 5: Resultado de los cálculos a 60km/h.....	43
Tabla 6: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	43
Tabla 7. Resultado de los cálculos a 80km/h.....	44
Tabla 8: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	44
Tabla 9: Resultado de los cálculos a 40km/h y 3.73% de pendiente promedio.....	45
Tabla 10: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	45
Tabla 11: Resultado de los cálculos a 60km/h y 3.73% de pendiente promedio.....	46
Tabla 12: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	47
Tabla 13: Resultado de los cálculos a 80km/h y 3.73% de pendiente promedio.....	48
Tabla 14: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	48
Tabla 15: Comparación de Consumo (kWh) con pendiente y sin pendiente.....	49
Tabla 16: Comparación de Autonomía (km) con pendiente y sin pendiente.....	49
Tabla 17: Comparación de Consumo Relativo (kWh/100km) con pendiente y sin pendiente.	49
Tabla 18: Comparación de Velocidad Maxima (km/h) con pendiente y sin pendiente.....	49
Tabla 19: Variables para los cálculos en Rstudio	51
Tabla 20: Resultado de la validación de la ruta a 40km/h	54
Tabla 21: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	55
Tabla 22: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	55
Tabla 23: Resultado de la validación de la ruta a 60km/h	56
Tabla 24: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	56
Tabla 25: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	57
Tabla 26: Resultado de la validación de la ruta a 80km/h	58
Tabla 27: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	58
Tabla 28: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	59
Tabla 29: Resultado de la validación de la ruta a 40km/h.	60
Tabla 30: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	60
Tabla 31: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	61
Tabla 32: Resultado de la validación de la ruta a 60km/h.	62
Tabla 33: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	62
Tabla 34: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	63
Tabla 35: Resultado de la validación de la ruta a 80km/h.	64
Tabla 36: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	64
Tabla 37: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)	65
Tabla 38: Comparación de Resultados de Autonomía de simulación y validación de la ruta.....	67
Tabla 39: Comparación de Resultados de Consumo Relativo de simulación y validación de la ruta.	68
Tabla 40 Tabla comparación de resultados a Nivel del mar vs Ibarra vs Zuleta	82

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Area efectiva frontal del vehículo.....	38
Ilustración 2. Coeficientes Aerodinámicos por tipo de vehículo.....	39
Ilustración 3. Coeficientes de rodadura por tipo de camino	39
Ilustración 4. Simulación a 40km/h y 0% de pendiente.....	42
Ilustración 5. Simulación a 60km/h y 0% de pendiente.....	43
Ilustración 6. Simulación a 80km/h y 0% de pendiente.....	44
Ilustración 7. Simulación a 40km/h y 3.73% de pendiente.....	46
Ilustración 8. Simulación a 60km/h y 3.73% de pendiente.....	47
Ilustración 9. Simulación a 80km/h y 3.73% de pendiente.....	48
Ilustración 10. GPS Logger TSI GL-770 (velocidad y altitud).	50
Ilustración 11. Ruta en Yahuarcocha	55
Ilustración 12. Validación de la ruta a 40km/h y 0% de pendiente	56
Ilustración 13. Ruta en Yahuarcocha	57
Ilustración 14. Validación de la ruta a 60km/h y 0% de pendiente	58
Ilustración 15. Ruta Redondel Cajas-Otavalo.....	59
Ilustración 16. Validación de la ruta a 80km/h y 0% de pendiente	60
Ilustración 17. Ruta Ibarra-Zuleta.....	61
Ilustración 18. Validación de la ruta a 40km/h y 3.73% de pendiente	62
Ilustración 19. Ruta Ibarra-Otavalo	63
Ilustración 20. Validación de la ruta a 60km/h y 3.73% de pendiente	64
Ilustración 21. Otavalo-San Joaquin	65
Ilustración 22. Validación de la ruta a 80km/h y 3.73% de pendiente	66
Ilustración 23. Modelado de la configuración del paquete de baterías	69
Ilustración 24. Modelado de la cámara de refrigeración del paquete	70
Ilustración 25. Delimitación del volumen de control del fluido (Aire)	70
Ilustración 26. Mallado de la geometría	71
Ilustración 27. Definición de las condiciones de frontera de la proyección	72
Ilustración 28. Modelo Físico para la inclusión de variables.....	73
Ilustración 29. Parámetros Variables para la simulación.....	74
Ilustración 30. Renderizado Volumétrico, Escenario a Nivel del mar @0msnm	76
Ilustración 31. Líneas de corriente del fluido (Aire), Escenario a Nivel del mar @0msnm.....	77
Ilustración 32. Renderizado Volumétrico Escenario Ibarra@2200msnm	78
Ilustración 33. Renderizado Volumétrico Escenario Ibarra@2200msnm	79
Ilustración 34. Renderizado Volumétrico Escenario Zuleta@2800msnm.....	80
Ilustración 35. Renderizado Volumétrico Escenario Zuleta@2800msnm.....	81

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1: Resistencia aerodinámica.....	33
Ecuación 2: Resistencia a la rodadura	34
Ecuación 3: Resistencia por pendiente	34
Ecuación 4: Potencia energética requerida	34
Ecuación 5: Consumo Relativo.....	35
Ecuación 6: Autonomía.....	35

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de investigación.

Actualmente existe una tendencia en la conversión de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos, por lo cual existe una presión significativa en la selección y optimización de sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías HV (High Voltage) para la conversión de vehículos. Esta situación se evidencia por la cantidad de vehículos de todo el parque automotor ya que en su mayoría tienen de 15 a 20 años de antigüedad, por lo tanto, la tendencia de conversión se vuelve una solución al dar una nueva vida útil a estos vehículos.

Debido al poco estudio que existe sobre el comportamiento de las baterías en ciudades de altura no se sabe con certeza que características que se ven afectadas en relación con su funcionamiento en entornos ya estudiados, esto nos trae la problemática en el análisis de baterías puesto que para la selección debe existir una igualación de costos y beneficios dependiendo del tipo de geografía y las condiciones de altitud en donde va a estar operativa.

Los altos costos asociados con las tecnologías de baterías más eficientes y la falta de estudios específicos sobre el comportamiento térmico de nuevas tecnologías de baterías en ciudades de altura provocan una reducción significativa de la vida útil de las baterías en condiciones de temperatura elevada y por consiguiente el aumento en los costos operativos debido a la necesidad de reemplazo prematuro.

1.2 Justificación

Objetivo 8 – Plan del nuevo Ecuador-Crecimiento económico sostenible:

La conversión de vehículos a eléctricos promueve un crecimiento económico sostenible al adoptar tecnologías limpias en el sector del transporte. Al reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover la electromovilidad, se crea un entorno que favorece el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas, generando empleo y estimulando la economía de manera respetuosa con el medio ambiente.

ODS 7 - Energía asequible y no contaminante:

El proyecto apoya directamente el ODS 7 al fomentar el uso de energía limpia y renovable en el transporte, lo que ayuda a reducir la huella de carbono y la contaminación. Esto contribuye a un sistema energético más sostenible y a una disminución significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero.

ODS 11 - Ciudades y comunidades sostenibles:

La conversión de vehículos eléctricos reduce la contaminación del aire y mejora la calidad del entorno urbano, lo que contribuye a crear ciudades más sostenibles y saludables. Esto tiene un impacto directo en el bienestar de los ciudadanos al mejorar su calidad de vida y reducir los efectos negativos del transporte convencional en el medio ambiente.

ODS 13 - Acción por el clima:

La sustitución de vehículos de combustión por eléctricos contribuye a la lucha contra el cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Este esfuerzo se alinea con los compromisos globales para mitigar el calentamiento global y limitar el impacto del transporte en el medio ambiente.

El enfoque en la descarbonización del transporte está impulsando el interés global por la electrificación como un cambio estratégico hacia un futuro más sostenible. Si bien los motores de combustión interna han dominado, su baja eficiencia promedio del 30% y sus altas emisiones de carbono resaltan la necesidad de alternativas más limpias. Las máquinas eléctricas, con una eficiencia superior al 90% representan un avance significativo [1].

Uno de los mayores retos técnicos es la selección de la batería adecuada, que representa un costo significativo en la conversión. Las baterías de ion-litio son las más utilizadas por su alta densidad energética y ciclo de vida, pero su alto costo sigue siendo un desafío. Además, la resistencia térmica y la capacidad de la batería para soportar diferentes condiciones de temperatura son factores clave para garantizar su durabilidad y rendimiento [2].

La capacidad de la batería determina la autonomía del vehículo convertido, mientras que el voltaje influye directamente en el rendimiento del motor. Sin embargo, aumentar la capacidad y el voltaje implica un aumento en los costos, lo que hace necesario encontrar un equilibrio entre el precio, la autonomía y el rendimiento [3].

El principal desafío es lograr un equilibrio entre estos tres factores. A medida que se busca mejorar el rendimiento y la autonomía mediante baterías más grandes y potentes, los costos de conversión aumentan, lo que podría hacer que el proyecto no sea viable económicamente sin una estrategia de optimización adecuada [4].

La conversión de vehículos de combustión interna a eléctricos está justificada tanto técnica como estratégicamente. Aunque enfrenta desafíos relacionados con la selección de la batería y el costo, su alineación con los ODS demuestra su relevancia para el desarrollo económico, social y ambiental [5].

Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Analizar el rendimiento y adaptabilidad de la batería LiFePO_4 seleccionada para la conversión del vehículo convencional a eléctrico, mediante pruebas de sus capacidades teóricas y reales, considerando los factores que influyen en su funcionamiento.

1.3.2 Objetivos Específicos

Evaluar las características técnicas teóricas de la batería de LiFePO_4 para la conversión, mediante el análisis del comportamiento teórico del vehículo convertido a eléctrico, limitando el estudio a la autonomía a una velocidad de 40, 60 y 80 km/h, velocidad máxima alcanzable y consumo energético en pendientes específicas locales.

Comparar el rendimiento teórico versus real del vehículo en condiciones de altura, en relación con las limitaciones del estudio teórico.

Diseñar un sistema de refrigeración y/o ventilación para la batería LiFePO_4 , limitado a: ductos de captación frontal y sensores básicos de temperatura, tomando en consideración la temperatura óptima de trabajo de la batería, excluyendo sistemas de refrigeración líquida.

Alcance

El presente proyecto tiene como alcance principal la conversión de un Chevrolet Corsa 1.4L convencional a un vehículo eléctrico mediante la implementación de un kit de conversión que incluye una batería LiFePO_4 . La conversión será limitada a la evaluación de aspectos técnicos relacionados con el rendimiento de la batería y su comportamiento en condiciones específicas de operación.

Se realizará un análisis teórico y práctico centrado en la autonomía del vehículo a velocidades constantes de 40, 60 y 80 km/h, así como su capacidad de afrontar pendientes locales específicas. Las pruebas se limitarán a escenarios controlados, considerando factores como la altura geográfica y el consumo energético bajo condiciones determinadas.

El sistema de refrigeración de la batería se diseñará exclusivamente mediante un sistema pasivo basado en ductos de captación de aire y sensores básicos de temperatura. No se incluirán sistemas avanzados como refrigeración líquida ni controladores de alta complejidad. Además, el alcance no contempla estudios sobre impacto ambiental, homologaciones legales, ni costos detallados de implementación más allá del sistema propuesto.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Tipos de baterías

Las baterías para vehículos eléctricos se clasifican principalmente en dos tipos fundamentales: las baterías de Plomo-Ácido (LA) y las baterías de Iones de Litio (Li-ion). Las baterías LA, siendo las más comunes en la industria automotriz, destacan por su menor costo y capacidad de reciclaje completo, aunque presentan desventajas significativas como una alta tasa de degradación y la necesidad de reemplazo cada 4-5 años. Por otro lado, las baterías de Li-ion, aunque son aproximadamente 1.5 veces más costosas, ofrecen ventajas superiores como una menor tasa de degradación y mayor vida útil. La degradación de las baterías se produce por dos mecanismos principales: la degradación por ciclos, que ocurre debido a los procesos de carga y descarga, y la degradación calendario, que se produce por el paso del tiempo y está influenciada por factores como el estado de carga y la temperatura [1].

Una innovación significativa en el campo de las baterías para vehículos eléctricos es el desarrollo de Sistemas Híbridos de Almacenamiento de Energía (HBESS) y la reutilización de baterías de Li-ion como baterías de segunda vida. Los sistemas HBESS, que combinan diferentes tecnologías de baterías, han demostrado reducir los costos operativos hasta en un 21% comparado con sistemas únicamente de Li-ion, además de mejorar la eficiencia general y prolongar la vida útil de las baterías. Las baterías de segunda vida, que son aquellas que han completado su ciclo en vehículos eléctricos, representan una solución sostenible al poder ser utilizadas en aplicaciones estacionarias, contribuyendo así a la economía circular y reduciendo el impacto ambiental. Para optimizar el funcionamiento de estas baterías, es crucial considerar aspectos como la gestión térmica, sistemas de monitoreo del estado de carga y estrategias de carga y descarga adecuadas [2].

Las baterías utilizadas en Vehículos Eléctricos (EV) presentan características y propiedades clave que las diferencian en función de su composición química. Por un lado, las baterías de Plomo-Ácido Reguladas por Válvula (VRLA) destacan por su bajo costo inicial, alta potencia específica y capacidad de carga rápida. Además, requieren poco mantenimiento y son capaces de soportar variaciones de carga a corto plazo. Sin embargo, su alta resistencia interna limita su desempeño ante cargas prolongadas, resultando en autodescarga y caídas de voltaje rápidas. Por otro lado, las Baterías de Fosfato de Hierro y Litio (LFP) sobresalen por su alta densidad energética, larga vida útil, baja resistencia y mayor seguridad térmica. Aunque son más costosas inicialmente, su resistencia a efectos de memoria y descarga lenta las hacen ideales como fuente primaria o secundaria de energía en vehículos eléctricos [3].

El uso de sistemas híbridos o de baterías duales, como el propuesto con VRLA y LFP, busca maximizar las ventajas de cada tipo mientras se mitigan sus limitaciones. En este enfoque, las VRLA pueden gestionar cargas iniciales altas y fluctuaciones, mientras que las LFP manejan la carga sostenida y garantizan mayor autonomía. Este tipo de sistemas, especialmente mediante técnicas de conmutación suave, permite transiciones fluidas y una distribución eficiente de energía en función de la temperatura, carga y voltaje de las baterías. Además, esta combinación no solo mejora la eficiencia y la vida útil del sistema, sino que también reduce los costos operativos al aprovechar las fortalezas complementarias de ambas tecnologías [4].

También en el ámbito de los EV, las baterías recargables más utilizadas son las de Níquel Hidruro Metálico (NiMH) y las de Li-ion, debido a sus capacidades superiores en términos de densidad energética y rendimiento. Las baterías NiMH ofrecen un equilibrio entre costo moderado y durabilidad, alcanzando una vida útil de más de 10 años cuando se operan dentro de un rango de Estado de Carga (SOC) del 30-70%. Estas baterías son seguras, fáciles de reciclar y no requieren sistemas complejos de gestión, pero presentan mayor autodescarga y pérdidas constantes durante su uso. Por otro lado, las baterías Li-ion, aunque más costosas y con desafíos en reciclaje y gestión térmica, destacan por su alta densidad energética, capacidad de carga rápida y eficiencia en descargas prolongadas, lo que las hace ideales para aplicaciones de alta demanda en vehículos eléctricos [4].

En un análisis comparativo, las baterías Li-ion demostraron una mayor capacidad de descarga y mejor rendimiento bajo condiciones de alta corriente en comparación con las NiMH. Sin embargo, estas últimas son más adecuadas para aplicaciones que priorizan la estabilidad y la sostenibilidad, como los sistemas híbridos. A pesar de las diferencias, ambas tecnologías muestran tasas de descarga similares en escenarios controlados, lo que sugiere que la elección del tipo de batería debe depender de las necesidades específicas del vehículo y el entorno operativo. Integrar tecnologías como el frenado regenerativo puede mejorar aún más la eficiencia energética de ambos tipos de baterías, destacando la importancia de optimizar no solo el diseño de las baterías, sino también su integración en sistemas eléctricos avanzados [5].

2.2 Baterías LiFePO₄

Las baterías de fosfato de hierro y litio (LiFePO₄) representan una tecnología fundamental para el desarrollo de EV, ofreciendo soluciones innovadoras en almacenamiento energético[6]. Estas baterías se caracterizan por su capacidad para proporcionar un rendimiento estable, con capacidades cercanas a 106,3 Ah y una cantidad de energía de 8205 Wh, demostrando una alta eficiencia y confiabilidad en condiciones operativas variables[7]. La implementación de Sistemas de Gestión Térmica (BTMS) se ha convertido en un aspecto crítico para el desarrollo de baterías de alto rendimiento, siendo fundamental para extender la vida útil de los dispositivos de almacenamiento energético [8].

La estimación del SOC mediante algoritmos avanzados, permite una evaluación precisa del rendimiento de las baterías LiFePO₄ bajo diferentes condiciones de temperatura[9]. El futuro de los vehículos eléctricos dependerá significativamente del desarrollo de tecnologías de baterías más eficientes, donde la simulación y la inteligencia artificial jugarán un papel fundamental, sugiriendo que la implementación de controladores inteligentes puede mejorar la vida útil de las baterías hasta en un 20-25%, optimizando el consumo energético y extendiendo la autonomía de los vehículos eléctricos [10].

La simulación mediante este tipo de algoritmos es esencial para cuantificar el rendimiento energético de las baterías en vehículos eléctricos. La energía consumida permite calcular cuánta energía requiere el vehículo para operar a velocidades específicas, lo que es crucial para estimar la autonomía. Por otro lado, la energía regenerada evalúa la recuperación de energía durante el frenado regenerativo, especialmente útil en pendientes o terrenos con altos desniveles. Estas fórmulas no solo ayudan a predecir el comportamiento del vehículo en condiciones ideales, sino que también permiten ajustar los cálculos para escenarios reales, como la conducción en altura, y

a calcular la energía total donde factores como la densidad del aire y el coeficiente de arrastre influyen en la resistencia aerodinámica [10].

Las baterías LiFePO_4 representan una tecnología fundamental en el desarrollo de sistemas de almacenamiento energético modernos. Su estructura electroquímica destaca por su estabilidad y alta eficiencia, lo que las convierte en una opción preferida para aplicaciones críticas. Un aspecto clave de su funcionamiento es la influencia del contenido del aditivo conductor en la impedancia del electrodo, un factor que afecta directamente su rendimiento [11]. Los estudios de impedancia electroquímica han demostrado que cuando el contenido del aditivo conductor es inferior al 30% en peso, el comportamiento electroquímico muestra una transición notable. En este caso, el diagrama de Nyquist exhibe un semicírculo característico en la región de alta frecuencia y una línea inclinada en la región de baja frecuencia. Estos hallazgos subrayan la importancia de optimizar los componentes internos de estas baterías para garantizar su máximo desempeño en diversas aplicaciones [12].

La optimización del rendimiento térmico de las baterías LiFePO_4 ha llevado al desarrollo de estrategias innovadoras para garantizar su seguridad y durabilidad. Una de las estrategias más prometedoras incluye el uso de recubrimientos aislantes térmicos avanzados. Estos recubrimientos actúan como una barrera protectora, reduciendo la transferencia de calor hacia y desde las celdas. Adicionalmente, la incorporación de materiales de cambio de fase en los sistemas de manejo térmico ha mostrado una notable reducción de las temperaturas pico en hasta un 23.18%. Este control térmico es especialmente crucial en aplicaciones de alta demanda energética, como vehículos eléctricos e instalaciones de almacenamiento estacionario. La gestión eficiente de la temperatura no solo mejora la seguridad, sino que también extiende significativamente la vida útil de las celdas, lo que a su vez contribuye a reducir los costos operativos a largo plazo [13].

Un avance significativo en el desarrollo de baterías LiFePO_4 ha sido la síntesis de compuestos mediante métodos innovadores de recubrimiento. Este proceso implica la aplicación de una capa uniforme de carbono sobre las partículas activas de LiFePO_4 , un procedimiento que mejora significativamente las propiedades electroquímicas del material. Este recubrimiento contribuye a una conductividad eléctrica superior, lo que facilita un transporte más eficiente de electrones durante los ciclos de carga y descarga. Además, mejora la reversibilidad en los procesos de intercalación de iones de litio, optimizando el almacenamiento de energía [14]. Este tipo de avances no solo amplía las capacidades de las baterías, sino que también abre nuevas posibilidades para su uso en aplicaciones donde la estabilidad y la eficiencia son esenciales.

El comportamiento de carga y descarga de las baterías LiFePO_4 presenta características únicas que las distinguen de otras tecnologías de Li-ion. Una de sus ventajas más notables es su perfil de voltaje altamente estable durante la descarga, lo que garantiza una entrega de energía constante y confiable. Este atributo es particularmente valioso en aplicaciones que requieren un suministro continuo de energía, como los sistemas de respaldo y las redes de energía renovable. Además, estas baterías cuentan con una eficiencia coulombica superior al 99%, lo que minimiza las pérdidas de energía durante los ciclos de carga y descarga [15]. Su rendimiento excepcional las posiciona como

una solución eficiente y confiable para una amplia gama de aplicaciones, desde vehículos eléctricos hasta sistemas estacionarios de alta capacidad.

En comparación con otras químicas de Li-ion, las baterías LiFePO_4 destacan por su excepcional estabilidad térmica y su enfoque en la seguridad. A diferencia de las baterías de Níquel Manganeso Cobalto (NMC) y Níquel Cobalto Aluminio (NCA), que priorizan la densidad energética, las LiFePO_4 ofrecen una vida útil más prolongada y un menor riesgo de fuga térmica. Estas propiedades las hacen especialmente valiosas en aplicaciones donde la seguridad es primordial, como en sistemas de almacenamiento estacionario y vehículos eléctricos. Aunque las NMC y NCA son populares en dispositivos que requieren mayor densidad energética, las LiFePO_4 compensan esta limitación con una mayor durabilidad. Este equilibrio entre estabilidad y rendimiento las convierte en una opción confiable, especialmente para usuarios y sectores que buscan minimizar riesgos mientras maximizan la sostenibilidad y la eficiencia [16].

La implementación de baterías LiFePO_4 en vehículos eléctricos ha demostrado que los sistemas de gestión térmica en estas aplicaciones han evolucionado significativamente para garantizar temperaturas óptimas de operación, evitando el sobrecalentamiento y mejorando tanto el rendimiento como la vida útil de las celdas. Estas mejoras no solo aumentan la autonomía de los vehículos, sino que también contribuyen a reducir los costos de mantenimiento. En un contexto donde la electrificación del transporte es una prioridad global, las baterías LiFePO_4 representan una opción tecnológica sostenible y rentable [17].

Los avances en los procesos de fabricación de baterías LiFePO_4 han permitido optimizar tanto los costos como la calidad del producto final. La implementación de nuevos métodos de síntesis, como la técnica hidrotermal y el control preciso de los parámetros de producción, ha dado lugar a celdas con mayor uniformidad y rendimiento mejorado. Estas innovaciones han reducido significativamente las variaciones en la calidad del material activo, asegurando un desempeño más consistente en aplicaciones prácticas. Además, la reducción en los costos de producción ha ampliado la accesibilidad de estas baterías para una variedad de sectores, desde la automoción hasta el almacenamiento estacionario de energía. Este enfoque en la eficiencia de fabricación es clave para impulsar la adopción masiva de tecnologías basadas en LiFePO_4 [18].

El dopaje con vanadio ha emergido como una técnica prometedora para mejorar la conductividad eléctrica y la cinética del electrodo en baterías LiFePO_4 . Los estudios teóricos, basados en cálculos de primeros principios, han confirmado que esta modificación permite una mayor capacidad específica y una mayor estabilidad durante los ciclos electroquímicos [19]. Este enfoque implica la introducción controlada de átomos de vanadio en la estructura cristalina del material activo, lo que mejora la movilidad de los iones de litio y reduce la resistencia interna. Estos avances no solo mejoran el rendimiento general de la batería, sino que también contribuyen a extender su vida útil, haciéndolas aún más competitivas frente a otras tecnologías de almacenamiento energético.

La gestión térmica es un aspecto crítico para garantizar el rendimiento y la seguridad de las baterías LiFePO_4 , especialmente en aplicaciones de alta demanda energética. Las investigaciones recientes se han centrado en el desarrollo de sistemas integrados que combinan estrategias activas y pasivas de control térmico. Estas estrategias incluyen el uso de disipadores de calor avanzados,

refrigeración líquida y materiales de cambio de fase [20]. Además, se han implementado sensores térmicos inteligentes que permiten un monitoreo en tiempo real de las condiciones de operación, facilitando ajustes automáticos para prevenir el sobrecalentamiento. Este enfoque integrado mejora significativamente la eficiencia operativa de las baterías y garantiza un funcionamiento más seguro y confiable, incluso en entornos extremos.

La sostenibilidad ambiental de las baterías LiFePO_4 se ha convertido en un tema de gran relevancia debido a su bajo impacto ecológico. A diferencia de otras químicas de Li-ion, estas baterías no dependen en gran medida de materiales críticos como el cobalto, cuya extracción plantea problemas éticos y ambientales [21]. Además, su diseño facilita un proceso de reciclaje más eficiente, lo que reduce los residuos y promueve una economía circular. Estas características las posicionan favorablemente como una solución para aplicaciones sostenibles, alineándose con los objetivos globales de transición energética. En un contexto donde la reducción de la huella ambiental es una prioridad, las baterías LiFePO_4 ofrecen un equilibrio ideal entre rendimiento, seguridad y sostenibilidad.

Las aplicaciones industriales y de almacenamiento estacionario han demostrado el enorme potencial de las baterías LiFePO_4 en escenarios de alta demanda energética. Gracias a su capacidad para mantener un rendimiento estable durante miles de ciclos, estas baterías se han consolidado como una opción ideal para sistemas de respaldo y gestión de energía renovable [22]. En aplicaciones industriales, su durabilidad y alta eficiencia las hacen aptas para operaciones críticas donde la continuidad energética es esencial. En el ámbito del almacenamiento estacionario, las LiFePO_4 han sido integradas con éxito en sistemas que optimizan la generación intermitente de fuentes renovables como la solar y la eólica. Su capacidad de operar bajo condiciones adversas, combinada con su excepcional estabilidad térmica, las convierte en una herramienta indispensable para la transición energética global.

Los sistemas de monitoreo y Gestión de Baterías (BMS), han evolucionado significativamente en los últimos años, mejorando la seguridad y eficiencia de las baterías LiFePO_4 . Estos sistemas emplean algoritmos avanzados para estimar con precisión el SOC y el Estado de Salud (SOH) de las celdas, lo que permite una operación más confiable [23]. Además, los BMS modernos incluyen funciones de protección contra sobrecargas, descargas excesivas y fluctuaciones térmicas, asegurando una mayor longevidad de las baterías. Estas capacidades no solo optimizan el rendimiento de las aplicaciones donde se utilizan, sino que también reducen los riesgos asociados con el mal funcionamiento de las celdas. En el futuro, los avances en inteligencia artificial y aprendizaje automático prometen llevar los sistemas de gestión de baterías a un nivel aún más sofisticado.

El desarrollo futuro de las baterías LiFePO_4 se centra en la integración de materiales avanzados y técnicas de fabricación más eficientes para mejorar su rendimiento y reducir los costos. Investigaciones recientes han explorado modificaciones estructurales, como el uso de materiales dopantes y compuestos híbridos, para aumentar la densidad energética sin comprometer la seguridad [24]. Además, se están desarrollando técnicas innovadoras de fabricación, como la impresión 3D de electrodos, que prometen reducir los costos de producción al tiempo que

aumentan la precisión y la uniformidad de las celdas. Estas mejoras no solo consolidarán el papel de las LiFePO_4 en el mercado energético actual, sino que también las posicionarán como una tecnología clave en el almacenamiento de energía del futuro.

La creciente demanda de almacenamiento de energía sostenible ha impulsado la investigación en nuevas variantes de baterías basadas en la química LiFePO_4 . Un ejemplo destacado es el desarrollo de baterías LMFP (Litio Manganese Fosfato de Hierro), que combinan la estabilidad y seguridad de las LiFePO_4 con una mayor densidad energética gracias al manganeso. Estas baterías prometen extender aún más el alcance de aplicaciones, especialmente en sectores como la automoción y el almacenamiento a gran escala. Además, las investigaciones actuales sugieren que las baterías LMFP podrían ofrecer una relación costo-beneficio superior, haciendo posible su adopción masiva en mercados emergentes. A medida que estas variantes avanzan hacia la comercialización, representan un paso importante hacia un futuro energético más sostenible y eficiente [25]

2.3 Criterios de selección de baterías en ciudades de altura

Los resultados de una investigación sobre el sistema de BTMS con refrigeración por aire para 15 celdas de batería 21700 NCM revelan que las aletas espirales mejoran significativamente la eficiencia termodinámica, reduciendo la temperatura promedio del paquete de baterías en un 21.31%, aunque con un aumento del 166% en la caída de presión. El estudio también demuestra que tanto la temperatura máxima disminuye gradualmente al aumentar el número de bucles de aletas, logrando una reducción de 12.4°C con 1-4 bucles, mientras que los flujos de múltiple circulación, mejoran sustancialmente el rendimiento térmico [26].

Para evaluar y optimizar el rendimiento térmico de las baterías en EVs. La transferencia de calor permite cuantificar la eficiencia de disipación térmica, crucial para mantener la temperatura de la batería dentro de un rango seguro ($25\text{-}50^\circ\text{C}$), además el número de Reynolds es esencial para analizar el flujo de aire y su impacto en la refrigeración, especialmente en condiciones de altura donde la densidad del aire varía. Además, la caída de presión ayuda a diseñar sistemas de ventilación eficientes, minimizando el consumo de energía. Finalmente, la no uniformidad de temperatura es clave para garantizar una distribución térmica uniforme, evitando puntos calientes que puedan degradar la batería [26].

Un estudio sobre sistemas de gestión térmica propone una estrategia de redistribución energética que, utilizando un modelo de sistema diésel-eléctrico híbrido y el método NCA para analizar los índices de capacidad de enfriamiento, demuestra mejoras significativas en el estado térmico del sistema bajo condiciones desafiantes: en situaciones de alta altitud mejora el estado térmico con un aumento del 7.43% en el consumo energético total, mientras que en condiciones de deterioro del sistema de enfriamiento de la batería, evita el deterioro continuo del rendimiento con un incremento del 4.15% en el consumo energético, demostrando que la estrategia puede equilibrar efectivamente el estado térmico y la economía del vehículo mientras asegura su fiabilidad en un entorno de tiempo real [27].

Al sur de Italia se realizó un estudio el cual analizó el consumo energético de vehículos eléctricos a través de pruebas experimentales y modelado, utilizando una ruta entre Trepuzzi y Lecce. Los

resultados muestran una variación significativa en el consumo de energía bajo diferentes condiciones de consumo de energía auxiliar clasificadas como pobre, moderada y alta y estados de carga de la batería. El modelo EV desarrollado logró procesar los datos experimentales y comparar dos estilos de conducción diferentes (D1 y D2), donde D1 mostró condiciones más irregulares con un perfil de velocidad más lento, mientras que D2 como se puede ver en la Tabla 1, caracterizado por un perfil de velocidad más rápido, presentó una distribución de datos más regular. El estudio también reveló que el consumo de energía auxiliar junto con la temperatura externa fueron factores críticos para D1, mientras que la velocidad de viaje fue el factor dominante para D2, sugiriendo la necesidad de un equipo dedicado para monitorear con mayor precisión las variables físicas relacionadas con la descarga de la batería y el consumo de energía auxiliar [28].

Tabla 1: Pruebas experimentales D2 con consumo de potencia auxiliar

Run	Ambiente T(°C)	Condición	Inicio SoC	Experimental SoC	Modelo SoC
23	27	Pobre	86	17	17.91
18	21	Pobre	84	18	19.82
1	17	Pobre	42	19	18.64
7	18	Pobre	74	20	20.42
20	24	Pobre	93	20	20.85
25	24	Pobre	45	21	21.17
8	19	Pobre	76	21	21.49
24	22	Pobre	74	21	21.41
13	19	Pobre	62	22	21.92
21	22	Pobre	72	22	22.56
10	16	Pobre	79.5	22.5	22.19
19	20	Moderada	100	20	19.55
6	18	Moderada	68	21	21.35
14	17	Moderada	85	21	20.82
15	17	Moderada	64	23	23.03
3	15	Alta	100	19.5	19.3
22	19	Alta	98	19.5	19.25
9	16	Alta	100	20.5	20.11
17	22	Alta	96	21	20.98
2	10	Alta	69	22	22.08
5	17	Alta	59	22	22.34
11	15	Alta	86	22	21.82
4	14	Alta	83	23	23.61
16	17	Alta	82	23.5	23.71
12	14	Alta	58	26	24.64

Tomado de: Z. Wang [28].

Las características térmicas de 18,650 baterías de Li-ion en diferentes presiones y temperaturas ambientales (-15°C, 0°C, y 25°C), identificando cinco etapas principales en el proceso de fuga térmica: ventilación, liberación de gas, explosión, combustión y abatimiento a baja temperatura y

presión. Los resultados muestran que las celdas con 100% de SOC presentan una temperatura de venteo de seguridad de $135.8 \pm 2.7^{\circ}\text{C}$, relativamente insensible a la temperatura y presión ambiental. La disminución de la presión atenúa la intensidad de la fuga térmica al reducir la concentración de oxígeno necesaria para las reacciones exotérmicas, mientras que las temperaturas ambientales más bajas retrasan el proceso de fuga térmica debido a reacciones exotérmicas más débiles y una acumulación de calor más lenta, lo cual fue confirmado mediante análisis SEM/EDS que mostró una disminución significativa de los elementos F y P después de la fuga térmica [29].

La gestión energética en sistemas híbridos para vehículos aéreos no tripulados que combinan celdas solares, baterías y super capacitores, se distingue de investigaciones previas al implementar una estrategia de gestión energética activa para el sistema solar sin necesidad de seguimiento del punto de máxima potencia, permitiendo almacenar el exceso de energía solar como energía de altitud para su uso cuando la batería se agota. A diferencia de estudios anteriores que se centraban en sistemas de celdas de combustible o usaban energía solar solo como fuente auxiliar, esta investigación propone una estrategia de control de máquina de estados, sugiriendo para futuros estudios la implementación de un control de gestión energética meta-heurístico mediante métodos de optimización, así como la validación experimental de los resultados de simulación en condiciones reales de vuelo [30].

La metodología de simulación numérica de alta fidelidad y optimización MODO para analizar y optimizar sistemas de BTMS en paquetes de baterías de Li-ion para vehículos eléctricos es crucial para la simulación de mecanismos complejos de transferencia de calor electroquímica, la metodología predice con precisión la generación de calor y los perfiles de voltaje a lo largo del tiempo. Los resultados muestran que los diseños optimizados mejoran la eficiencia térmica, reducen las caídas de presión y aumentan la seguridad de las baterías. Investigaciones futuras podrían aplicar esta metodología a otros BTMS, como sistemas de refrigeración líquida o de cambio de fase, y vincularlos con evaluaciones del ciclo de vida para considerar objetivos de sostenibilidad [31].

El impacto de la presión, la temperatura y la relación de aspecto en el proceso de humectación durante el ensamblaje de celdas de batería muestra que la presión diferencial influye significativamente en la eficiencia del humedecimiento; mayores diferenciales de presión fortalecen las fuerzas capilares y reducen los tiempos de humectación. Además, temperaturas más altas aceleran las tasas de humectación, destacando que a 60°C el proceso es notablemente más eficiente.

La relación de aspecto de las celdas también juega un papel clave, ya que celdas más largas y estrechas disminuyen los tiempos de humectación al acortar la distancia para el flujo capilar. Aunque los resultados coinciden con las predicciones teóricas, futuros estudios deberían examinar la compresión del ESC bajo diferentes presiones y ampliar las investigaciones a geometrías de celdas más grandes. Integrar técnicas de imagen como rayos X con EIS en tiempo real podría refinar los modelos de proceso y mejorar la precisión en la fabricación, contribuyendo al desarrollo de tecnologías avanzadas para baterías [32].

La comparación de la eficiencia energética entre vehículos de combustión interna (ICVs) y el Nissan Leaf destaca la superioridad de los vehículos eléctricos en términos de eficiencia y costos

operativos. Los ICVs consumen entre 56.96 y 61.86 kWh por cada 100 km, perdiendo gran parte de la energía como calor y enfrentando costos más altos debido al incremento del precio del combustible. En contraste, el Nissan Leaf consume solo 15–20 kWh por cada 100 km, lo que se traduce en ahorros significativos en costos y beneficios ambientales. Sin embargo, la adopción de EVs en Ecuador enfrenta desafíos como la infraestructura limitada de carga, especialmente en áreas rurales, y el impacto del terreno montañoso en la autonomía y el desgaste de la batería. Resolver estos problemas requiere expandir y descentralizar las redes de carga, además de invertir en fuentes de energía renovable para satisfacer de manera sostenible la creciente demanda eléctrica. Futuros estudios deberían evaluar el desempeño de los vehículos a nivel del mar para comprender mejor los efectos de la altitud sobre la eficiencia energética y optimizar su rendimiento en diversos terrenos [33].

2.4 Análisis térmico y de rendimiento en baterías HV en condiciones de baja presión

La temperatura afecta el rendimiento de baterías y super capacitores, reduciendo capacidad y potencia a menos de 0 °C. Al evaluar celdas comerciales, destacando que las baterías de Li-ion ofrecen mayor densidad de energía y potencia hasta -30 °C, aunque sufren mayores pérdidas. A temperaturas más bajas, las celdas de LA maximizan la densidad energética, y los super capacitores, la de potencia. Se introdujo un método empírico para optimizar la temperatura de precalentamiento en baterías de Li-ion, útil para estrategias de gestión térmica en frío. La impedancia predice con precisión su comportamiento térmico [34].

Las baterías Li-ion enfrentan degradación acelerada por altas corrientes, ciclos de uso y temperaturas extremas. El modelo de baterías LiNixMnyCozO2 en MATLAB, evaluando capacidad tras 360, 1000 y 2000 ciclos con corrientes de 30 A y 100 A. A 30 A, la capacidad se mantuvo estable después de 1000 ciclos, pero a 100 A disminuyó al 74%. La incorporación de un sistema de enfriamiento redujo diferencias de temperatura y voltaje entre baterías nuevas y usadas a 4.5 °C y 4 V tras 2000 ciclos. Se propusieron ecuaciones para optimizar la gestión térmica y de carga, concluyendo que a altas corrientes, la degradación depende menos de las diferencias térmicas. Esto mejora la aplicación en vehículos eléctricos [35].

El análisis térmico de las baterías de Li-ion previene el fenómeno de desbordamiento térmico caracterizado por reacciones exotérmicas que incrementan la temperatura interna, desestabilizan la estructura y generan fallos críticos, como incendios y explosiones. Este fenómeno, intensificado por la acumulación de calor y la baja conductividad térmica interna, requiere detección temprana mediante sensores de temperatura y presión interna, técnicas de termografía infrarroja y modelos numéricos predictivos. Estudios experimentales han validado la medición simultánea de temperatura y presión interna durante el fallo, identificando cuatro etapas del proceso y promoviendo estrategias de mitigación. Estos avances mejoran la seguridad, el diseño y la longevidad de las baterías HV, facilitando su aplicación segura en vehículos eléctricos y otras tecnologías [36].

Para comprender y predecir el comportamiento de las baterías de Li-ion durante eventos críticos como la fuga térmica existen diferentes ecuaciones como la Ley de los Gases Ideales permite relacionar la presión interna y la temperatura durante la generación de gases, lo que es crucial para anticipar cuándo la batería alcanzará su límite de presión crítica. Además, la tasa de generación de

calor ayuda a evaluar cómo las reacciones exotérmicas aumentan la temperatura interna, lo que es esencial para diseñar sistemas de gestión térmica eficientes. Finalmente, la energía liberada durante la fuga térmica, proporcionando datos clave para mejorar la seguridad y prevenir fallas catastróficas [36].

El análisis de sistemas de BTMS con, Espuma Metálica y Mini canales Contraflujo (PCM) revela mejoras significativas en el desempeño térmico. El reduce hasta 11.5 K la temperatura máxima comparado con sistemas de PCM puro, manteniendo una diferencia de menos de 5 K entre celdas, lo que garantiza la seguridad térmica. La inclusión de espuma metálica mejora la disipación de calor y retrasa el inicio de la fusión del PCM al doble del tiempo, incrementando la uniformidad térmica. Además, esta configuración minimiza la demanda energética, prolongando la vida útil del PCM y equilibrando rendimiento térmico con aumento de peso. Aunque los mini canales ondulados ofrecen ligeras mejoras térmicas de 0.3 K, sus altos costos y demanda de energía no los justifican. En general, el cuarto diseño asegura estabilidad térmica incluso en ciclos de conducción exigentes y condiciones ambientales adversas [37].

Las baterías HV con química catódica NMC a temperaturas ambientales de 25 °C y 35 °C sin gestión térmica, las temperaturas exceden el límite seguro de 60 °C. Al introducir cera de parafina como PCM, las temperaturas disminuyen, pero en condiciones de 35 °C y 2C, el PCM alcanza su estado líquido al 100% en 2800 s, perdiendo su capacidad de retrasar el aumento de temperatura. Al reemplazar la cera de parafina con PCM mejorado la conductividad térmica aumenta, evitando que el PCM llegue al estado líquido completo y mejorando la transferencia de calor. Los resultados muestran que, con el PCM nano-mejorado, las temperaturas máximas son consistentemente más bajas en comparación con la cera de parafina, asegurando mayor eficacia térmica y estabilidad bajo condiciones de carga exigentes [38].

En el caso de las baterías HV con cátodo NMC811 ofrece una alta densidad energética, pero sufre degradación a bajas temperaturas. En pruebas a 0 °C, celdas 21700 mostraron caídas de capacidad del 49% y 25% tras 200 ciclos a 0.5 C y 1 C, respectivamente, debido al plateado de litio en el ánodo. El autocalentamiento a 1 C mitigó parcialmente la degradación. Tras 3 meses, celdas cicladas a 0.5 C fallaron por dendritas y cortocircuitos. Se observó recuperación parcial de capacidad tras pausas de relajación prolongadas, evidenciando la influencia de la polarización. Este estudio subraya las limitaciones térmicas y estructurales de NMC811 en entornos fríos [39].

La gestión térmica es esencial para mantener las baterías de litio dentro de límites seguros, aumentando su seguridad, eficiencia y vida útil. Las baterías NCM-21700 destacan por su alta densidad energética y voltaje, pero enfrentan desafíos térmicos. Al evaluar un sistema de enfriamiento combinado de PCM y aire. Se encontró que un PCM de 12 mm de espesor es óptimo a una tasa de descarga de 3C. El PCM absorbe el calor generado por la batería, mientras que el aire disipa ese calor, mejorando el rendimiento y la uniformidad térmica. Sin embargo, a altas tasas de descarga, la baja conductividad térmica del PCM limita su capacidad de controlar la temperatura, alcanzando una temperatura máxima de 30.6 °C bajo el efecto combinado. Esto subraya la importancia de soluciones sinérgicas para la gestión térmica en baterías HV [40].

2.5 Consideraciones de seguridad y durabilidad

Un estudio realizó un análisis térmico y optimización de un paquete de baterías EV en dos condiciones extremas de operación, validando el modelo de generación de calor de Bernardi que incluye el calor reversible. Los resultados demostraron que el calor reversible es más significativo en tasas bajas de descarga, mientras que el calor irreversible es dominante en tasas altas. El modelo validado se aplicó a un paquete real de baterías EV con sistema de enfriamiento, encontrando que la temperatura de entrada y el flujo de entrada son los factores más significativos para el comportamiento térmico. La optimización determinó que los parámetros óptimos en condición de calentamiento son 40°C de temperatura de entrada y 8 L/min de flujo, mientras que para enfriamiento son 22°C y 6 L/min respectivamente, permitiendo el menor consumo energético del sistema de gestión térmica mientras se mantienen los requerimientos de rendimiento [41].

Existe un esquema para seleccionar una característica representativa de la seguridad de las baterías en EVs en condiciones reales, permitiendo distinguir entre baterías normales y peligrosas antes de que ocurra una fuga térmica. Se desarrolla un modelo basado en el análisis estadístico multidimensional de datos históricos de EVs, evaluando 20 características estadísticas extraídas de los voltajes de las baterías. Mediante un modelo de mezcla gaussiana iterativa, se construye una distribución real de características para mitigar errores aleatorios y valores atípicos en los sensores. Los resultados demuestran que la característica seleccionada, el rango de la media, es eficaz para identificar baterías inseguras bajo diversas condiciones (estaciones del año, kilometraje, estado de carga y modo de operación del EV). Además, se concluye que la detección es más efectiva en temperaturas elevadas, estados de carga altos y durante la carga del EV, lo que permite optimizar estrategias de gestión de seguridad en línea con una menor carga computacional [42].

La seguridad térmica de baterías de Li-ion con electrolito en gel basado en $\text{Li}(\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3})\text{O}_2$, demostró que el uso del gel mejora significativamente la estabilidad térmica en comparación con los electrolitos líquidos convencionales. Mediante calorimetría de tasa de aceleración, se encuentra que el electrolito en gel retrasa la temperatura de inicio de autocalentamiento de 67°C a 135°C y la temperatura de inicio de fuga térmica de 195.4°C a 272°C, reduciendo el riesgo de cortocircuito interno. Los análisis térmicos indican que la matriz polimérica del electrolito en gel retiene el electrolito líquido y desplaza la volatilización de solventes inflamables a temperaturas superiores a 180°C. Además, a temperaturas de hasta 290°C, el polímero forma una película rígida que impide la contracción del separador, evitando cortocircuitos. Este estudio confirma que el uso de electrolitos en gel es una estrategia efectiva para mejorar la seguridad de las baterías de ion-litio y prevenir incidentes térmicos en su aplicación en vehículos eléctricos y almacenamiento de energía [43].

Para evaluar la seguridad de las baterías de Li-ion en EVs, existen pruebas experimentales y metodologías analíticas como el Análisis de Árbol de Fallos (FTA) y el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP). Se identifican 20 eventos básicos, 26 conjuntos de corte mínimo y 29 pruebas de batería que están directamente relacionadas con los incendios en EV. Los resultados revelan que los principales factores de riesgo son el uso de materiales con baja estabilidad térmica y la falla del sistema de gestión de batería (BMS) para advertir a tiempo. Se establece un modelo de evaluación de seguridad basado en la ponderación de diferentes pruebas de batería mediante AHP, lo que permite priorizar medidas de mitigación. Finalmente, el estudio propone un esquema de desarrollo preventivo para mejorar la seguridad de las LIB en EV, abordando la propagación de la

fuga térmica a nivel de celda, módulo y sistema mediante mejoras en materiales, estructura y control térmico [44].

La evolución de la seguridad térmica en baterías de Li-ion con cátodos de NCM de alto contenido de níquel y ánodos de Si-C con alto contenido de silicio, evaluó la estabilidad térmica de los electrodos en diferentes SOC. Se encontró que el aumento del SOC reduce la estabilidad térmica del ánodo debido a la deslitificación del material NCM y a la reacción de aleación entre el silicio y el litio, lo que provoca deformaciones estructurales y afecta negativamente la seguridad térmica de la batería. Estos hallazgos proporcionan información valiosa para mejorar el diseño y la seguridad de baterías de alta densidad energética [45].

Las tecnologías de detección para mejorar la seguridad de baterías de Li-ion en vehículos eléctricos, abordando fallas internas como cortocircuitos y fuga térmica bajo condiciones de abuso mecánico, térmico y eléctrico. Se destaca la necesidad de mejorar los métodos de prueba para detectar cortocircuitos internos con mayor precisión y predecir fallos térmicos antes de que ocurran, enfatizando la importancia de combinar pruebas experimentales con modelos electroquímicos y térmicos avanzados. Se recomienda el desarrollo de estrategias de gestión de baterías más inteligentes y la optimización de estándares de seguridad para minimizar riesgos de incendio y explosión [46].

Las baterías de Li-ion por su sensibilidad a la temperatura y baja estabilidad térmica representan riesgos significativos, especialmente en EVs, donde condiciones extremas y defectos pueden desencadenar fugas térmicas, incendios o explosiones. Los incendios en EVs son más intensos y difíciles de controlar debido a su alta liberación de calor y duración. La detección temprana de fallos es crucial, y se están desarrollando sistemas basados en mecanismos electroquímicos y estrategias de inteligencia artificial para monitorear y prevenir estos eventos. Aunque el agua sigue siendo el agente más usado para extinguir incendios en EVs, su eficacia es limitada. La seguridad de los EVs está en constante evolución, con avances en materiales, tecnologías y procesos de fabricación inteligente que buscan mejorar la estabilidad térmica y reducir defectos. La colaboración entre disciplinas de protección contra incendios y seguridad de EVs impulsará mejoras continuas en la seguridad, apoyando el desarrollo sostenible de la industria automotriz [47].

El enfoque basado en datos para evaluar el riesgo de seguridad en los sistemas de baterías de EV, utilizando información operativa en condiciones reales. Se identificaron cinco parámetros clave relacionados con voltaje y temperatura, los cuales permitieron diferenciar entre baterías en estado normal y aquellas que han experimentado Fuga Térmica (TR). Para ello, se construyó un modelo de evaluación de riesgo dinámico, donde se aplicó una red bayesiana para estimar la probabilidad de TR, lo que permite predecir eventos de riesgo en función de patrones detectados en los datos. Además, se calculó la variabilidad del voltaje entre celdas, ayudando a identificar desequilibrios críticos en el sistema de baterías. El modelo fue validado con conjuntos de datos a gran escala, alcanzando una precisión del 96.67% en la detección temprana de riesgos [48].

El diseño y control de un Cargador de Batería Modular Integrado a Bordo (MSOBC) basado en un convertidor SEPIC para aplicaciones en EVs. El sistema segmenta la batería en módulos de menor voltaje, mejorando la seguridad y eficiencia del sistema. Para regular la potencia de carga, se establece un modelo de distribución donde la potencia de entrada del rectificador de cada

segmento, asegurando un control preciso del flujo de energía. Además, se implementa una estrategia de balanceo térmico en la carga de las baterías, ajustando dinámicamente la corriente, lo que reduce diferencias térmicas y previene sobrecalentamientos. Los experimentos con un EV de 80 kW verificaron la efectividad del MSOBC, logrando corregir un desbalance de 15% en SOC con una variación de temperatura máxima de 10°C y reduciendo la discrepancia térmica en 5 minutos, validando así su potencial para mejorar la seguridad en sistemas de almacenamiento de energía en EV [49].

2.6 Resistencias al Movimiento: La Suma de Fuerzas

El análisis dinámico de un vehículo eléctrico establece que la fuerza motriz necesaria para su desplazamiento es equivalente a la suma de todas las resistencias físicas que se oponen al movimiento. Entre estas, la resistencia aerodinámica (Ecuación 1) es particularmente crítica a velocidades elevadas, ya que su magnitud es proporcional al cuadrado de la velocidad. Esta fuerza se define en función de la densidad del aire (ρ), las dimensiones frontales del vehículo (ancho a , altura h y factor de forma (k_f) y el coeficiente de arrastre (C_x) [50].

Ecuación 1: Resistencia aerodinámica

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot a \cdot h \cdot k_f \cdot C_x \cdot v^2$$

Donde:

ρ = densidad del aire (kg/m³)

a = ancho del vehículo (m)

h = altura del vehículo (m)

k_f = área efectiva o coeficiente de forma (m²)

C_x = Coeficiente aerodinámico del vehículo

v = velocidad (km/h)

Simultáneamente, el peso del vehículo influye en las fuerzas restantes. La resistencia a la rodadura (ecuación 2), generada por la deformación del neumático y la fricción, se calcula considerando la masa (m), la gravedad (g) y el coseno del ángulo de la vía ($\cos \theta$), ajustados por un coeficiente de rodadura específico (f_{rr}) [51].

Ecuación 2: Resistencia a la rodadura

$$F_{rod} = m \cdot g \cdot \cos \theta \cdot f_{rr}$$

Donde:

m= masa del vehículo (kg)

g= valor de la gravedad (m/s²)

$\sin \theta$ = Angulo de pendiente (°)

f_{rr} = coeficiente de resistencia a la rodadura

Por último, al enfrentar desniveles, se debe considerar la resistencia por pendiente (ecuación 3), determinada por la componente del peso que actúa en contra del avance en función del seno del ángulo de inclinación [50].

Ecuación 3: Resistencia por pendiente

$$F_{pendiente} = m \cdot g \cdot \sin \theta$$

Donde:

m= masa del vehículo (kg)

g= valor de la gravedad (m/s²)

$\sin \theta$ = Angulo de pendiente (°)

Una vez cuantificadas las fuerzas mecánicas de oposición, es necesario determinar la potencia energética requerida por el sistema de propulsión (ecuación 4). Si el vehículo se desplaza a una velocidad constante (V), la potencia mecánica necesaria en las ruedas es el producto de la suma de las fuerzas resistivas por la velocidad. Sin embargo, para obtener la potencia total eléctrica que debe suministrar la batería, este valor mecánico debe ajustarse considerando la eficiencia del tren motriz (η Transmisión). Este factor integra las pérdidas energéticas en componentes como el inversor y el motor [51].

Ecuación 4: Potencia energética requerida

$$P_{total} = \frac{(F_{aer} + F_{rod} + F_{pend}) \cdot V}{\eta_{Transimision}}$$

Donde:

F_{aer} = Fuerza de resistencia aerodinámica (N)

F_{rod} = Fuerza de resistencia a la rodadura (N)

F_{pend} = Fuerza de resistencia por pendiente (N)

V= velocidad (km/h)

η = eficiencia

La evaluación del rendimiento del vehículo se realiza normalizando la energía consumida en función de la distancia recorrida (ecuación 5). Este indicador permite comparar la eficiencia bajo distintas condiciones de operación y cargas auxiliares. Para obtener el consumo de energía por kilómetro (o cada 100 km), se relaciona la energía utilizada con la distancia total del trayecto [50].

Ecuación 5: Consumo Relativo

$$E_{km} = \frac{\text{Energía Utilizada (kWh)}}{\text{Distancia Recorrida (km)}} \cdot 100$$

A partir de este consumo promedio y conociendo la energía total almacenada, es posible calcular la autonomía estimada del vehículo (ecuación 6). El rango máximo se obtiene dividiendo la capacidad utilizable de la batería por el consumo energético promedio [50].

Ecuación 6: Autonomía

$$\text{Autonomia (km)} = \frac{\text{Capacidad de la batería (kWh)}}{\text{Consumo Promedio } \left(\frac{\text{kWh}}{100\text{km}} \right)}$$

2.7 Rstudio como procesador de datos

Rstudio se utiliza como un entorno de desarrollo integrado (IDE) que permite desarrollar aplicaciones de datos interactivas y perspicaces, trascendiendo la simple computación de probabilidades. La herramienta facilita la conexión entre la teoría y la práctica, permitiendo la implementación de conceptos estadísticos directamente en la consola de Rstudio. Además, este entorno capacita a los usuarios para la creación de documentos dinámicos e informes, así como para la construcción de aplicaciones estadísticas completas destinadas a resolver problemas del mundo real [52].

El software aprovecha paquetes avanzados de R que ofrecen ventajas técnicas significativas para la manipulación y visualización de datos. El paquete “manipulate” se emplea para generar funciones de gráficos interactivos, integrando controles como deslizadores, casillas de verificación y botones. Para el manejo de grandes volúmenes de datos (“big data”), “dplyr” permite realizar operaciones eficientes como el filtrado de filas, la selección de columnas y el

resumen de datos. Por su parte, “ggplot2” proporciona un sistema elegante para la creación de representaciones visuales complejas, tales como histogramas, gráficos de densidad y diagramas de dispersión [52].

El uso de estas herramientas permite enfrentar el desafío de gestionar grandes cantidades de datos heterogéneos. El entorno facilita la manipulación eficiente de “big data”, permitiendo ejecutar operaciones esenciales como el filtrado, la selección de columnas específicas, el reordenamiento y el resumen de la información. Asimismo, este enfoque habilita la demostración de competencias técnicas en todas las etapas del procesamiento, abarcando desde la adquisición, limpieza y enriquecimiento de los datos, hasta su modelado, evaluación y despliegue final [52].

2.8 ANSYS fluent

La utilización de ANSYS Fluent se fundamenta en su capacidad para establecer modelos robustos de acoplamiento electroquímico-térmico, lo cual es esencial para investigar con precisión el campo de temperatura de la batería. A través del módulo MSMD (Multi-Scale Multi-Dimensional), el software permite activar términos específicos de fuentes de calor, seleccionando tanto el calor de Joule como la fuente de calor de la reacción electroquímica. Esta funcionalidad justifica su uso al permitir simular adecuadamente las características de generación de calor y revelar la distribución de temperatura durante procesos de descarga [53].

Dentro del entorno de simulación, se justifica la elección del modelo semi-empírico NTGK (disponible en el módulo MSMD de Fluent) debido a sus ventajas operativas frente a otros modelos más complejos: ofrece una adquisición de parámetros sencilla y una velocidad de cálculo rápida. El software facilita la obtención de parámetros clave mediante el ajuste de datos experimentales, lo que permite realizar análisis de simulación eficientes del campo térmico de la batería [53].

La aplicación de este software permite obtener y visualizar variables críticas como la temperatura máxima y la diferencia de temperatura bajo condiciones de descarga específicas, proporcionando valores de referencia para el estudio de sistemas de gestión térmica (BTMS). El modelo establecido en ANSYS Fluent demuestra ser capaz de analizar los factores que causan la distribución no uniforme de la temperatura, tales como la resistencia térmica de la celda y la resistencia interna de los colectores [53].

CAPÍTULO III

3 MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología para Comparar el Rendimiento Teórico vs. Real en Condiciones de Altura

Se desarrollo un Código (Anexo 1) de Predicción Teórica, diseñado específicamente para dar cumplimiento al primer objetivo del proyecto. Este código se construyó bajo un enfoque de modelado fisicomatemático que integra las ecuaciones fundamentales de resistencia al avance, tales como la fuerza aerodinámica, de rodadura y de pendiente, con el fin de proyectar el comportamiento del vehículo convertido en condiciones del altura a 2225 m s.n.m en la ciudad de Ibarra, con una presión de 78 kPa. Su estructura permite evaluar de forma controlada el rendimiento de la batería LiFePO_4 a velocidades constantes de 40, 60 y 80 km/h, además de incorporar algoritmos de resolución numérica para determinar la velocidad máxima alcanzable y el consumo energético teórico en pendientes específicas.

3.1 Variables Para los Cálculos (Según la velocidad y pendiente):

Tabla 2: Variables para los cálculos en Rstudio

Kf (Area Efectiva m^2)	1.5
Cx (Coeficiente aerodinámico)	0,32
m (Peso del vehículo en kg)	844
Peso de 2 pasajeros (kg)	140
frr (coeficiente de resistencia a la rodadura)	0,012
$\rho_{\text{aire@2225}}$ (Densidad del aire en kg/m^3)	0,934
$\rho_{\text{aire@2896}}$ (Densidad del aire en kg/m^3)	0,859
$\eta_{\text{transmision}}$ (eficiencia de la transmision en %)	0,95
η_{Motor} (eficiencia del motor en %)	0,90
pendiente (%)	3,73
recorrido (km)	20
velocidad (km/h)	80
Gravedad (m/s^2)	9,81
Capacidad (kW)	10,8
Potencia Max Motor (kW)	40

3.2 Especificaciones de la batería LiFePO₄:

Voltaje de Batería HV: 108V

Voltaje Nominal por Celda: 3.2V

Numero de Celdas: 32

Configuración: 32S (en serie)

Capacidad por Celda: 100Ah

3.3 Modelado del Consumo Energético en Rstudio

3.3.1 MODELO PREDICTIVO (CÓDIGO BASE 1: SIMULADOR TEÓRICO)

A. Configuración de Parámetros Físicos

- Masa Dinámica (m): Definida en 984 kg, integrando la masa en vacío del vehículo más la carga útil (conductor, pasajero y equipos). Fundamental para el cálculo de inercia y resistencia gravitacional.
- Area Efectiva (m^2): Mediante el Software CAD de SolidWorks se dibujo el plano frontal del vehículo con referencia del blueprint y las dimensiones de la ficha técnica del mismo.

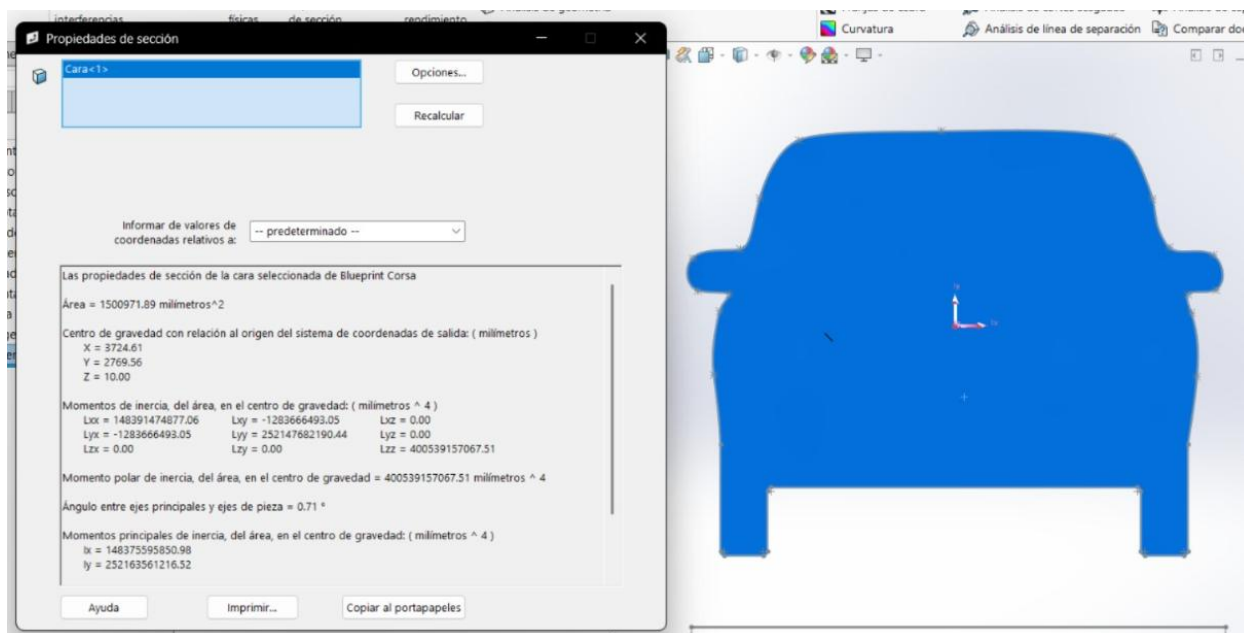


Ilustración 1. Area efectiva frontal del vehículo

- Densidad del Aire Local (densidad): Ajustada a 0.934 kg/m^3 @ 2225 msnm y a 0.859 kg/m^3 @ 2896 msnm. (Referencia: GPS Logger).
- Coeficientes de Resistencia (C_d y C_{rr}): Se utiliza un C_d (aerodinámica) de 0.32 adecuado para el tipo de vehículo que es el Corsa y un C_{rr} (rodadura) de 0.011 en terreno con adoquín grande y 0.008 en asfalto por el tipo de carretera donde se van a recopilar los datos GPS Reales (Referencia: Automotive Handbook, BOSCH).

Table 3: Drag coefficients and aerodynamic drag for various vehicle body configurations

	Drag coefficient c_w	Frontal area in m^2	Aerodynamic drag in kW at a driving speed of	
			40 km/h	120 km/h
 Subcompact	0.29...0.37	2.05...2.20	0.5...0.7	13.2...18.1
 Compact class	0.22...0.32	2.18...2.28	0.4...0.6	10.7...16.2
 Medium class	0.23...0.35	2.20...2.38	0.4...0.7	11.3...18.5
 Station wagon	0.27...0.35	2.20...2.38	0.5...0.7	13.2...18.5
 Van	0.25...0.35	2.40...3.20	0.5...0.9	13.4...24.9
 Convertible - closed - open	0.28...0.38	1.94...2.20	0.4...0.7	12.1...18.6
	0.35...0.50	1.84...2.10	0.5...0.9	14.3...23.4
 Off-road vehicle	0.29...0.55	2.49...3.15	0.6...1.3	16.1...38.6
 Sports cars	0.27...0.40	1.65...2.20	0.4...0.7	10.0...19.6
 Luxury class	0.23...0.35	2.28...2.65	0.4...0.8	11.7...20.6

Ilustración 2. Coeficientes Aerodinámicos por tipo de vehículo

Fuente: Automotive Handbook, BOSCH

Table 2: Coefficients of rolling resistance

Road surface	Coefficient of rolling resistance f_R
Pneumatic car tires on large set pavement	0.011
small set pavement	0.011
concrete, asphalt	0.008
rolled gravel	0.02
unpaved road	0.05
field	0.1 - 0.35
Pneumatic truck tires on concrete, asphalt	0.006...0.01
Strake wheels in field	0.14...0.24
Track-type tractor in field	0.07...0.12
Wheel on rail	0.001...0.002

Ilustración 3. Coeficientes de rodadura por tipo de camino

Fuente: Automotive Handbook, BOSCH

B. Dinámica de Conducción y Eficiencias

- Ciclo Variable de Paradas El modelo implementa un bucle de 37 ciclos de parada y arranque, además de un 3.73% de pendiente. Emula la frecuencia de interrupciones reales y la pendiente promedio a lo largo de la ruta (semáforos, curvas cerradas, tráfico y reductores de velocidad del trayecto de Ibarra a Zuleta).
- Se aplica una eficiencia de transmisión de 0.95 y de motor/inversor de 0.90. Representa las pérdidas térmicas y mecánicas del tren motriz eléctrico.

C. Algoritmo de Balance de potencia

- Uso de la función uniroot para determinar la Velocidad Máxima Real. Define el límite físico donde la Potencia Requerida iguala la Potencia Máxima del Motor (40 kW), validando si el vehículo puede cumplir con los límites de velocidad bajo la pendiente analizada.

Ecuaciones para el cálculo de la potencia requerida a velocidades constantes (40, 60, 80 km/h) y sin incluir efectos de pendiente implementadas en el código de Rstudio:

Resistencia por pendiente:

$$F_{pendientes} = m \cdot g \cdot \sin \theta$$

Donde:

m= masa del vehículo (kg)

g= valor de la gravedad (m/s²)

$\sin \theta$ = Angulo de pendiente (°)

Resistencia aerodinámica:

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot a \cdot h \cdot k_f \cdot C_x \cdot v^2$$

Donde:

ρ = densidad del aire (kg/m³)

a= ancho del vehículo (m)

h= altura del vehículo (m)

kf= área efectiva o coeficiente de forma (m²)

Cx= Coeficiente aerodinámico del vehículo

v= velocidad (m/s)

Resistencia a la rodadura:

$$F_{rod} = m \cdot g \cdot \cos \theta \cdot f_{rr}$$

Donde:

m= masa del vehículo (kg)

g= valor de la gravedad (m/s²)

$\sin \theta$ = Angulo de pendiente (°)

f_{rr}= coeficiente de resistencia a la rodadura

Potencia total:

$$P_{total} = \frac{(F_{aer} + F_{rod} + F_{pend}) \cdot V}{\eta_{Transimision}}$$

Donde:

F_{aer}= Fuerza de resistencia aerodinámica (N)

F_{rod}= Fuerza de resistencia a la rodadura (N)

F_{pend}= Fuerza de resistencia por pendiente (N)

V= velocidad (m/s)

η= eficiencia

Consumo relativo:

$$\frac{\text{Consumo Total}}{\text{Distancia}} * 100$$

Autonomía estimada:

$$\text{Autonomia (km)} = \frac{\text{Capacidad de la bateria}}{\text{Conusmo Relativo}} * 100$$

3.3.2 Potencia Requerida a 40Km/h

Tabla 3: Resultado de los cálculos a 40km/h

Potencia Promedio kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo 100km kWh	Autonomía km	Vel. Max km/h
0.98	0.61	102.8	3.55	304.3	168.3

Tabla 4: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	25.6
F. Rodadura (N)	77.22
F. Pendiente (N)	0

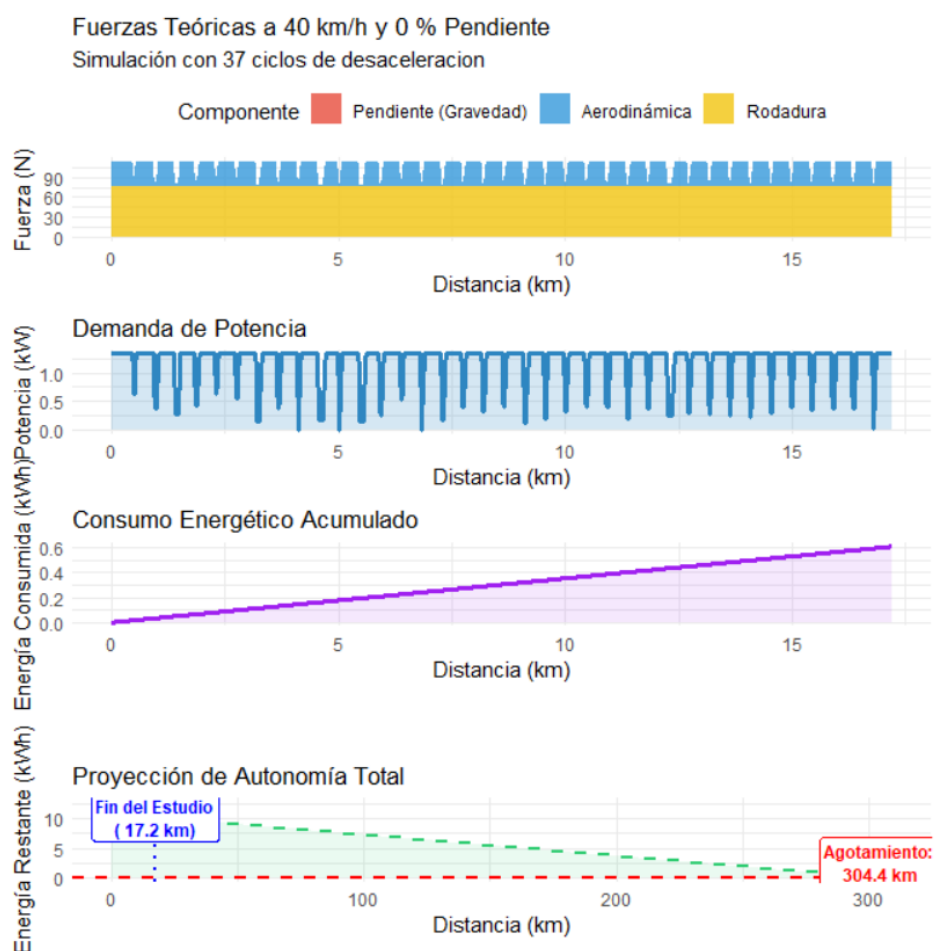


Ilustración 4. Simulación a 40km/h y 0% de pendiente

3.3.3 Potencia Requerida a 60km/h

Tabla 5: Resultado de los cálculos a 60km/h

Potencia Requerida kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo 100km kWh	Autonomía km	Vel. Max km/h
1.4	0.7	118	4.4	241.1	168.3

Tabla 6: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	41.3
F. Rodadura (N)	77.2
F. Pendiente (N)	0

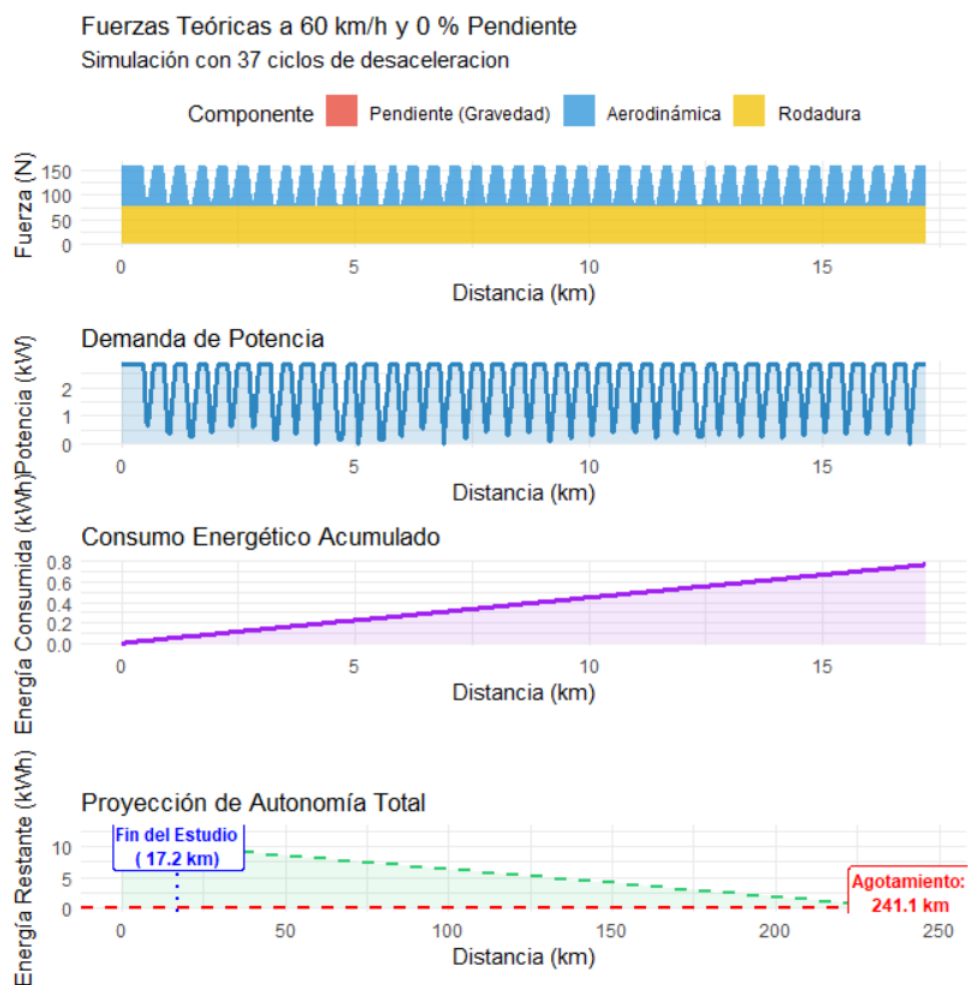


Ilustración 5. Simulación a 60km/h y 0% de pendiente

3.3.4 Potencia Requerida a 80km/h

Tabla 7. Resultado de los cálculos a 80km/h

Potencia Requerida kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo 100km kWh	Autonomía km	Vel. Max km/h
1.7	0.8	126	5.1	211.7	168.3

Tabla 8: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	48.82
F. Rodadura (N)	77.22
F. Pendiente (N)	0

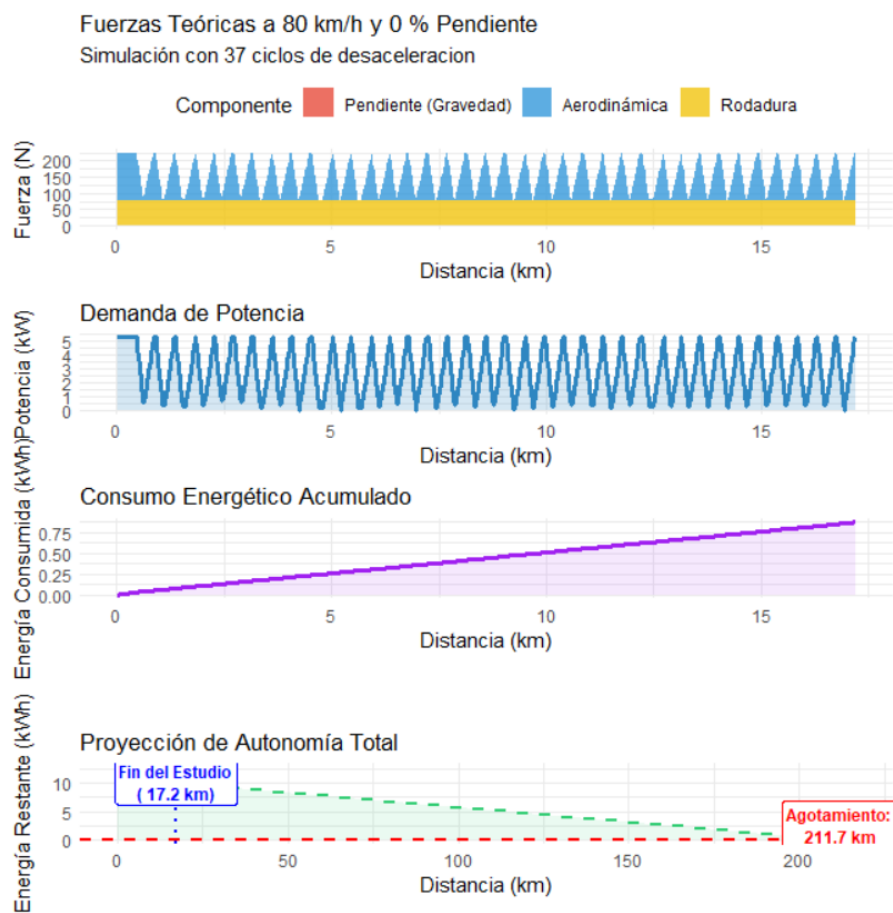


Ilustración 6. Simulación a 80km/h y 0% de pendiente

3.4 Análisis en Pendientes Locales

Incluir el efecto de pendientes

$$P_{pendientes} = m \cdot g \cdot \sin \theta \cdot v$$

Donde:

θ = ángulo de inclinación.

g = aceleración gravitacional (9.81 m/s²).

3.4.1 Potencia Requerida a 40km/h y 3.73% de pendiente promedio

Tabla 9: Resultado de los cálculos a 40km/h y 3.73% de pendiente promedio

Potencia Requerida kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo kWh 100km	Autonomía km	Vel. Max km/h
4.1	2.6	460.5	15.1	71.2	142.2

Tabla 10: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	23.5
F. Rodadura (N)	77.1
F. Pendiente (N)	359.8

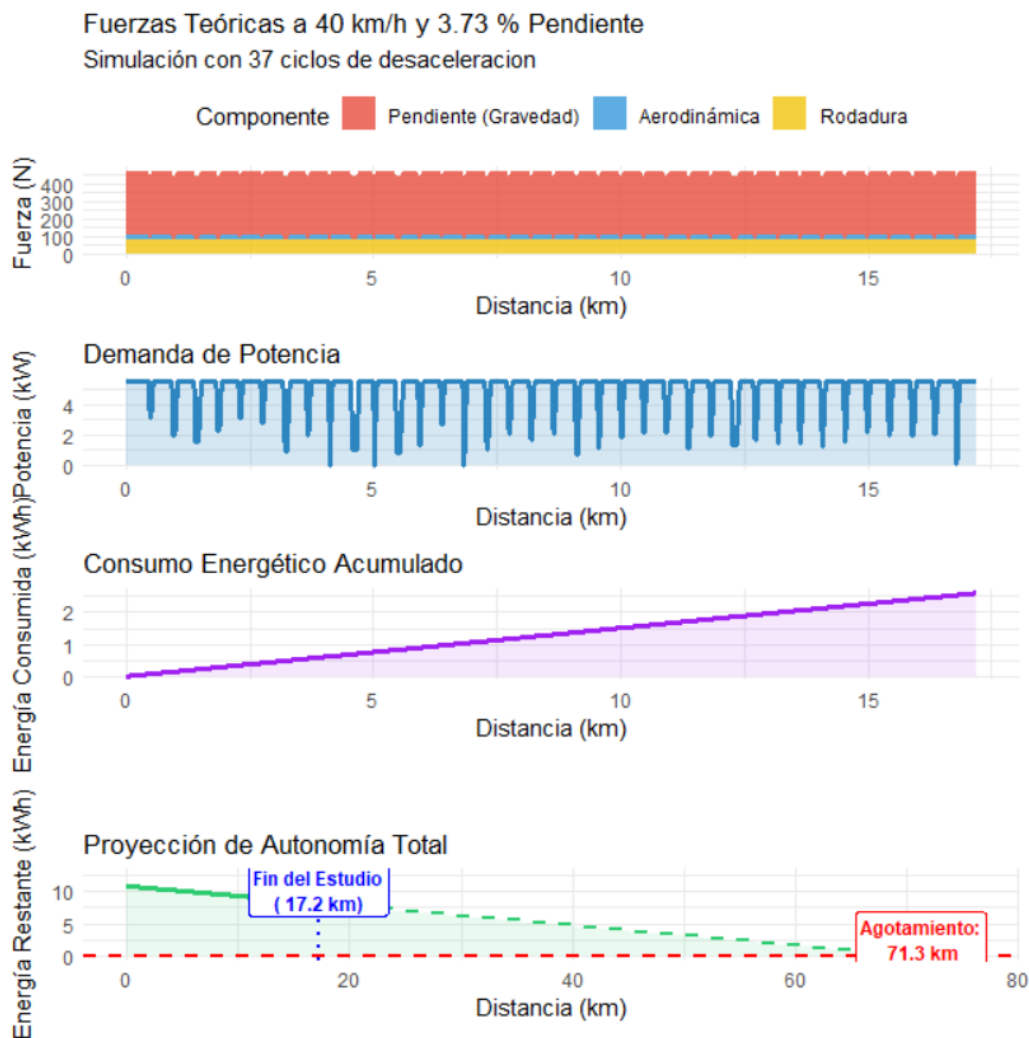


Ilustración 7. Simulación a 40km/h y 3.73% de pendiente

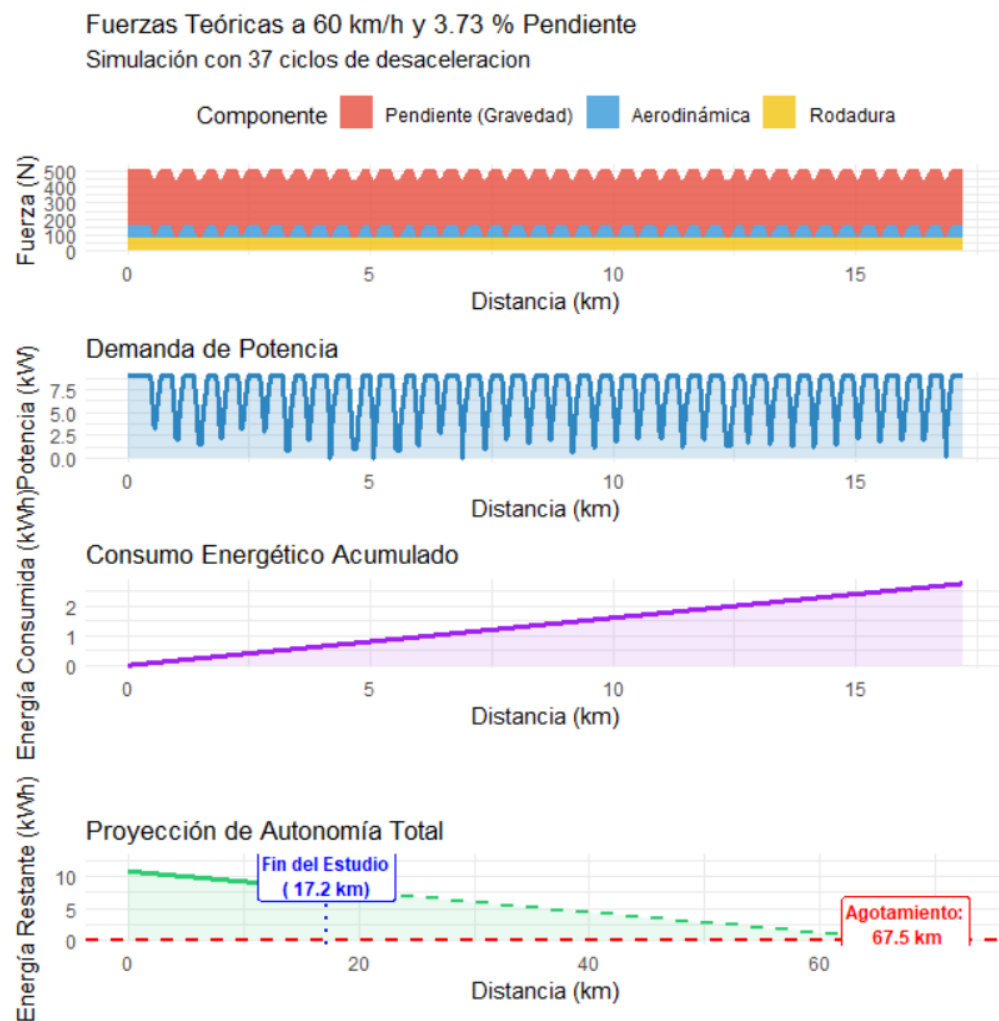
3.4.2 Potencia Requerida a 60km/h y 3.73% de pendiente promedio

Tabla 11: Resultado de los cálculos a 60km/h y 3.73% de pendiente promedio

Potencia Requerida kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo kWh 100km	Autonomía km	Vel. Max km/h
5.2	2.7	474.9	16	67.4	142.2

Tabla 12: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	37.92
F. Rodadura (N)	77.17
F. Pendiente (N)	359.8

**Ilustración 8.** Simulación a 60km/h y 3.73% de pendiente

3.4.3 Potencia Requerida a 80km/h y 3.73% de pendiente promedio

Tabla 13: Resultado de los cálculos a 80km/h y 3.73% de pendiente promedio

Potencia Requerida kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo 100km kWh	Autonomía km	Vel. Max km/h
5.7	2.8	481.8	16.5	65.1	142.2

Tabla 14: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	44.9
F. Rodadura (N)	77.17
F. Pendiente (N)	359.8

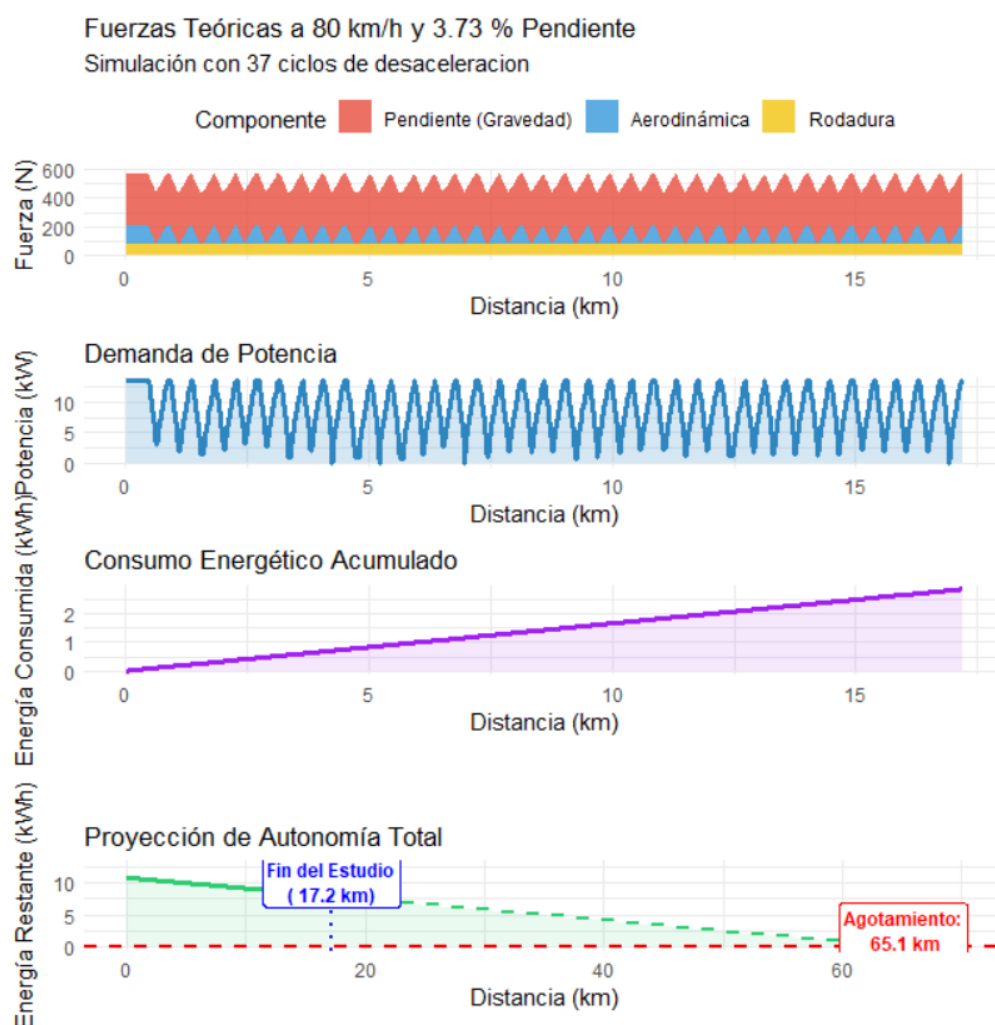


Ilustración 9. Simulación a 80km/h y 3.73% de pendiente

3.5 Simulación y validación teórica comparando consumo en pendientes vs. Terreno plano en el trayecto de 20km Ibarra-Zuleta

Tabla 15: Comparación de Consumo (kWh) con pendiente y sin pendiente.

Consumo Total kWh	Sin Pendiente	Con pendiente de 3.73%
A 40km/h	0.6	2.6
A 60km/h	0.7	2.7
A 80km/h	0.8	2.8

3.5.1 Herramientas:

Software Rstudio

Software SolidWorks

3.5.2 Definición de Parámetros de Estudio

Variables clave a comparar:

Tabla 16: Comparación de Autonomía (km) con pendiente y sin pendiente.

Autonomía (km)	Sin Pendiente	Con pendiente de 3.73%
A 40km/h	304.3	71.2
A 60km/h	241.1	67.4
A 80km/h	211.7	65.1

Tabla 17: Comparación de Consumo Relativo (kWh/100km) con pendiente y sin pendiente.

Consumo Energético kWh/100km	Sin Pendiente	Con pendiente de 3.73%
A 40km/h	3.5	15.1
A 60km/h	4.4	16
A 80km/h	5.1	16.5

Tabla 18: Comparación de Velocidad Maxima (km/h) con pendiente y sin pendiente.

	Sin Pendiente	Con pendiente de 3.73%
Velocidad Maxima (km/h)	168.3	142.2

3.5.3 Recopilación de Registro de Posición en Pruebas Empíricas en Altura

Se implementó un Código (Anexo 2) de Procesamiento GPS, el cual funciona como la herramienta de validación empírica frente a los datos teóricos. La construcción de este código se centró en la capacidad de recopilar y analizar la cinemática de los datos georreferenciados provenientes de pruebas de campo reales, permitiendo procesar variables dinámicas como la altitud y la velocidad en rutas con elevaciones variables. Al calcular métricas como la pendiente promedio real y el consumo energético bajo perfiles topográficos exactos, este código permite cuantificar la adaptabilidad de la batería en condiciones de altura y establecer la comparativa necesaria entre el rendimiento proyectado y el funcionamiento real del vehículo.

Equipos necesarios:



Ilustración 10. GPS Logger TSI GL-770 (velocidad y altitud).

3.6 Variables Para los Cálculos (Según el GPS Logger):

Tabla 19: Variables para los cálculos en Rstudio

Kf (Area Efectiva m^2)	1.5
Cx (Coeficiente Aerodinamico)	0,32
m (Peso del vehículo en Kg)	844
Peso de dos pasajeros	140
fr (coeficiente de resistencia a la rodadura)	0,012
$\eta_{transmision}$ (eficiencia de la transmision en %)	0,95
η_{Motor} (eficiencia del motor en %)	0,90
Gravedad (m/s^2)	9,81
Capacidad (kW)	10,8
Potencia Max Motor (kW)	40
Temperatura Batería ($^{\circ}C$)	43
Numero de paquetes de batería	2
Largo paquete baterías (m)	0.50
Ancho paquete baterías (m)	0.15
Alto paquete de baterías (m)	0.22
Temperatura Ambiente ruta ($^{\circ}C$)	15

3.6.1 MODELO EXPERIMENTAL (CÓDIGO BASE 2: ANALIZADOR GPS)

A. Procesamiento y Limpieza de Señales

- Normalización de Datos: Conversión de formatos regionales y estandarización de unidades mediante gsub y as.numeric. Paso crítico para la integridad de los cálculos matemáticos en el software de análisis.
- Filtro de Media Móvil (rollmean, k=15). Los sensores GPS presentan ruido de cuantización en la altitud. Se aplica un filtro de 15 segundos para suavizar la señal y obtener una pendiente realista, eliminando picos artificiales que causarían errores en el cálculo de potencia instantánea.

B. Geometría Vial y Consumo Energético

- Cálculo de Pendiente Puntual: Utiliza la función $\arctan(\Delta \text{Altitud} / \Delta \text{Distancia})$. Permite obtener el ángulo exacto de inclinación para calcular con precisión la componente gravitacional del peso.
- Lógica de Consumo Bruto (pmax): El algoritmo ignora la regeneración para evaluar la descarga neta de la batería. Se busca determinar el escenario más demandante de autonomía (peor caso), asegurando la viabilidad operativa sin depender de la eficiencia del frenado regenerativo.

C. División de Ruta y Validación Visual de la Ruta

- Segmentación por Tramos (3 km): División de la ruta en ventanas espaciales fijas. Facilita la identificación de la correlación entre la severidad geográfica y el rendimiento específico (kWh/km).
- Mapeo de Telemetría: Integración de la librería leaflet. Permite la validación visual de los datos, confirmando que los picos de demanda energética detectados coinciden con la ubicación geográfica de las rampas más críticas de la ruta.

D. Análisis Termodinámico y de Transferencia de Calor

- La metodología empleada para evaluar el comportamiento térmico del banco de baterías LiFePO_4 durante la prueba de ruta (Ibarra-Zuleta) se fundamenta en la integración de datos geoespaciales y principios de termodinámica de fluidos.
- Se utiliza la Ley de los Gases Ideales para caracterizar la variación de la densidad del aire en función de la altitud máxima registrada por el GPS, lo cual es crítico dado que la presión atmosférica disminuye significativamente a 2800 msnm.
- Posteriormente, mediante una correlación de convección forzada, se calcula un coeficiente de transferencia de calor (h) dinámico que vincula la velocidad real de avance del vehículo con la capacidad de enfriamiento del aire.
- Finalmente, estos parámetros se integran en la Ley de Enfriamiento de Newton para cuantificar la tasa de disipación térmica (Q) en Watts. Este enfoque permite evidenciar matemáticamente cómo la pérdida de densidad del fluido atmosférico actúa como un factor limitante en la evacuación del calor generado por efecto Joule.

Ecuaciones para el desarrollo del Código Base 2

Presión Atmosférica (P):

$$P = P_0 \left(1 - \frac{L * h}{T_0} \right)^{\frac{g * M}{R * L}}$$

Donde:

P: Presión a la altitud de la ruta Pa.

P₀: Presión al nivel del mar (101,325 Pa).

L: Gradiente térmico (0.0065 K/m).

h: Altitud máxima obtenida del GPS (msnm).

g: Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

M: Masa molar del aire (0.02896 kg/mol).

R: Constante universal de los gases (8.314 J/mol*K).

Densidad del Aire (ρ):

$$\rho = \frac{P}{R_{especifica} * T}$$

Donde:

ρ: Densidad real del aire (kg/m³).

R_{especifica}: Constante del aire seco (287.05 J/kg*K).

T: Temperatura ambiente absoluta en Kelvin (°C + 273.15).

Coefficiente de Convección Dinámico (h)

$$h = (10 + 5 * \sqrt{v} * (\frac{\rho}{\rho_{std}})^{0.6}$$

Donde:

h: Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²K).

v: Velocidad promedio real calculada del GPS (m/s).

10 + 5√v: Correlación empírica para convección forzada en superficies planas.

ρ : Densidad calculada en el punto anterior.

ρ_{std} : Densidad de referencia al nivel del mar (1.225 kg/m³).

0.6: Exponente de Nusselt para regímenes de flujo turbulento sobre baterías.

Ley de Enfriamiento de Newton

$$\dot{Q} = h * A * (T_s - T_f)$$

Donde:

Q: Tasa de transferencia de calor o calor disipado (Watts).

A: Área de contacto total de los 2 paquetes de baterías (m²).

Cálculo de A: $2 [(L * H) + (W * H) + (L * W)]$ (donde L, W, H son largo, ancho y alto).

T_s: Temperatura de la superficie de la batería medida en la prueba (43°C).

T_f: Temperatura del fluido o aire ambiente (15°C).

3.6.2 Protocolo de Pruebas

Rutas seleccionadas:

Terreno plano (Yahuarcocha y Autopista Ruta Cajas-Otavalo) y pendientes representativas (Ibarra – Zuleta y Autopista Otavalo-Cajas)

Realizar mediciones a mismas velocidades que en el modelo teórico (40, 60, 80 km/h).

3.6.3 Parámetros a Registrar

Potencia Requerida a 40, 60, 80km/h y 0% de pendiente (Sin pendientes Representativas Positivas)

Tabla 20: Resultado de la validación de la ruta a 40km/h

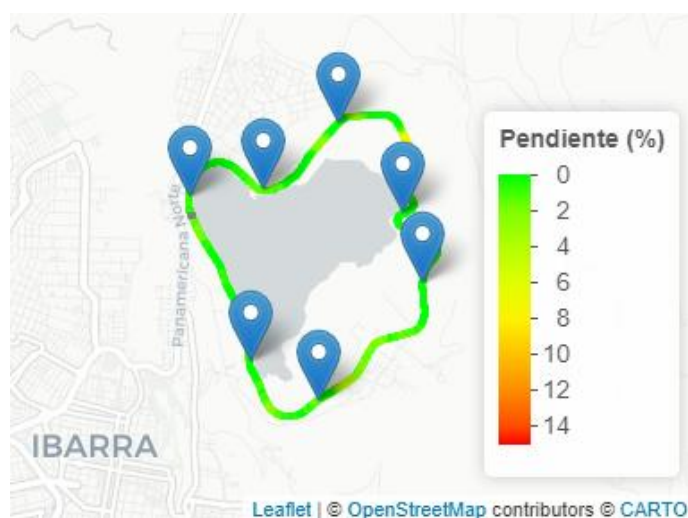
Potencia Promedio kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo kWh 100km	Autonomía km
1.3	1.6	118.5	7.8	137.9

Tabla 21: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	38.2
F. Rodadura (N)	77.2
F. Pendiente (N)	3.1

Tabla 22: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

Variable	Ruta	Al nivel del Mar
Altitud Maxima(m)	2225	0
Presión Atmosférica (kPa)	77.2	101.3
Disipación de Q (W)	450.5	530

**Ilustración 11.** Ruta en Yahuarcocha

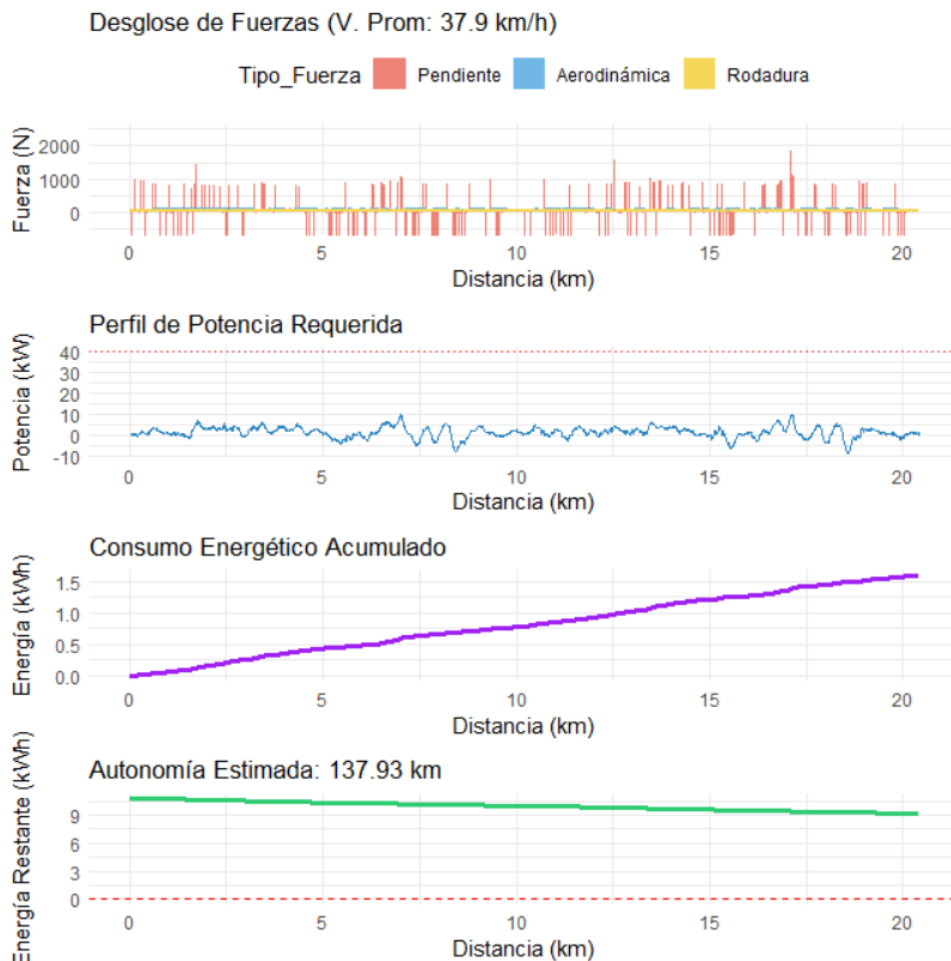


Ilustración 12. Validación de la ruta a 40km/h y 0% de pendiente

Tabla 23: Resultado de la validación de la ruta a 60km/h

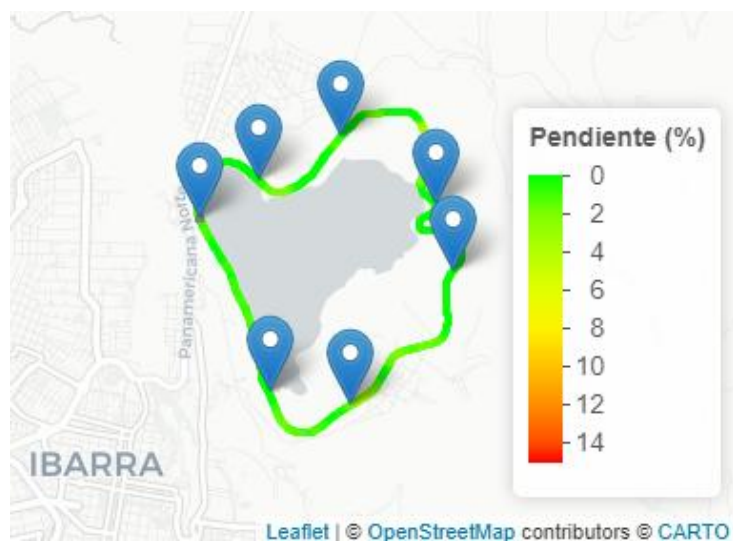
Potencia Promedio kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo kWh 100km	Autonomía km
3.3	1.6	182.5	7.9	135.5

Tabla 24: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	96
F. Rodadura (N)	77
F. Pendiente (N)	9.3

Tabla 25: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

Variable	Ruta	Al nivel del Mar
Altitud Maxima(m)	2230	0
Presión Atmosférica (kPa)	77.2	101.3
Disipación de Q (W)	529.3	622.9

**Ilustración 13.** Ruta en Yahuarcocha

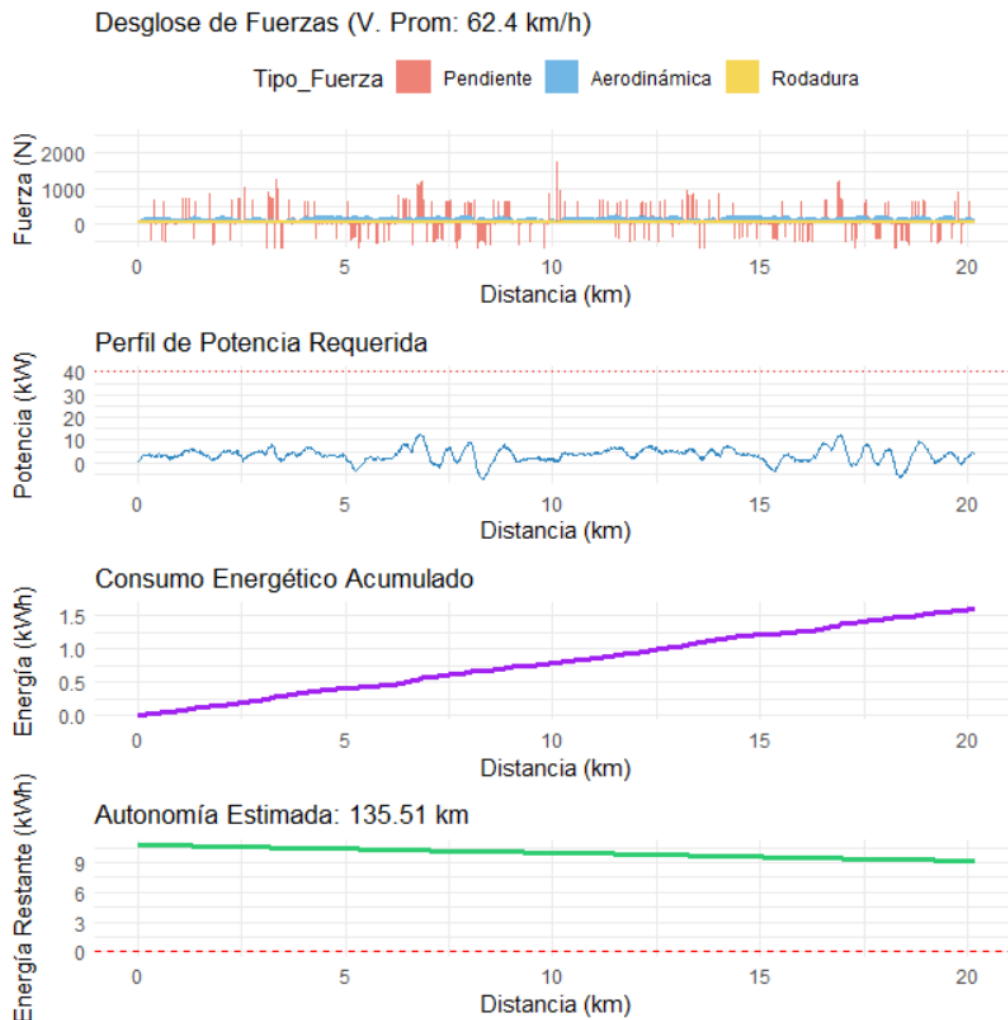


Ilustración 14. Validación de la ruta a 60km/h y 0% de pendiente

Tabla 26: Resultado de la validación de la ruta a 80km/h

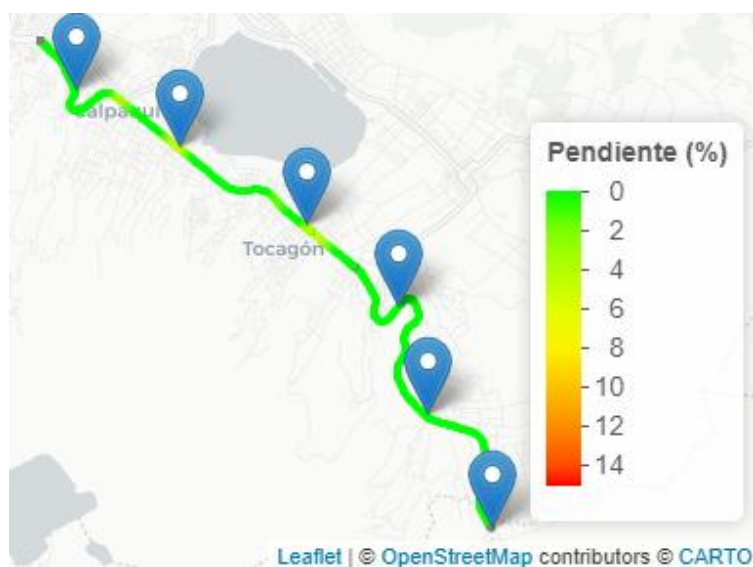
Potencia Promedio kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo kWh 100km	Autonomía km
-0.3	0.8	-62.8	5.2	204.1

Tabla 27: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	174.4
F. Rodadura (N)	76.6
F. Pendiente (N)	-313.9

Tabla 28: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

Variable	Ruta	Al nivel del Mar
Altitud Maxima(m)	3088	0
Presión Atmosférica (kPa)	69.3	101.3
Disipación de Q (W)	547.5	687.6

**Ilustración 15.** Ruta Redondel Cajas-Otavaló

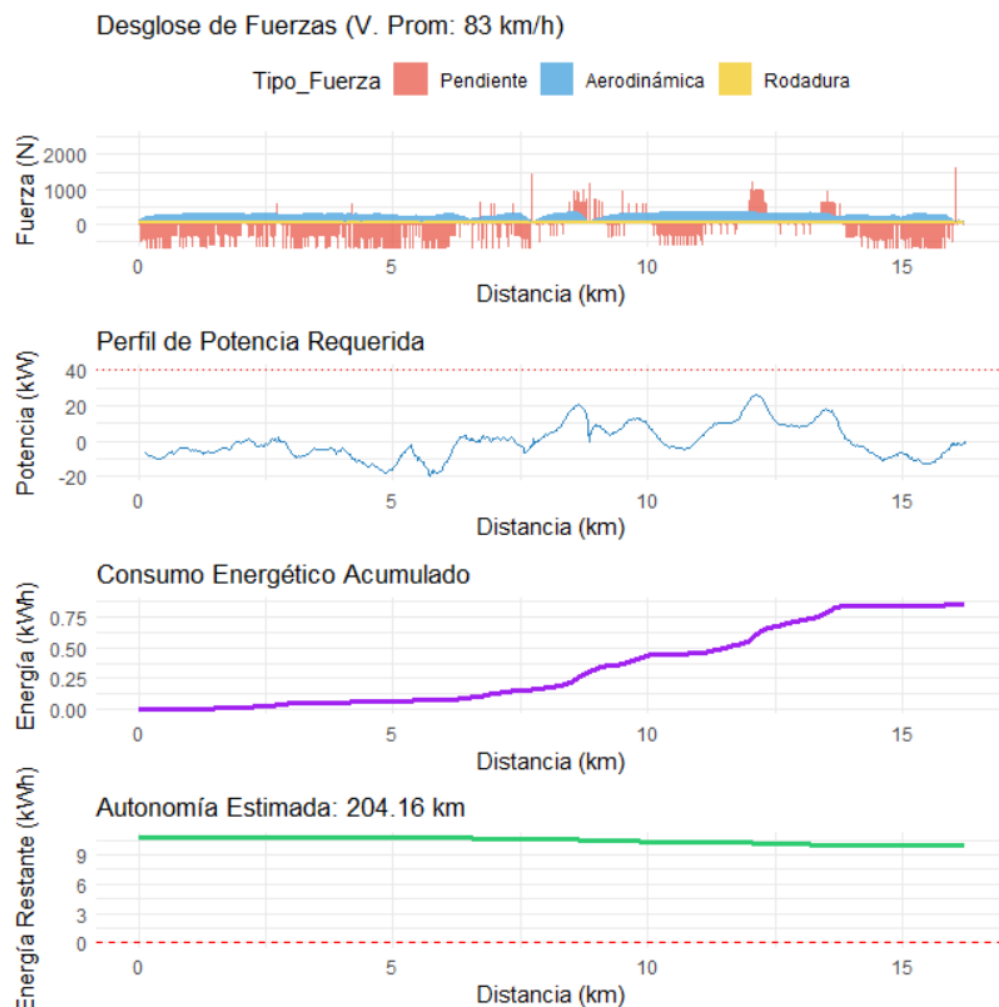


Ilustración 16. Validación de la ruta a 80km/h y 0% de pendiente

Potencia Requerida a 40, 60, 80km/h y $\leq 3.73\%$ de pendiente (Sin pendientes representativas Negativas)

Tabla 29: Resultado de la validación de la ruta a 40km/h.

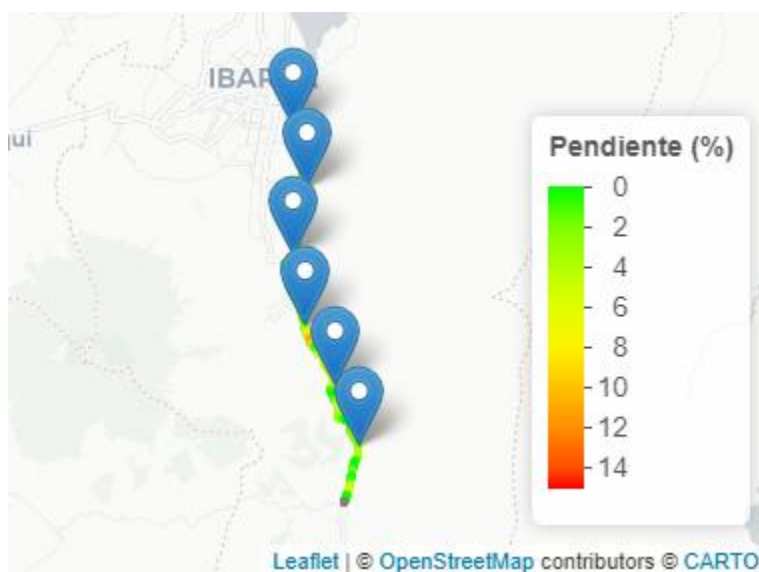
Potencia Promedio kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo kWh 100km	Autonomía km
5.8	3	455.6	17.4	61.8

Tabla 30: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	43.5
F. Rodadura (N)	76.8
F. Pendiente (N)	335.1

Tabla 31: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

Variable	Ruta	Al nivel del Mar
Altitud Maxima(m)	2896	0
Presión Atmosférica (kPa)	71	101.3
Disipación de Q (W)	437.5	541.5

**Ilustración 17.** Ruta Ibarra-Zuleta

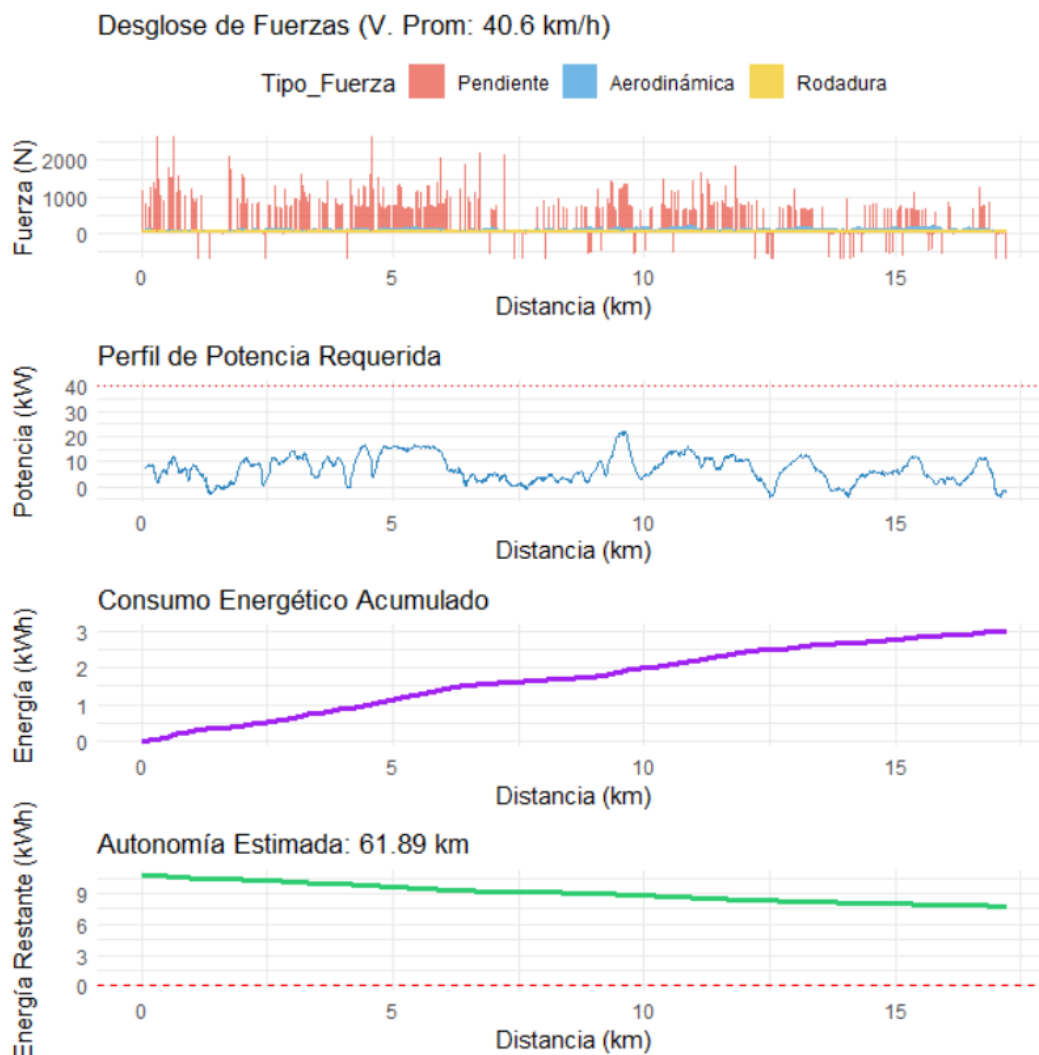


Ilustración 18. Validación de la ruta a 40km/h y 3.73% de pendiente

Tabla 32: Resultado de la validación de la ruta a 60km/h.

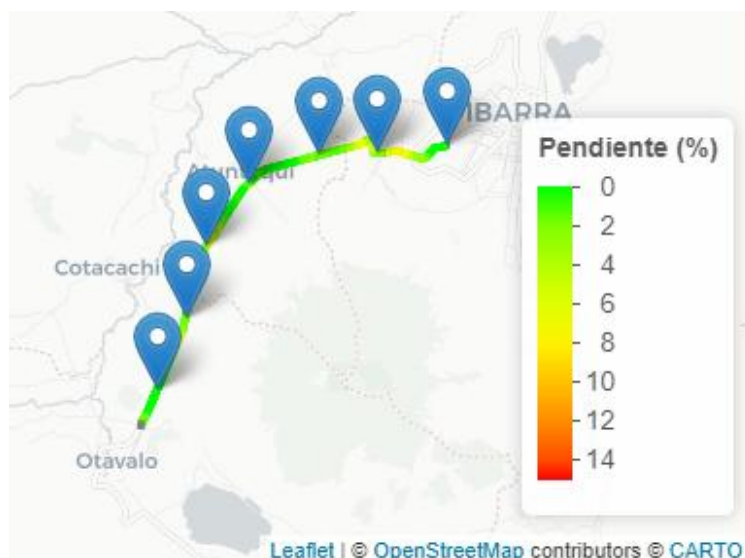
Potencia Promedio kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo kWh 100km	Autonomía km
7	2.6	297.4	13.5	79.9

Tabla 33: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	112.7
F. Rodadura (N)	76.2
F. Pendiente (N)	108.4

Tabla 34: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

Variable	Ruta	Al nivel del Mar
Altitud Maxima(m)	2582	0
Presión Atmosférica (kPa)	73.9	101.3
Disipación de Q (W)	517.7	625.6

**Ilustración 19.** Ruta Ibarra-Otavalo

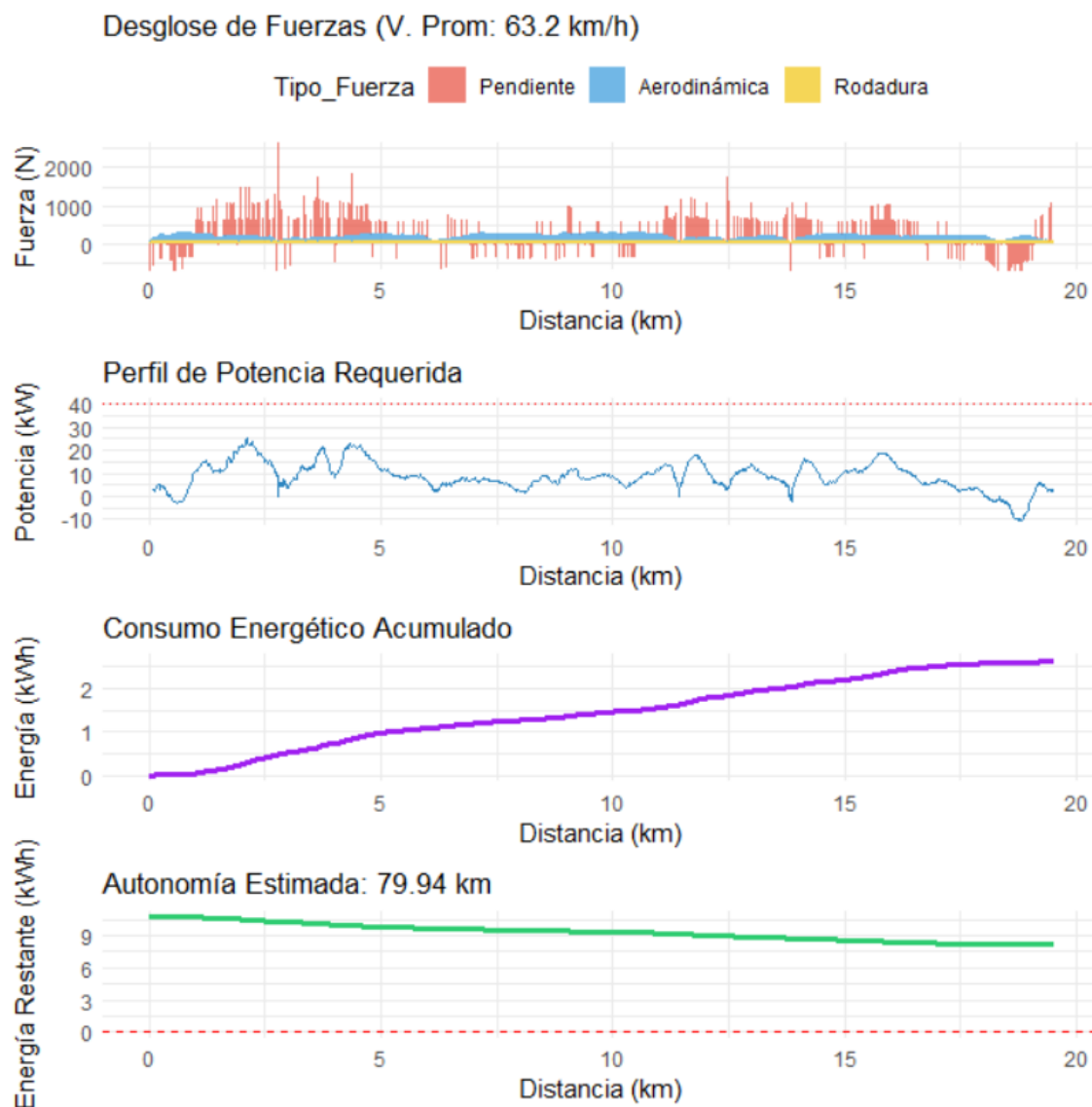


Ilustración 20. Validación de la ruta a 60km/h y 3.73% de pendiente

Tabla 35: Resultado de la validación de la ruta a 80km/h.

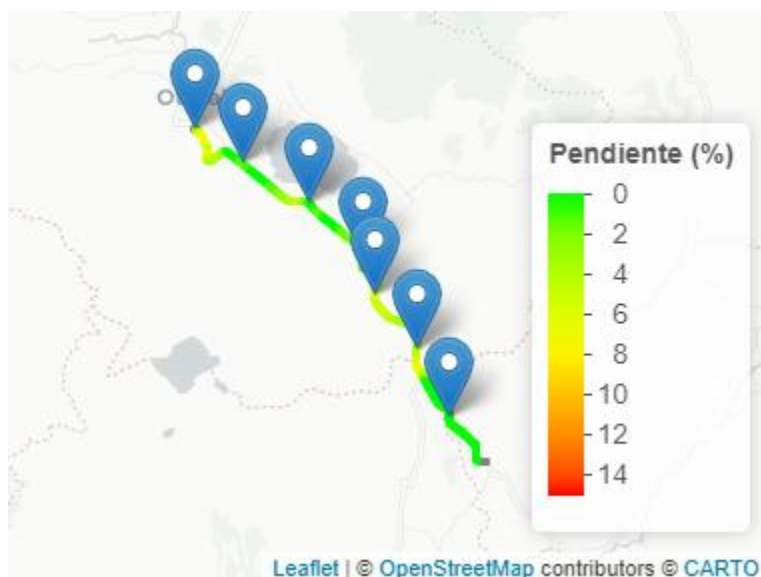
Potencia Promedio kW	Consumo Total kWh	Fuerza Motor N	Consumo Relativo kWh 100km	Autonomía km
10.4	3.2	365.8	15.8	68.1

Tabla 36: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

F. Aerodinámica (N)	175.1
F. Rodadura (N)	76.9
F. Pendiente (N)	113.7

Tabla 37: Desglose de Fuerzas de Resistencia (Promedio)

Variable	Ruta	Al nivel del Mar
Altitud Maxima(m)	3106	0
Presión Atmosférica (kPa)	77.2	101.3
Disipación de Q (W)	559	702.9

**Ilustración 21.** Otavalo-San Joaquin

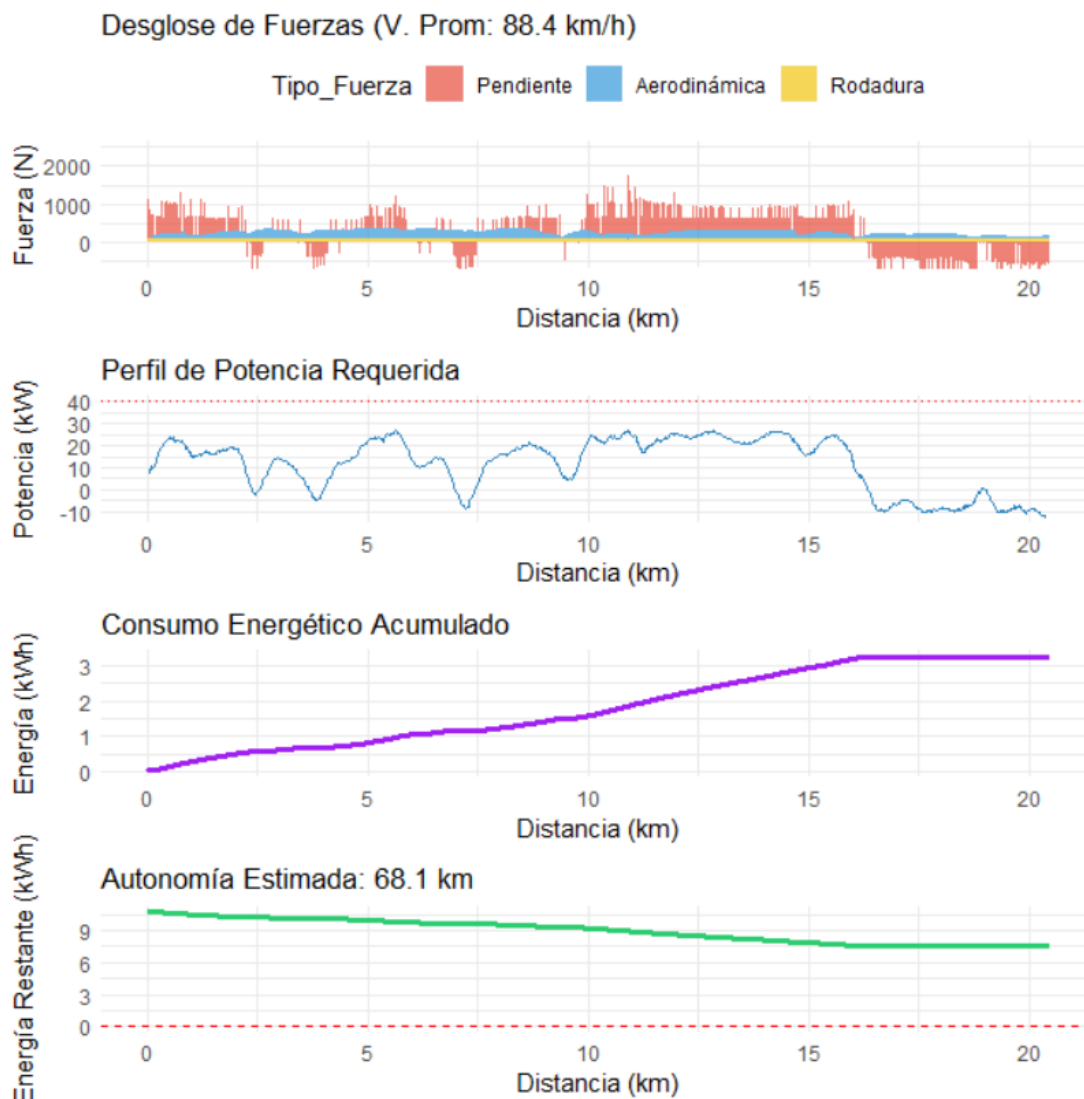


Ilustración 22. Validación de la ruta a 80km/h y 3.73% de pendiente

3.7 Análisis Comparativo

3.7.1 Procesamiento de Datos

Corrección de valores medidos:

Ajustar consumo energético a condiciones de funcionamiento a nivel del mar y en ciudades de altura para una comparación justa.

Cálculo de discrepancias:

$$\%Diferencia = \frac{Valor\ real - Valor\ teorico}{Valor\ teorico} \cdot 100$$

3.7.2 Factores Críticos de Discrepancia

Térmicos:

Efecto de la menor densidad del aire en refrigeración

Eléctricos:

Caída de voltaje por aumento de resistencia interna a bajas temperaturas

Aerodinámicos:

Impacto real vs. Teórico de la reducción de ρ en resistencia al avance.

3.7.3 Presentación de Resultados

Tabla 38: Comparación de Resultados de Autonomía de simulación y validación de la ruta.

Condición	Teórico (km)	Real (km)	Diferencia (%)
40 km/h (plano)	304.3	137.9	54.6
40 km/h (pendiente 3.73%)	71.2	61.8	13.2
60 km/h (plano)	241.1	135.5	43.7
60 km/h (pendiente 3.73%)	67.4	79.9	18.5
80 km/h (plano)	211.7	204.1	3.5
80 km/h (pendiente 3.73%)	65.1	68.1	4.6

Tabla 39: Comparación de Resultados de Consumo Relativo de simulación y validación de la ruta.

Condición	Teórico (kWh/100km)	Real (kWh/100km)	Diferencia (%)
40 km/h (plano)	3.55	7.8	122.8
40 km/h (pendiente 3.73%)	15.1	17.4	15.2
60 km/h (plano)	4.4	7.9	79.5
60 km/h (pendiente 3.73%)	16	13.5	15.6
80 km/h (plano)	5.1	5.2	1.9
80 km/h (pendiente 3.73%)	16.5	15.8	4.2

3. 8 Metodología para Diseñar una cámara de ventilación forzada por Aire para la Batería LiFePO₄

Herramientas:

Software ANSYS student

3.8.1 Definición de Requerimientos Técnicos

Rango térmico óptimo: Mantener la batería entre 25-50°C

Limitaciones del diseño:

Solo refrigeración por aire

Máxima uniformidad térmica permitida

3.8.2 Objetivo de la Simulación

El propósito del análisis mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) fue validar el diseño del sistema de enfriamiento por aire para el paquete de baterías LiFePO₄, verificando la eficiencia y determinando los puntos críticos de temperatura. El estudio excluye sistemas líquidos y se limita a ventilación forzada considerando la temperatura óptima de operación.

3.9 Pre-Procesamiento y Discretización del Dominio

3.9.1 Tratamiento de la Geometría

El modelo geométrico del paquete de baterías y de la cámara de refrigeración fue desarrollado inicialmente en SolidWorks. Para garantizar la interoperabilidad y evitar la pérdida de superficies durante la transferencia de datos, la geometría se exportó en formato Parasolid (.x_t).

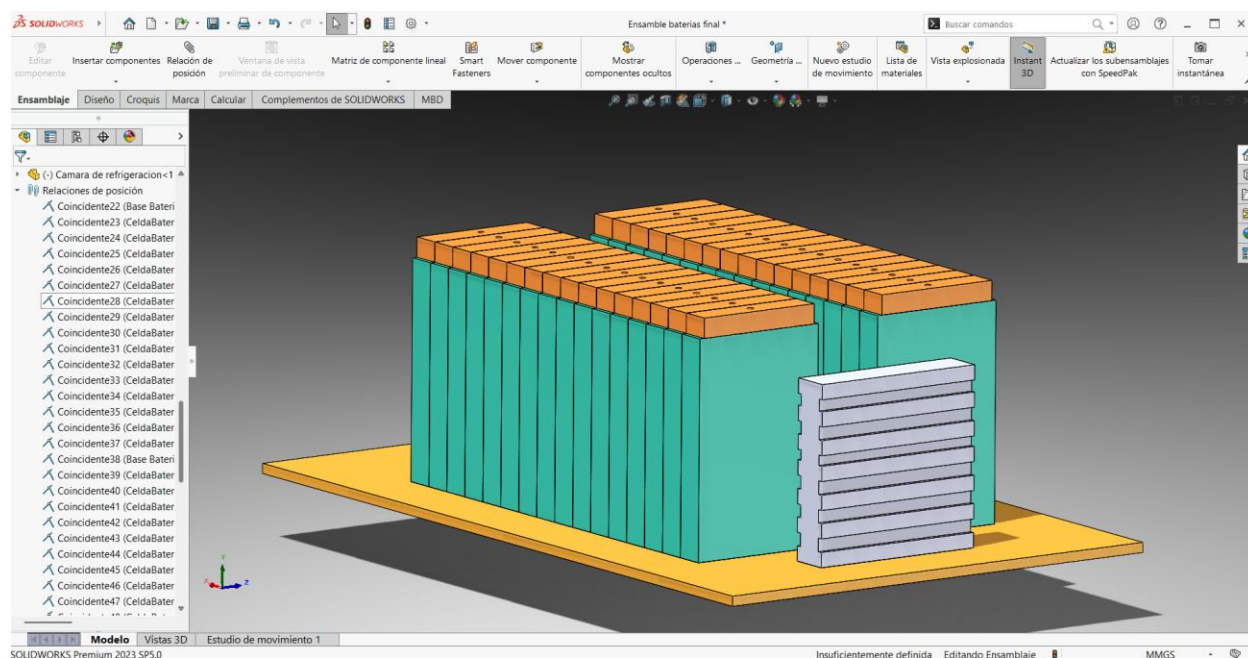


Ilustración 23. Modelado de la configuración del paquete de baterías

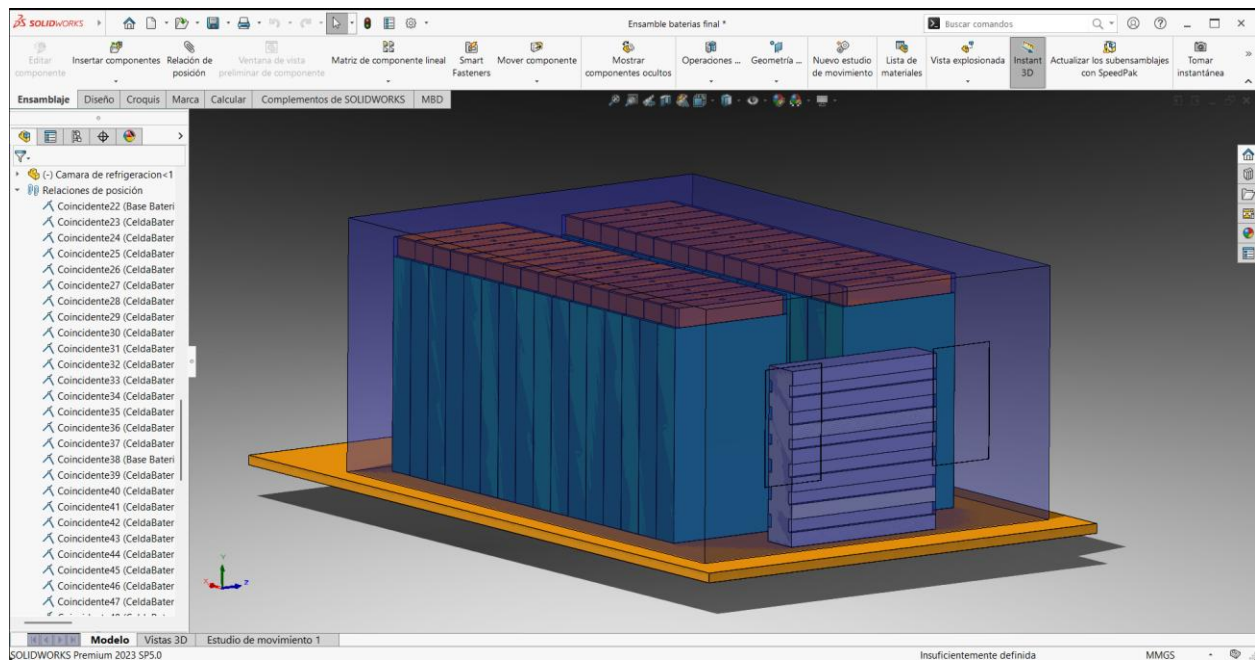


Ilustración 24. Modelado de la cámara de refrigeración del paquete

Posteriormente, se utilizó la herramienta ANSYS DesignModeler para el procesamiento del volumen de control. En esta etapa, se definió el cuerpo geométrico como “Fluid Zone” (Zona de Fluido), estableciendo explícitamente que el dominio de análisis corresponde al volumen de aire contenido entre el protector y las celdas, y no a un componente sólido estructural.

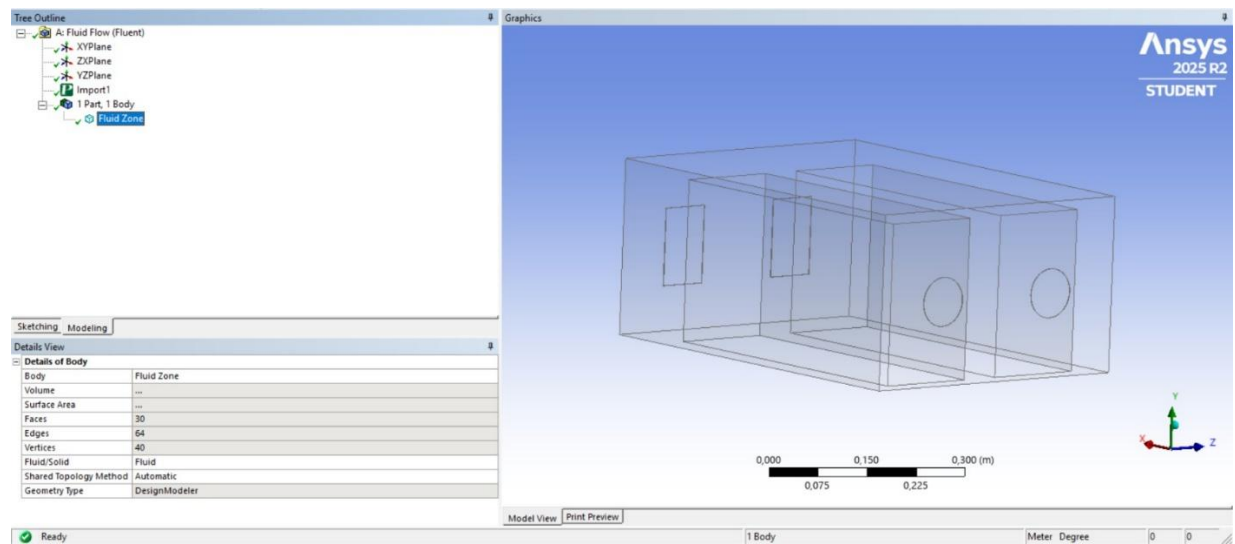


Ilustración 25. Delimitación del volumen de control del fluido (Aire)

3.9.2 Generación de la Malla (Meshing)

Se implementó una estrategia de mallado no estructurado optimizada para capturar los fenómenos de capa límite sin exceder las restricciones computacionales de la licencia académica.

- **Parámetros de Dimensionamiento:** Se estableció un tamaño máximo de elemento (Max Size) de 10 mm para el volumen general y un tamaño de elemento (Element Size) de 6 mm en las zonas de interés.
- **Calidad de Malla:** Se utilizó la métrica “Orthogonal Quality” para verificar la ortogonalidad de los elementos, asegurando la estabilidad numérica del solver.
- **Estadística Final:** La malla resultante consta de 174,738 nodos y 894,003 elementos. Esta densidad se mantuvo deliberadamente por debajo del límite de 1,000,000 celdas/nodos permitido por la versión estudiantil de ANSYS, logrando el máximo refinamiento posible dentro de las restricciones de software.
- **Definición de Fronteras:** Mediante la herramienta “Named Selections”, se etiquetaron las superficies críticas: entrada (Inlet), salida (Outlet) y paredes de las celdas (Cell Wall).

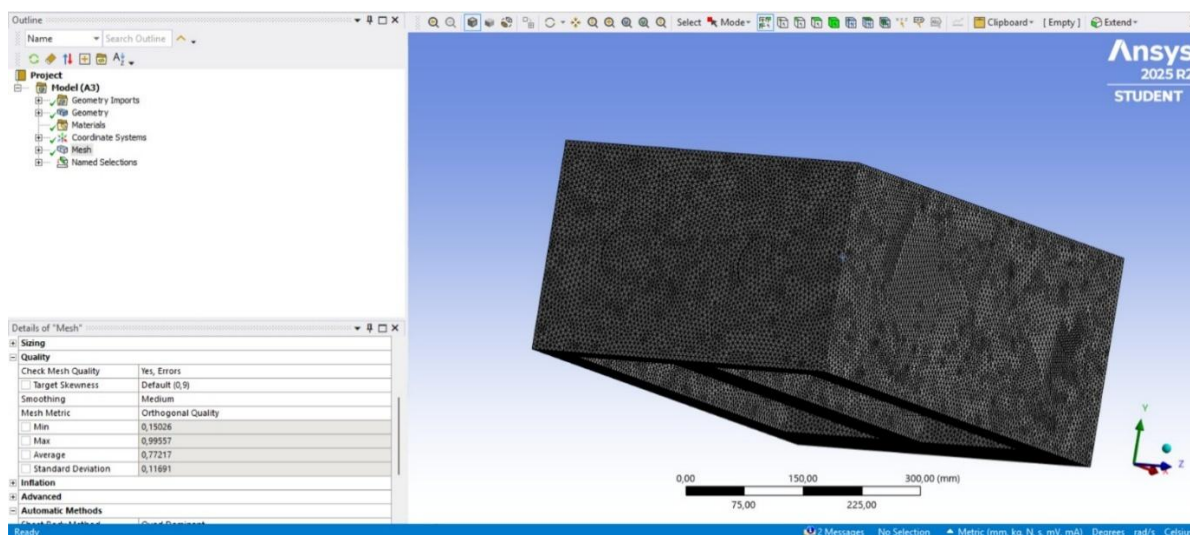


Ilustración 26. Mallado de la geometría

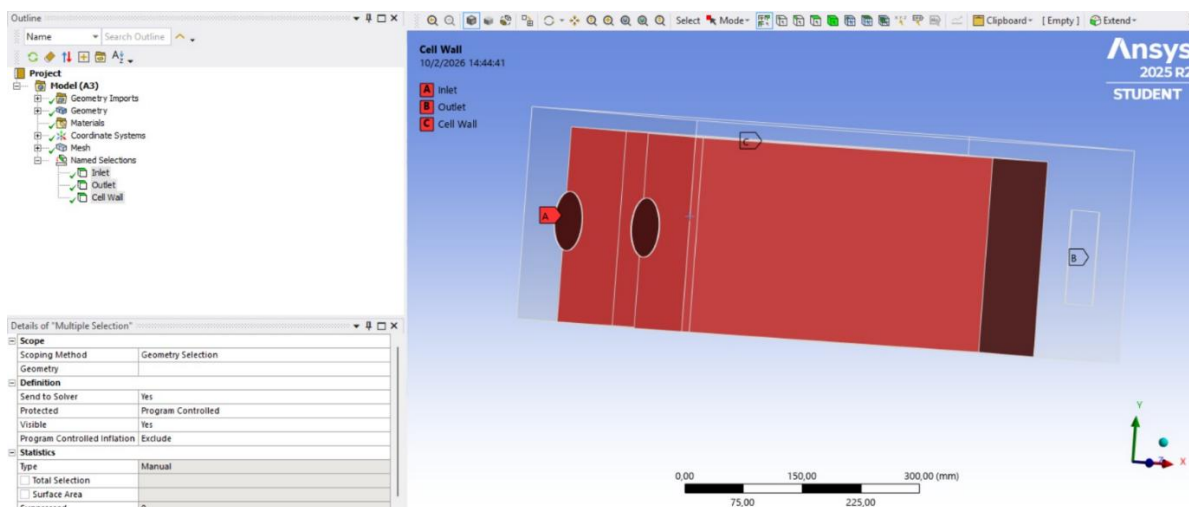


Ilustración 27. Definición de las condiciones de frontera de la proyección

3.10 Configuración del Solver (Setup)

El análisis se ejecutó en ANSYS Fluent 2025 utilizando procesamiento en paralelo con 4 núcleos y la opción de Doble Precisión (Double Precision) para minimizar errores de truncamiento en los cálculos térmicos.

3.10.1 Modelos Físicos y Gobernantes

- **Configuración General:** Se seleccionó un solver basado en presión (Pressure-Based) con formulación de velocidad absoluta. El análisis se definió como Transitorio (Transient) para evaluar la evolución temporal de la temperatura.
- **Fuerzas de Cuerpo:** Se activó la gravedad con un valor de -9.81 m/s^2 en el eje Y. Esta configuración es fundamental para considerar los efectos de flotabilidad (convección natural) que ocurren cuando el aire se calienta y tiende a ascender dentro de la cámara de refrigeración.
- **Ecuación de Energía:** Se habilitó el modelo de energía para resolver el transporte de calor en el fluido.
- **Importancia de la Convección de Gases:** La transferencia de calor en este sistema es gobernada primordialmente por la convección. Para capturar con precisión el efecto de la altitud, el fluido (aire) fue modelado utilizando la ley de los gases ideales incompresibles (incompressible-ideal-gas) en lugar de una densidad constante. Esto permite que el solver calcule dinámicamente la densidad local en función de la temperatura y la Presión de Operación (Operating Pressure).

La eficiencia de este proceso depende directamente de la densidad del fluido; por tanto, el estudio de la convección es vital para predecir cómo el cambio de masa de aire por unidad de volumen afecta la tasa de enfriamiento en diferentes condiciones atmosféricas.

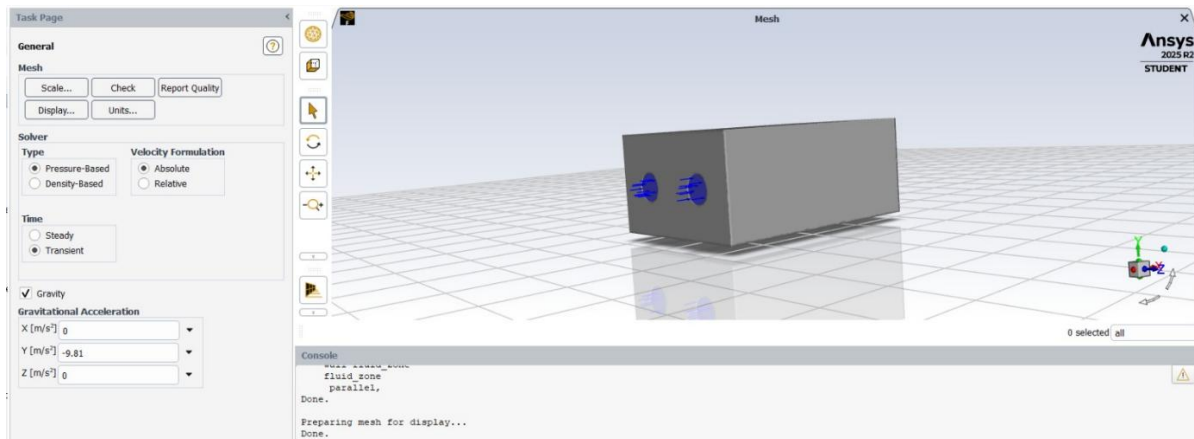


Ilustración 28. Modelo Físico para la inclusión de variables

3.10.2 Modelo de Turbulencia

Se seleccionó el modelo k-epsilon (2 eqn) Standard debido a su robustez validada en la industria automotriz para flujos confinados.

- **Tratamiento de Pared:** Se implementó el “Enhanced Wall Treatment” (Tratamiento de Pared Mejorado). Esta elección técnica permite resolver la subcapa viscosa del fluido, que es la región crítica donde ocurre el intercambio de calor entre la superficie de la celda y el aire.
- **Efectos Térmicos y Curvatura:** Se activaron las opciones “Thermal Effects” y “Curvature Correction” (constante = 1). Esto justifica la necesidad de predecir correctamente cómo el flujo se adhiere o se separa al rodear la geometría prismática de las celdas.

Ilustración 29. Parámetros Variables para la simulación

3.11 Condiciones de Contorno (Boundary Conditions)

Las condiciones de frontera se definieron para replicar un escenario operativo de carga nominal:

1. Inlet (Entrada): Se configuró como “Velocity Inlet” con una magnitud de 1 m/s normal a la frontera, considerando este flujo de aire para evaluar el comportamiento bajo velocidades críticas y temperaturas críticas del sistema. La temperatura del aire entrante se fijó en 288.15 K (15°C), simulando condiciones ambientales promedio. La turbulencia se definió con una intensidad del 5% y una relación de viscosidad de 10.
2. Outlet (Salida): Se definió como “Pressure Outlet” con una presión manométrica de 0 Pa, representando una descarga libre a la atmósfera.
3. Cell Wall (Paredes de Celda): Se estableció una condición de pared con temperatura fija de 315.15 K (42°C), ya que esta fue la temperatura máxima alcanzada por las baterías durante pruebas reales. Esta condición representa la temperatura objetivo de la batería bajo carga, permitiendo evaluar si el flujo de aire es capaz de remover el calor generado a esa temperatura superficial.

4. **Propiedades del Material:** Para analizar el impacto de la altitud en la convección, se modificó la Presión de Operación (Operating Pressure) del sistema, lo que bajo el modelo de gas ideal incompresible generó tres escenarios de densidad exactos:

- **Caso Nivel del Mar:** Presión de operación de 101325 Pa, resultando en una densidad del aire de 1.225 kg/m^3 .
- **Caso Ibarra (2200 msnm):** Presión de operación de 78100 Pa, resultando en una densidad del aire de 0.934 kg/m^3 .
- **Caso Zuleta (2800 msnm):** Presión de operación de 71700 Pa, resultando en una densidad del aire de 0.859 kg/m^3 .

3.12 Solución y Control Temporal

- **Inicialización:** Se utilizó una inicialización estándar computada desde el Inlet, con un marco de referencia relativo a la zona de celdas.
- **Esquema Temporal:** La simulación se configuró para un tiempo físico total de 1200 segundos.

Number of Time Steps: 1200

Time Step Size: 1 s

Max Iterations/Time Step: 5

Un paso de tiempo de 1 segundo con 5 iteraciones internas garantiza que los residuos de las ecuaciones de momento y energía converjan adecuadamente en cada paso, asegurando la estabilidad numérica del análisis transitorio.

La resolución de los escenarios a nivel del mar, Zuleta e Ibarra se realizó de manera independiente, permitiendo comparar cómo la variación en la masa de aire circulante influye en la estabilidad térmica de las baterías LiFePO_4 bajo las mismas condiciones de diseño.

3.13 Post-Procesamiento y Visualización de Resultados

Para la extracción e interpretación de los resultados, se utilizaron reportes numéricos directos del solver (Surface Integrals) y el módulo CFD-Post:

1. **Criterios de Extracción de Datos:** Para la evaluación térmica de las paredes de las celdas y del fluido, se utilizó la variable Temperatura Estática (Static Temperature), ya que a bajas velocidades representa la energía térmica real sin los efectos de compresibilidad. Asimismo, para identificar los picos de temperatura, se empleó el criterio Facet Maximum, el cual promedia los valores en la cara de los elementos de la malla, brindando una lectura robusta y evitando singularidades numéricas en los nodos.

2. **Renderizado Volumétrico:** Se creó una visualización de volumen (Volume Rendering) de la variable Temperatura en todo el dominio. Se aplicó un rango de transparencia (0.2) y una resolución de 150 puntos, configurando el rango de color desde 288.15 K (transparente) hasta 315.15 K (opaco). Esto permite identificar visualmente las zonas de estancamiento térmico tridimensional.

3. **Líneas de Corriente (Streamlines):** Se generaron 2000 líneas de flujo partiendo desde el Inlet, mapeando las variables de velocidad y temperatura. Esta técnica permite validar la dirección del flujo (“Forward”) y confirmar que el aire se distribuye uniformemente sobre el paquete de baterías.

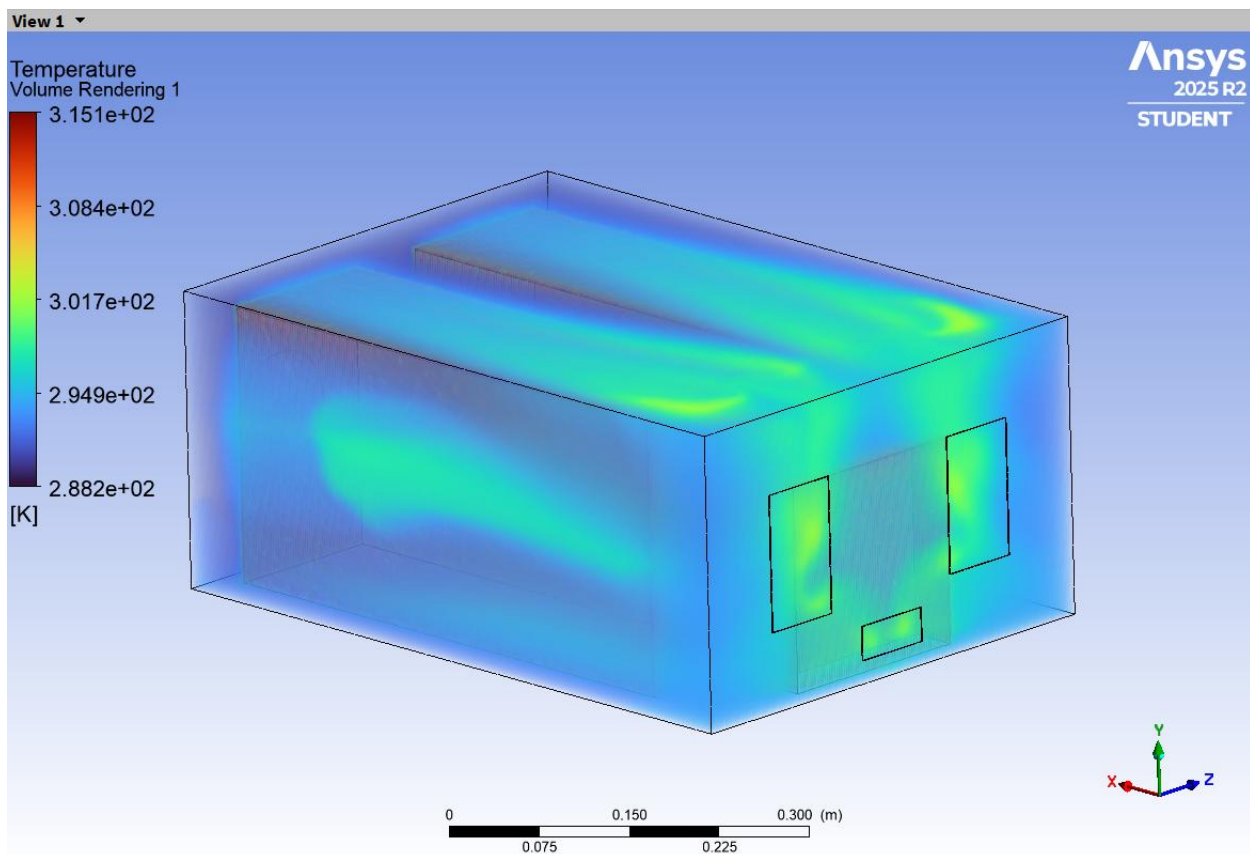


Ilustración 30. Renderizado Volumétrico, Escenario a Nivel del mar @0msnm

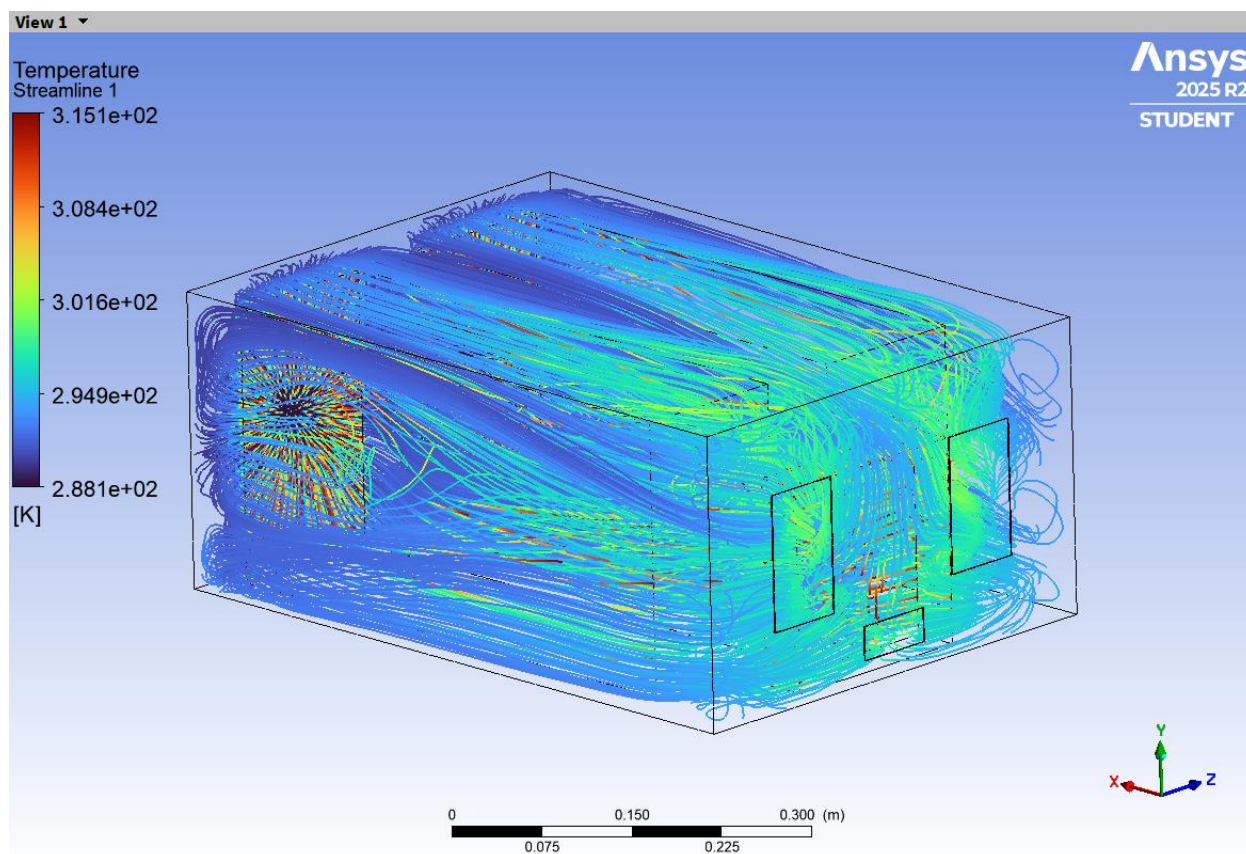


Ilustración 31. Líneas de corriente del fluido (Aire), Escenario a Nivel del mar @0msnm

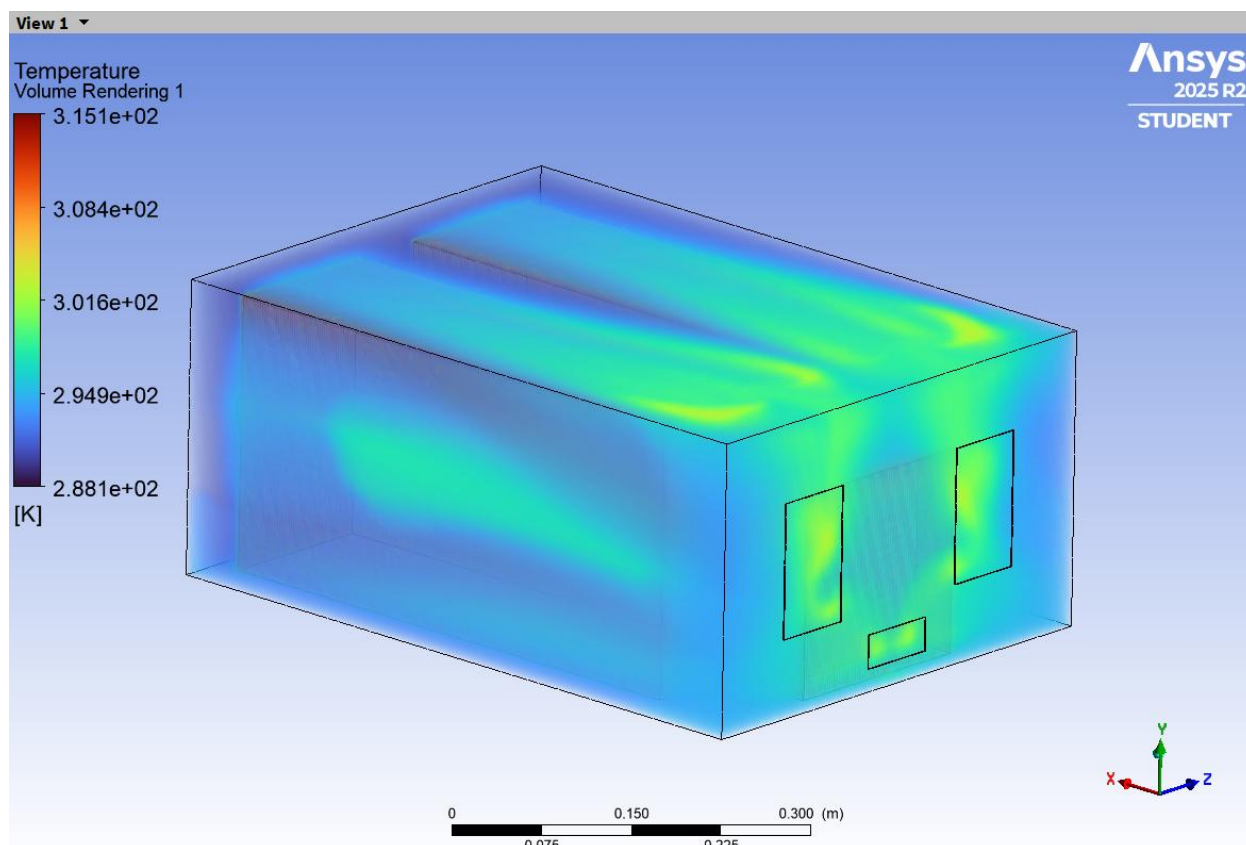


Ilustración 32. Renderizado Volumétrico Escenario Ibarra@2200msnm

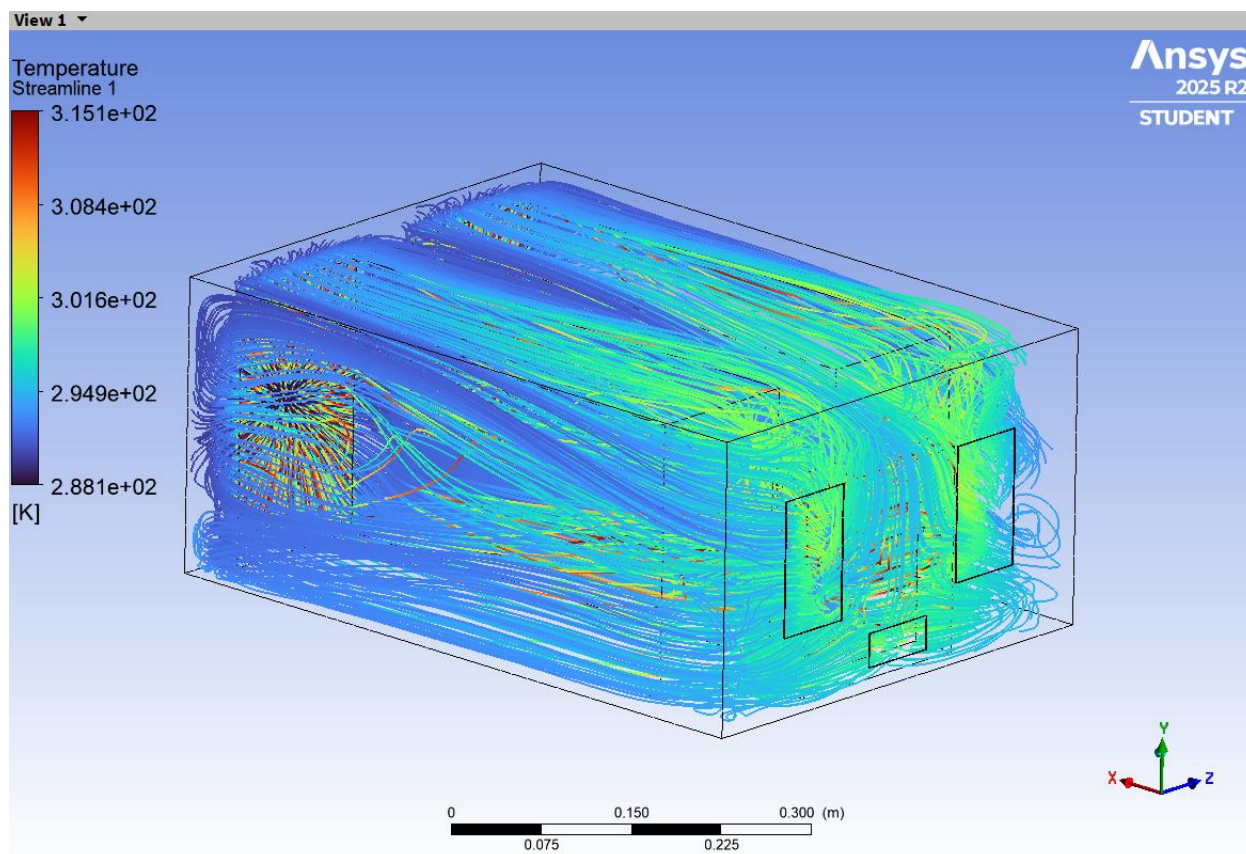


Ilustración 33. Renderizado Volumétrico Escenario Ibarra@2200msnm

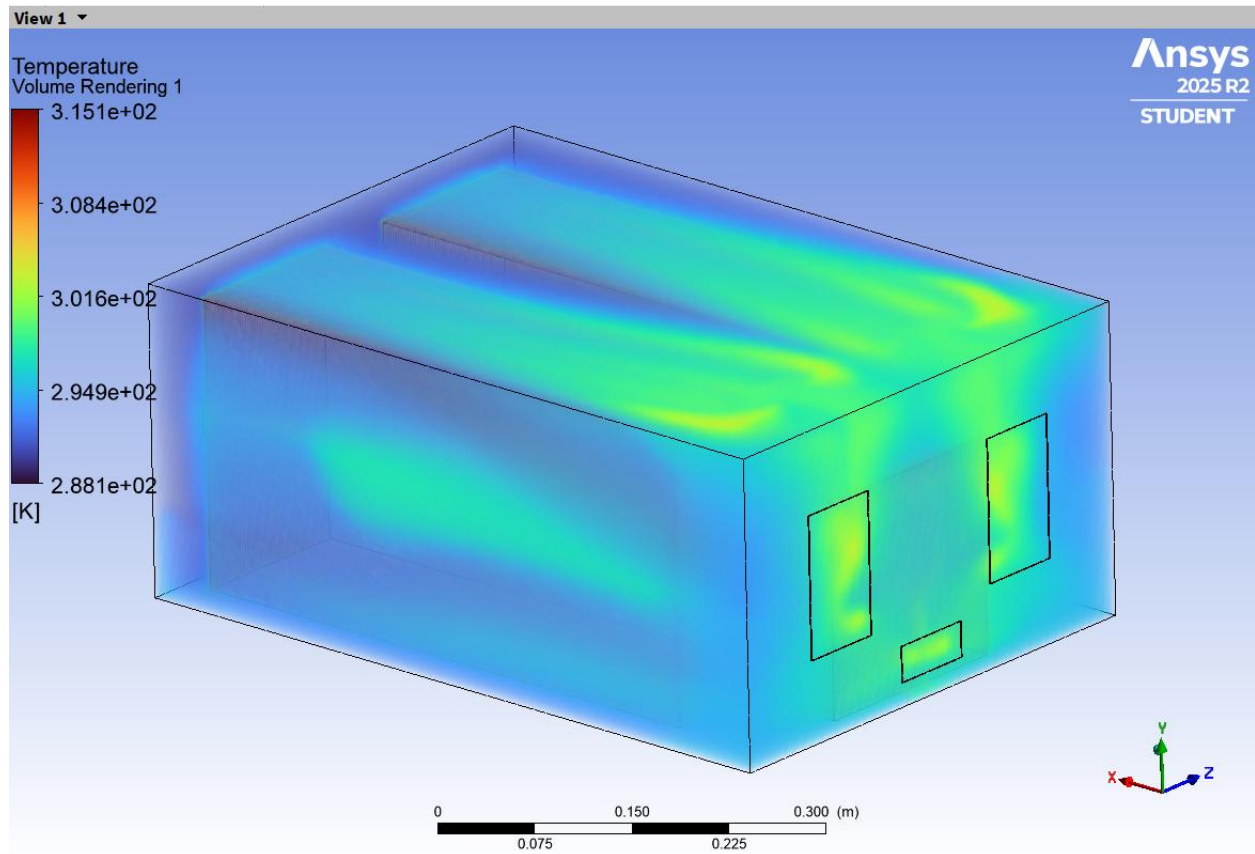


Ilustración 34. Renderizado Volumétrico Escenario Zuleta@2800msnm

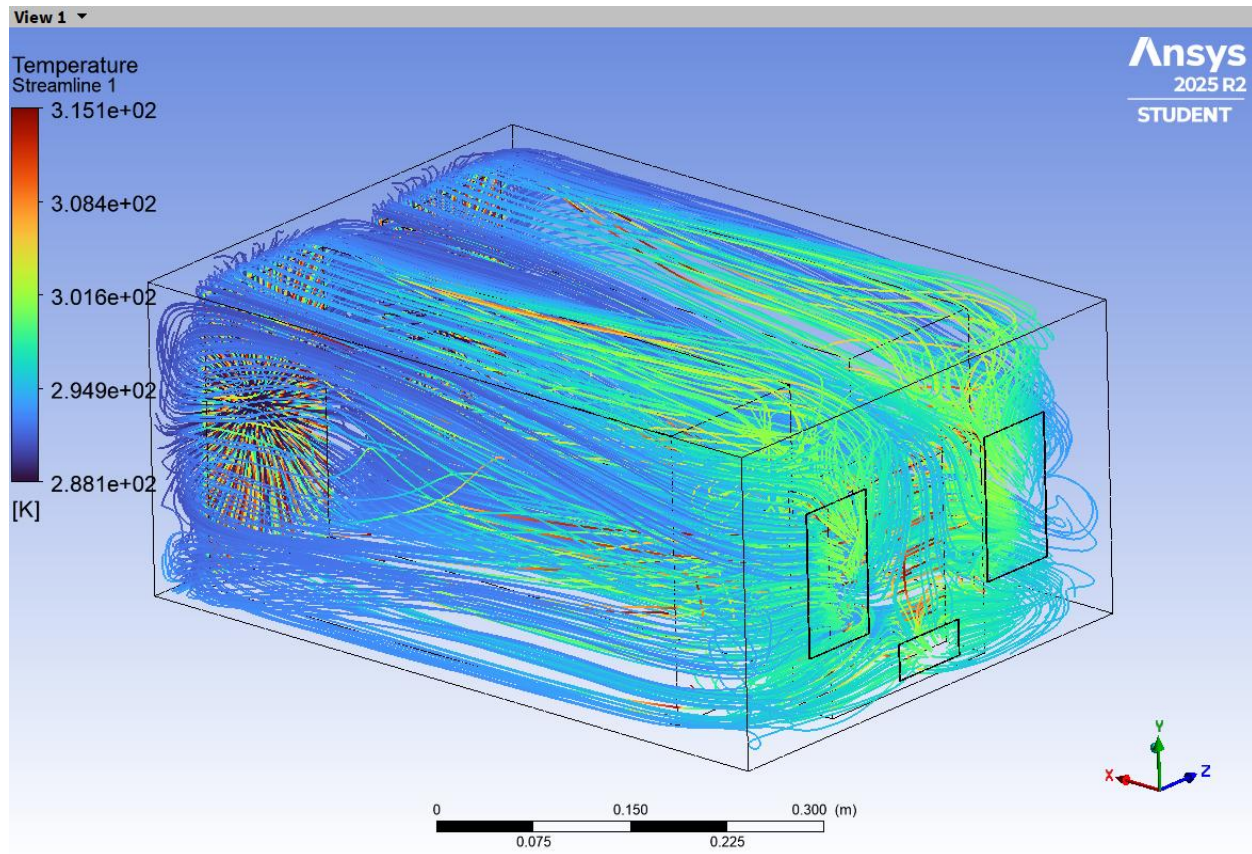


Ilustración 35. Renderizado Volumétrico Escenario Zuleta@2800msnm

Comparación de Escenarios: Ibarra vs. Zuleta

Tras ejecutar las simulaciones transitorias para los entornos geográficos, se procedió a contrastar el comportamiento térmico del paquete de baterías LiFePO_4 . La variable fundamental de control fue la densidad del aire, manteniendo constantes la velocidad de entrada (1 m/s) y la generación de calor superficial (315.15 K).

Impacto de la Densidad en la Transferencia de Calor

La comparación de los resultados arroja una diferencia directa en la capacidad de remoción de calor por convección forzada:

Tabla 40 Tabla comparación de resultados a Nivel del mar vs Ibarra vs Zuleta

Parámetro Evaluado	Nivel del Mar (0 msnm)	Ibarra (2200 msnm)	Zuleta (2800 msnm)	Variación % (Mar vs. Zuleta)
Presión Operativa	101325 Pa	78100 Pa	71700 Pa	-29.24 %
Densidad del Aire	1.225 kg/m ³	0.934 kg/m ³	0.859 kg/m ³	-29.87 %
Flujo Volumétrico (Salida)	0.01617 m ³ /s	0.01621 m ³ /s	0.01623 m ³ /s	+0.37 %
Temperatura Estática Promedio (Neto del Fluido)	30.28 °C (303.43 K)	30.56 °C (303.71 K)	30.66 °C (303.81 K)	+0.125 % (+0.38 °C)
Temp. Estática a la Salida (Outlet)	28.36 °C (301.51 K)	29.39 °C (302.54 K)	29.83 °C (302.98 K)	+0.487 % (+1.47 °C)
Temperatura Máxima (Observada)	28 °C (301 K)	32 °C (305 K)	35 °C (308 K)	+2.33 % (+7 °C)
Temperatura Predominante	19 °C - 21 °C (292 K - 294 K)	21 °C - 23 °C (294 - 296 K)	23 °C - 25 °C (296 K - 298 K)	+1.36% (4 °C)
Zonas de Estancamiento Térmico	Mínimas	Moderadas	Alta	Acumulación por baja densidad
Eficiencia Térmica Convectiva	Óptima	Aceptable	Reducida	Pérdida de capacidad convectiva

CAPITULO IV

4.1 RESULTADOS Y DISCUSION

En la evaluación de las características técnicas teóricas del vehículo convertido con baterías LiFePO₄, los resultados del modelo matemático revelan que el rendimiento óptimo se alcanza a una velocidad de 40 km/h en terreno plano, logrando una autonomía máxima de 304 km con un consumo energético de 3.5 kWh/100 km. A medida que la velocidad aumenta a 60 km/h y 80 km/h, la autonomía disminuye gradualmente a 241 km y 211 km respectivamente, mientras que el consumo se eleva hasta los 5.1 kWh/100 km. Bajo estas condiciones, la velocidad máxima

alcanzable se sitúa en 168.3 km/h, siendo la fuerza de rodadura de 77.2 N el factor de resistencia más significativo en todos los rangos de velocidad sin inclinación.

Al introducir el análisis en pendientes específicas del 3.73%, el comportamiento teórico muestra una alteración drástica en la demanda energética. La fuerza por pendiente se convierte en el factor dominante con 359.8 N, lo que reduce la velocidad máxima a 142.2 km/h. En este escenario, la autonomía se ve severamente limitada, cayendo a un rango de entre 71 km y 65 km según la velocidad de operación. El consumo energético en estas pendientes se incrementa de manera notable, alcanzando un máximo de 16.5 kWh/100 km a una velocidad de 80 km/h, lo que evidencia la alta sensibilidad del sistema de almacenamiento LiFePO_4 ante el esfuerzo de tracción en elevaciones.

En la comparación del rendimiento teórico frente al real en condiciones de altura, se observan discrepancias que definen las limitaciones del estudio matemático. Mientras que la teoría proyecta una autonomía de 304 km a baja velocidad, las pruebas reales en trayectos GPS reportan únicamente 137 km, lo que representa una brecha de eficiencia que el modelo ideal no logra capturar. No obstante, en las pruebas reales a alta velocidad (80 km/h), la autonomía registrada de 204 km supera significativamente a la obtenida en velocidades bajas, sugiriendo un punto de mayor eficiencia operativa en el tren motriz real que difiere de la progresión lineal teórica.

Finalmente, el análisis de las fuerzas de resistencia destaca que, en condiciones reales y de altura, la fuerza aerodinámica adquiere una relevancia que la teoría subestima. A 80 km/h, el valor real de resistencia aerodinámica alcanza los 174.4 N, superando a la fuerza de rodadura y convirtiéndose en la principal causa de consumo energético. En situaciones de pendiente real, el consumo relativo llega a los 17.4 kWh/100 km, superando los 15.1 kWh/100 km estimados teóricamente. Estas diferencias confirman que las limitaciones del estudio teórico radican en la simplificación de factores ambientales y mecánicos que, en condiciones reales de altura, impactan directamente en la autonomía y la gestión de energía del vehículo.

En alineación con el objetivo de diseñar un sistema de refrigeración limitado de captación por aire (excluyendo sistemas de refrigeración líquida), la simulación transitoria de 1200 segundos permitió evaluar el comportamiento térmico del paquete de baterías LiFePO_4 . Considerando que las celdas generan una temperatura superficial crítica de 42 °C (315.15 K) evidenciada en pruebas reales, y bajo un flujo de aire forzado de entrada de 1 m/s, el diseño de la cámara de ventilación demostró ser capaz de estabilizar la temperatura del sistema. Sin embargo, la eficiencia del enfriamiento presentó variaciones drásticas dependiendo del entorno geográfico.

El análisis comparativo entre el Nivel del Mar (0 msnm), Ibarra (2200 msnm) y Zuleta (2800 msnm) validó mediante el modelo de gas ideal incompresible que la densidad del aire es el factor físico más limitante en la transferencia de calor por convección forzada en vehículos eléctricos.

Aunque la geometría de las entradas de aire y el ventilador mantuvieron un flujo volumétrico de salida prácticamente constante en los tres escenarios (aproximadamente $-0.016 \text{ m}^3/\text{s}$), la caída de la presión atmosférica redujo significativamente la masa de aire disponible para absorber energía.

Al pasar del nivel del mar (1.225 kg/m^3) a Zuleta (0.859 kg/m^3), el sistema sufrió una pérdida del 29.87% en la densidad del fluido.

Esta reducción másica provocó que, en zonas de alta montaña, el aire se saturara térmicamente con mayor rapidez. Mientras que al nivel del mar la temperatura predominante del volumen de aire osciló en un rango frío de 19°C a 21°C , en Ibarra (0.934 kg/m^3) aumentó a un rango templado (21°C - 23°C), y en Zuleta ascendió a un rango de 23°C a 25°C .

Adicionalmente, debido a la activación de la gravedad y la consideración del efecto de convección natural, las simulaciones de altura revelaron la formación de zonas de estancamiento térmico severo. En el escenario de Zuleta, el aire calentado, al ser menos denso, tendió a acumularse en la parte superior posterior de la cámara de ventilación. La falta de una vía de escape superior en el diseño original provocó que esta bolsa de aire caliente elevara la temperatura máxima observada del fluido hasta los 35°C una variación de $+2.33$ (7°C) respecto a los picos observados en el nivel del mar).

A pesar de la evidente pérdida de eficiencia convectiva inducida por la altitud en la Sierra ecuatoriana, el diseño base de la cámara de captación logró su objetivo primario: canalizar el aire eficientemente y evitar que las baterías superaran sus límites operativos críticos de destrucción. No obstante, los resultados demuestran que para operar de manera óptima en regiones con densidades de aire tan bajas como Zuleta (0.859 kg/m^3), el diseño actual de ventilación requiere modificaciones geométricas orientadas a evacuar el aire estancado por convección natural, maximizando así la remoción de calor.

CAPITULO V

5.1 Conclusiones

Se concluye que la batería LiFePO_4 presenta un desempeño óptimo en condiciones de velocidad constante y terreno nivelado, donde la demanda energética es mínima. Sin embargo, su autonomía es altamente sensible a los factores de resistencia externa. El estudio teórico permite identificar que el incremento de la velocidad y, especialmente, la presencia de pendientes pronunciadas, alteran drásticamente el flujo energético, limitando la capacidad de operación del vehículo y reduciendo su techo de velocidad máxima debido a la carga impuesta al sistema motriz.

El análisis comparativo demuestra que los modelos teóricos tienden a sobreestimar significativamente la autonomía del vehículo al no considerar las ineficiencias dinámicas del entorno real. Se concluye que, en condiciones de altura, la resistencia aerodinámica real cobra una relevancia mayor a la prevista, llegando a desplazar a la rodadura como principal fuerza opositora en altas velocidades. Además, la discrepancia entre ambos modelos subraya que las limitaciones del estudio teórico radican en la omisión de pérdidas térmicas, mecánicas y la variabilidad de las condiciones geográficas locales.

Se concluye que el diseño de ventilación forzada es una solución mecánicamente viable para mantener la batería LiFePO_4 dentro de márgenes operativos seguros, resultando superior frente a la complejidad, peso y costo de la refrigeración líquida en conversiones de vehículos eléctricos. Utilizando una velocidad crítica de entrada de 1 m/s, el sistema demostró ser capaz de remover el calor generado a 42 °C.

Se comprobó que la presión atmosférica y la consecuente densidad del aire son los factores limitantes absolutos en la eficiencia de la transferencia de calor convectiva. Al evaluar el gradiente topográfico, la reducción de la densidad del aire en un 29.87% (desde 1.225 kg/m³ a nivel del mar hasta 0.859 kg/m³ en Zuleta) disminuyó drásticamente la masa de aire circulante. Esta menor capacidad de absorción térmica por unidad de volumen explica el incremento del 1.36% en la temperatura predominante del fluido interno en la alta montaña.

Las simulaciones transitorias de 1200 segundos revelaron que, en altitudes elevadas como Zuleta (2800 msnm), el aire se satura térmicamente alcanzando los 35 °C un aumento del 2.33% respecto a las temperaturas de escape a nivel del mar. A pesar de esto, el diseño mecánico demostró robustez al mantener la temperatura predominante entre los 25°C bajo las condiciones más críticas, evitando el embalamiento térmico del paquete.

Contrario a un flujo ideal, el análisis tridimensional evidenció la formación de zonas de estancamiento térmico en la parte superior posterior del gabinete, debido a los escenarios de altura. Debido al efecto de convección natural, el aire caliente pierde densidad y asciende, quedando atrapado al no contar el diseño original con vías de escape superiores, lo que concentra el calor sobre las celdas de la fila trasera.

Se concluye que las zonas de estancamiento térmico obtenidas mediante la simulación en Ansys Fluent (especialmente en condiciones de baja densidad de aire a 2800 msnm, como en Zuleta) representan un criterio de riesgo directo para el SOH de la batería LiFePO_4 . La acumulación de calor por convección natural en la parte superior trasera de la cámara de ventilación produce un gradiente de temperatura no uniforme entre las celdas. La no uniformidad térmica se traduce, a su vez, en la aceleración de la degradación electroquímica localizada de los módulos traseros, que, transcurrido un determinado período de tiempo, genera desbalances de voltaje que afectarán la precisión en la estimación del SOC por parte del BMS, reduciendo la capacidad útil real del vehículo frente a las exigencias topográficas.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda considerar la implementación de sistemas de gestión térmica y de energía que mitiguen el impacto del consumo elevado en pendientes. Dado que el terreno inclinado es el factor que más penaliza la autonomía, es fundamental orientar el uso del vehículo hacia rutas que permitan una regeneración de energía o mantener velocidades moderadas para preservar la integridad y longevidad del paquete de baterías LiFePO_4 en entornos geográficos complejos.

Se recomienda profundizar en el estudio de los coeficientes de arrastre específicos para vehículos convertidos en condiciones de altura, ya que los valores estándar no reflejan el comportamiento real observado. Asimismo, para reducir la brecha entre la teoría y la práctica, se sugiere integrar

en el modelo matemático variables de eficiencia del tren motriz y accesorios eléctricos, lo que permitirá obtener proyecciones de autonomía mucho más cercanas a la realidad operativa del vehículo en el entorno local.

Como recomendación principal derivada del análisis de volumen de control, se aconseja modificar la geometría de la cámara de ventilación incorporando rejillas de salida en la pared posterior, ubicadas en el borde superior. Esta modificación aprovechará la convección natural para evacuar eficientemente el aire caliente estancado, mejorando la uniformidad térmica del paquete en la Sierra ecuatoriana.

Basado en el mapeo térmico y las zonas de estancamiento detectadas, se recomienda instalar los sensores de temperatura del Sistema de Gestión de Baterías (BMS) específicamente en las celdas de las filas posteriores y en la zona superior del gabinete. Al ser el punto de mayor saturación térmica en condiciones de baja densidad, es la ubicación ideal para detectar alertas tempranas de sobrecalentamiento.

Para futuras iteraciones de diseño o conversiones de vehículos destinados a operar exclusivamente en ciudades de altura (por encima de los 2500 msnm), se recomienda evaluar un incremento en el área de la cámara de ventilación forzada. Esto permitirá compensar mecánicamente la baja densidad del fluido, forzando el ingreso de un mayor flujo de masa (kg/s) al sistema.

Se recomienda configurar un algoritmo en el BMS para que estime el SOC y el SOH tomando, como referencia fundamental, las celdas que se encuentran en la parte posterior de la cámara de ventilación. Las simulaciones en ANSYS Fluent mostraron que la baja densidad del aire en altitudes elevadas (0.859 kg/m^3 en Zuleta) crea zonas de estancamiento térmico que alcanzan hasta los 35°C en esta área específica. Al priorizar la monitorización de estas "celdas críticas" que sufrirán una degradación acelerada debido a la temperatura generada, se evitará que el BMS sobreestime la energía real disponible del SOC y se protegerá a toda la configuración de desbalances críticos de voltaje a lo largo de su vida útil.

ANEXOS

Anexo 1: Código 1 (Teorico)

```
#
=====

=====
# SIMULADOR TEÓRICO
#
=====

=====

# 1. INSTALACIÓN Y CARGA DE LIBRERÍAS
if (!require("tidyverse")) install.packages("tidyverse")
if (!require("patchwork")) install.packages("patchwork")
library(tidyverse)
library(patchwork)

#
=====

=====
# 2. VARIABLES DE ENTRADA
#
=====

=====

# A. DATOS DEL ESCENARIO
pendiente_objetivo_porc <- 0
velocidad_objetivo_kmh <- 60
distancia_simulacion_km <- 17.2
num_paradas <- 37

# B. DATOS DEL VEHÍCULO
masa_vehiculo <- 984 # kg
densidad_aire <- 0.934 # kg/m^3
gravedad <- 9.81 # m/s^2
area_efectiva <- 2.0 # m^2
coef_aero <- 0.32 # Cd
coef_rodadura <- 0.008 # Cr adoquin grande 0.011 y asfalto 0.008

potencia_max_motor_kw <- 40
eficiencia_motor <- 0.90
eficiencia_transmision <- 0.95

# C. DATOS DE LA BATERÍA
```

```
capacidad_bateria_kwh <- 10.8
```

```
#
```

```
=====
# 3. GENERACIÓN DE DATOS SINTÉTICOS (RUTA VIRTUAL)
#
```

```
set.seed(42)
```

```
dist_objetivo_m <- distancia_simulacion_km * 1000
```

```
v_target_ms <- velocidad_objetivo_kmh / 3.6
```

```
accel_ms2 <- 1.1
```

```
decel_ms2 <- 1.4
```

```
duraciones_base <- c(2, 8, 18, 6, 2, 3, 23, 4, 52, 39, 16, 39, 5, 3, 8, 10, 4, 4, 3, 20, 4, 4, 4, 8, 8, 4,
31, 4, 5, 4, 5, 4, 4, 5, 8, 6, 5)
```

```
v_min_kmh_base <- c(24.1, 15.2, 11.9, 17.7, 24.2, 21.9, 7.1, 15.7, 0.0, 7.9, 0.0, 6.4, 10.9, 20.6,
0.0, 8.1, 16.4, 13.3, 16.3, 5.4, 8.6, 14.2, 16.8, 16.6, 9.0, 15.4, 10.5, 13.1, 11.4, 11.2, 9.6, 12.3, 16.6,
15.1, 15.3, 16.1, 0.7)
```

```
duraciones <- rep(duraciones_base, length.out = num_paradas)
```

```
v_min_kmh <- rep(v_min_kmh_base, length.out = num_paradas)
```

```
v_perfil <- c()
```

```
d_acum <- 0
```

```
v_actual <- v_target_ms
```

```
parada_act <- 1
```

```
tramo_entre_paradas <- dist_objetivo_m / (num_paradas + 1)
```

```
while(d_acum < dist_objetivo_m) {
```

```
  if(parada_act <= num_paradas && d_acum >= (tramo_entre_paradas * parada_act)) {
```

```
    v_min_actual <- min(v_min_kmh[parada_act] / 3.6, v_target_ms)
```

```
    dur_actual <- duraciones[parada_act]
```

```
    while(v_actual > v_min_actual) {
```

```
      v_actual <- max(v_min_actual, v_actual - decel_ms2)
```

```
      v_perfil <- c(v_perfil, v_actual); d_acum <- d_acum + v_actual
```

```
    }
```

```
    for(s in 1:dur_actual) {
```

```
      v_perfil <- c(v_perfil, v_actual); d_acum <- d_acum + v_actual
```

```
    }
```

```
    while(v_actual < v_target_ms) {
```

```
      v_actual <- min(v_target_ms, v_actual + accel_ms2)
```

```
      v_perfil <- c(v_perfil, v_actual); d_acum <- d_acum + v_actual
```

```
    }
```



```

    parada_act <- parada_act + 1
  } else {
    v_perfil <- c(v_perfil, v_actual); d_acum <- d_acum + v_actual
  }
}

datos_simulados <- tibble(
  tiempo_s = 1:length(v_perfil),
  velocidad_ms = v_perfil
) %>%
  mutate(
    velocidad_kmh = velocidad_ms * 3.6,
    delta_dist_m = velocidad_ms * 1,
    distancia_m = cumsum(delta_dist_m),
    pendiente_porc = pendiente_objetivo_porc,
    pendiente_rad = atan(pendiente_porc / 100),
    delta_alt = delta_dist_m * sin(pendiente_rad),
    altitud_m = 2200 + cumsum(delta_alt),
    f_aero = 0.5 * densidad_aire * area_efectiva * coef_aero * (velocidad_ms^2),
    f_rod = masa_vehiculo * gravedad * coef_rodadura * cos(pendiente_rad),
    f_grad = masa_vehiculo * gravedad * sin(pendiente_rad),
    f_total = f_aero + f_rod + f_grad,
    potencia_kw = ((f_total * velocidad_ms) / 1000) / eficiencia_transmision,
    energia_inst_kwh = (pmax(0, potencia_kw) / eficiencia_motor) * (1/3600),
    energia_acum_kwh = cumsum(energia_inst_kwh),
    energia_restante_kwh = capacidad_bateria_kwh - energia_acum_kwh
  )

#
=====
=====
# 4. VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS (GRÁFICAS)
#
=====
=====

# GRÁFICO A: FUERZAS
datos_fuerzas <- datos_simulados %>%
  select(distancia_m, f_aero, f_rod, f_grad) %>%
  pivot_longer(cols = c(f_aero, f_rod, f_grad), names_to = "Tipo_Fuerza", values_to = "Newtons")
%>%
  mutate(Tipo_Fuerza = factor(Tipo_Fuerza, levels = c("f_grad", "f_aero", "f_rod"),
    labels = c("Pendiente (Gravedad)", "Aerodinámica", "Rodadura")))

g_fuerzas <- ggplot(datos_fuerzas, aes(x = distancia_m/1000, y = Newtons, fill = Tipo_Fuerza))
+
```

```
geom_area(alpha = 0.8, position = "stack") +
scale_fill_manual(values = c("#E74C3C", "#3498DB", "#F1C40F")) +
labs(title = paste("Fuerzas Teóricas a", velocidad_objetivo_kmh, "km/h y",
pendiente_objetivo_porc, "% Pendiente"),
      subtitle = paste("Simulación con", num_paradas, "ciclos de desaceleracion"),
      x = "Distancia (km)", y = "Fuerza (N)", fill = "Componente") + theme_minimal() +
theme(legend.position = "top")
```

GRÁFICO B: POTENCIA

```
g_potencia <- ggplot(datos_simulados, aes(x = distancia_m/1000, y = potencia_kw)) +
  geom_line(color = "#2E86C1", size = 1.2) +
  geom_area(fill = "#2E86C1", alpha = 0.2) +
  labs(title = "Demanda de Potencia", x = "Distancia (km)", y = "Potencia (kW)") +
  theme_minimal()
```

GRÁFICO C: ENERGÍA

```
g_energia <- ggplot(datos_simulados, aes(x = distancia_m/1000, y = energia_acum_kwh)) +
  geom_line(color = "purple", size = 1.2) +
  geom_area(fill = "purple", alpha = 0.1) +
  labs(title = "Consumo Energético Acumulado", x = "Distancia (km)", y = "Energía Consumida (kWh)") + theme_minimal()
```

GRÁFICO D: AUTONOMÍA

```
resumen_intern <- datos_simulados %>%
  summarise(Consumo_100km = (max(energia_acum_kwh) / max(distancia_m/1000)) * 100)
%>%
  mutate(Autonomia_km = (capacidad_bateria_kwh / Consumo_100km) * 100)
```

```
dist_estudio <- distancia_simulacion_km
dist_final <- resumen_intern$Autonomia_km
datos_proyeccion <- tibble(distancia_km = c(0, dist_estudio, dist_final),
                           energia_kwh = c(capacidad_bateria_kwh,
tail(datos_simulados$energia_restante_kwh, 1), 0))
```

```
g_autonomia <- ggplot() +
  geom_line(data = datos_proyeccion, aes(x = distancia_km, y = energia_kwh), color =
"#2ECC71", size = 1, linetype = "dashed") +
  geom_line(data = datos_simulados, aes(x = distancia_m/1000, y = energia_restante_kwh), color
= "#2ECC71", size = 1.2) +
  geom_area(data = datos_proyeccion, aes(x = distancia_km, y = energia_kwh), fill = "#2ECC71",
alpha = 0.1) +
  geom_vline(xintercept = dist_estudio, color = "blue", linetype = "dotted", size = 1) +
  geom_hline(yintercept = 0, linetype = "dashed", color = "red", size = 1) +
  geom_label(aes(x = dist_estudio, y = capacidad_bateria_kwh * 0.95, label = paste("Fin del
Estudio\n", dist_estudio, "km))),
  color = "blue", fill = "white", fontface = "bold", size = 3) +
```

```
geom_label(aes(x = dist_final, y = capacidad_bateria_kwh * 0.25, label =
paste("Agotamiento:\n", round(dist_final, 1), "km")),
  color = "red", fill = "white", fontface = "bold", size = 3) +
  scale_x_continuous(limits = c(0, dist_final + 5)) +
  scale_y_continuous(limits = c(0, capacidad_bateria_kwh + 2)) +
  labs(title = "Proyección de Autonomía Total", x = "Distancia (km)", y = "Energía Restante
(kWh)") + theme_minimal()
```

```
#
```

```
=====
```

```
# 5. RESULTADOS
```

```
#
```

```
=====
```

```
# Cálculo de Velocidad Máxima Real
```

```
calc_limite <- function(v_ms) {
  theta <- atan(pendiente_objetivo_porc / 100)
  p_req <- (((0.5 * densidad_aire * area_efectiva * coef_aero * v_ms^2) +
    (masa_vehiculo * gravedad * coef_rodadura * cos(theta)) +
    (masa_vehiculo * gravedad * sin(theta))) * v_ms) / 1000
  return(p_req - (potencia_max_motor_kw * eficiencia_motor * eficiencia_transmision))
}
```

```
v_max_final_kmh <- tryCatch({
  resultado_max <- uniroot(calc_limite, interval = c(0, 100))
  resultado_max$root * 3.6
}, error = function(e) { NA })
```

```
# TABLA 1: RESUMEN GENERAL
```

```
resumen_tabla <- datos_simulados %>%
  summarise(
    `Potencia Prom. (kw)` = round(mean(potencia_kw), 2),
    `Consumo Total (kwh)` = round(max(energia_acum_kwh), 2),
    `Fuerza Motor (N)` = round(mean(f_total), 2),
    `Consumo Rel. (kwh/100km)` = round((max(energia_acum_kwh) / max(distancia_m/1000)) *
100, 2),
    `Autonomia (km)` = round((capacidad_bateria_kwh / ((max(energia_acum_kwh) /
max(distancia_m/1000)) * 100)) * 100, 2),
    `velocidad Max. (km/h)` = round(v_max_final_kmh, 2)
  )
```

```
# TABLA 2: DESGLOSE DE FUERZAS DE RESISTENCIA
```

```
desglose_fuerzas <- datos_simulados %>%
  summarise(
```

```

Variable = c("F. Aerodinámica (N)", "F. Rodadura (N)", "F. Pendiente (N)",
Minimo = c(min(f_aero), min(f_rod), min(f_grad)),
Promedio = c(mean(f_aero), mean(f_rod), mean(f_grad)),
Maximo = c(max(f_aero), max(f_rod), max(f_grad))
) %>%
mutate(across(where(is.numeric), ~round(., 2)))

cat("=== RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN TEÓRICA ===\n")
cat("Escenario:", velocidad_objetivo_kmh, "km/h | Pendiente:", pendiente_objetivo_porc, "% |
Paradas:", num_paradas, "\n\n")

print(as.data.frame(resumen_tabla))
cat("\n--- DESGLOSE DE FUERZAS DE RESISTENCIA ---\n")
print(as.data.frame(desglose_fuerzas))

# Mostrar gráficas con espacio entre C y D
print(g_fuerzas / g_potencia / g_energia / plot_spacer() / g_autonomia +
      plot_layout(heights = c(1, 1, 1, 0.5, 1)))

```

Anexo 2: Código 2 (Gps)

```

#
=====
=====
# CÓDIGO 2: VALIDACION DE RUTA GPS
#
=====
=====

# 1. INSTALACIÓN Y CARGA DE LIBRERÍAS
if (!require("tidyverse")) install.packages("tidyverse")
if (!require("zoo")) install.packages("zoo")
if (!require("leaflet")) install.packages("leaflet")
if (!require("patchwork")) install.packages("patchwork")

library(tidyverse)
library(zoo)
library(leaflet)
library(patchwork)

#
=====
=====

```

2. VARIABLES DEL VEHÍCULO Y ENTORNO

#

=====

=====

masa_vehiculo <- 984 # kg

gravedad <- 9.81 # m/s^2

area_efectiva <- 2.0 # m^2

coef_aero <- 0.32 # Cd

coef_rodadura <- 0.008 # Cr adoquin grande 0.011 y asfalto 0.008

PARÁMETROS DE EFICIENCIA Y MOTOR

potencia_motor_max_kw <- 40

eficiencia_transmision <- 0.95

eficiencia_electrica <- 0.90

D. DATOS DE LA BATERÍA

capacidad_bateria_kwh <- 10.8

E. PARÁMETROS TERMODINÁMICOS

temp_bateria_superficie <- 43 # °C (Medido en prueba)

largo_celda <- 0.50 # m

ancho_celda <- 0.15 # m

alto_celda <- 0.22 # m

num_paquetes <- 2

temp_ambiente_ruta <- 15 # °C (Estimado en Zuleta/Altura max)

#

=====

=====

3. CARGA DE DATOS

#

=====

=====

ruta_archivo <- "C:/Users/s/OneDrive - Universidad Tecnica del Norte/Escritorio/u/Tesis/RUTAS
EN EXCEL/PRUEBA4.csv"datos_gps <- read_delim(ruta_archivo, delim = ";",
 locale = locale(decimal_mark = ","),
 show_col_types = FALSE)

#

=====

=====

4. LIMPIEZA Y PROCESAMIENTO DE DATOS

```

#
=====
=====
datos_procesados <- datos_gps %>%
  select(latitud = LATITUDE, longitud = LONGITUDE, altitud_m = HEIGHT,
         velocidad_kmh = SPEED, delta_dist_m = Distance) %>%
  mutate(
    latitud = as.numeric(gsub(",", ".", as.character(latitud))),
    longitud = as.numeric(gsub(",", ".", as.character(longitud))),
    distancia_m = cumsum(delta_dist_m),
    velocidad_ms = velocidad_kmh / 3.6,
    delta_alt = altitud_m - lag(altitud_m, default = first(altitud_m)),

    # --- CÁLCULO DE DENSIDAD DINÁMICA POR PUNTO ---
    presion_pa = 101325 * (1 - (0.0065 * altitud_m) / 288.15)^( (9.81 * 0.02896) / (8.314 * 0.0065)
  ),
    densidad_punto = presion_pa / (287.05 * (temp_ambiente_ruta + 273.15)),

    pendiente_rad = if_else(delta_dist_m > 0.1, atan(delta_alt / delta_dist_m), 0),
    pendiente_porc = tan(pendiente_rad) * 100,

    # APLICACIÓN DE DENSIDAD DINÁMICA EN F_AERO
    f_aero = 0.5 * densidad_punto * area_efectiva * coef_aero * (velocidad_ms^2),
    f_rod = masa_vehiculo * gravedad * coef_rodadura * cos(pendiente_rad),
    f_grad = masa_vehiculo * gravedad * sin(pendiente_rad),
    f_total = f_aero + f_rod + f_grad,

    potencia_kw = ((f_total * velocidad_ms) / 1000) / eficiencia_transmision,
    energia_inst_kwh = (pmax(0, potencia_kw) / eficiencia_electrica) * (1/3600),
    energia_acum_kwh = cumsum(energia_inst_kwh),
    energia_restante_kwh = capacidad_bateria_kwh - energia_acum_kwh
  ) %>%
  mutate(
    pendiente_porc_suav = rollmean(pendiente_porc, k = 15, fill = NA, align = "center"),
    potencia_kw_suav = rollmean(potencia_kw, k = 15, fill = NA, align = "center")
  )

v_promedio_calc <- mean(datos_procesados$velocidad_kmh, na.rm = TRUE)
v_promedio_ms <- v_promedio_calc / 3.6
altitud_max_ruta <- max(datos_procesados$altitud_m, na.rm = TRUE)

#
=====
=====
# 5. CÁLCULO TERMODINÁMICO

```

```

#
=====

area_contacto_total <- num_paquetes * (2*(largo_celda*alto_celda) +
2*(ancho_celda*alto_celda) + (largo_celda*ancho_celda))

calc_termo_dinamico <- function(alt, temp_amb, v_ms) {
  P0 <- 101325; T0 <- 288.15; L <- 0.0065; g <- 9.81; M <- 0.02896; R <- 8.314

  # Cálculo de Presión Atmosférica (Pa)
  Presion <- P0 * (1 - (L * alt) / T0)^( (g * M) / (R * L) )

  # Densidad (kg/m3)
  Densidad <- Presion / (287.05 * (temp_amb + 273.15))

  # h dinámico
  h_base <- (10 + 5 * sqrt(v_ms))
  h_corregido <- h_base * (Densidad / 1.225)^0.6

  Q_dot <- h_corregido * area_contacto_total * (temp_bateria_superficie - temp_amb)
  return(list(p = Presion, rho = Densidad, h = h_corregido, q = Q_dot))
}

termo_ruta <- calc_termo_dinamico(altitud_max_ruta, temp_ambiente_ruta, v_promedio_ms)
termo_mar <- calc_termo_dinamico(0, temp_ambiente_ruta, v_promedio_ms)

res_termo <- data.frame(
  Variable = c("Altitud Máxima (msnm)", "Presión Atmosférica (Pa)", "Densidad Aire (kg/m3)",
"Coef. h (W/m2K)", "Calor Disipado Q (W)"),
  `Valor Ruta GPS` = c(altitud_max_ruta, termo_ruta$p, termo_ruta$rho, termo_ruta$h,
termo_ruta$q),
  `Valor Nivel Mar` = c(0, 101325, 1.225, (10 + 5 * sqrt(v_promedio_ms)), termo_mar$q)
)
res_termo$Perdida_Eficiencia_Pct <- (1 - (res_termo$`Valor.Ruta.GPS` /
res_termo$`Valor.Nivel.Mar`)) * 100

#
=====

# 6. ANÁLISIS POR TRAMOS
#
=====

 analisis_tramos <- datos_procesados %>%
  filter(!is.na(distancia_m)) %>%

```

```

mutate(tramo_id = floor(distancia_m / 3000)) %>%
group_by(tramo_id) %>%
summarise(
  distancia_inicio_km = min(distancia_m) / 1000,
  distancia_fin_km = max(distancia_m) / 1000,
  lat_inicio = first(latitud),
  lon_inicio = first(longitud),
  pendiente_maxima_porcentaje = max(pendiente_porcentaje_suav, na.rm = TRUE),
  potencia_promedio_kw = mean(potencia_kw_suav, na.rm = TRUE)
)

#
=====
# 7. VISUALIZACIÓN 1: MAPA INTERACTIVO
#
=====

paleta_pendiente <- colorNumeric(palette = c("#00FF00", "#FFFF00", "#FF0000"), domain = c(0,
15))

mapa_ruta <- leaflet(datos_procesados) %>%
  addProviderTiles(providers$CartoDB.Positron) %>%
  addCircleMarkers(
    lng = ~longitud, lat = ~latitud, radius = 2, stroke = FALSE, fillOpacity = 0.8,
    color = ~paleta_pendiente(pmax(0, pendiente_porcentaje_suav)),
    popup = ~paste0("<strong>Dist:</strong> ", round(distancia_m/1000, 2), " km<br>",
      "<strong>Pot:</strong> ", round(potencia_kw_suav, 1), " kW")
  ) %>%
  addMarkers(
    data = analisis_tramos, lng = ~lon_inicio, lat = ~lat_inicio,
    label = ~paste("Tramo", tramo_id * 3, "km"),
    popup = ~paste0("<strong>Potencia Prom:</strong> ", round(potencia_promedio_kw, 2), "
kW")
  ) %>%
  addLegend("bottomright", pal = paleta_pendiente, values = c(0, 15), title = "Pendiente (%)",
opacity = 1)

#
=====
# 8. VISUALIZACIÓN 2: GRÁFICOS
#
=====

datos_fuerzas <- datos_procesados %>%

```



```

select(distancia_m, f_aero, f_rod, f_grad) %>%
pivot_longer(cols = c(f_aero, f_rod, f_grad), names_to = "Tipo_Fuerza", values_to = "Newtons")
%>%
mutate(Tipo_Fuerza = factor(Tipo_Fuerza, levels = c("f_grad", "f_aero", "f_rod"),
labels = c("Pendiente", "Aerodinámica", "Rodadura")))

g_fuerzas <- ggplot(datos_fuerzas, aes(x = distancia_m/1000, y = Newtons, fill = Tipo_Fuerza))
+
geom_area(alpha = 0.7) + scale_fill_manual(values = c("#E74C3C", "#3498DB", "#F1C40F"))
+
coord_cartesian(ylim = c(-500, 2500)) +
labs(title = paste("Desglose de Fuerzas (V. Prom:", round(v_promedio_calc, 1), "km/h)"),
x = "Distancia (km)", y = "Fuerza (N)") + theme_minimal() + theme(legend.position = "top")

g_potencia <- ggplot(datos_procesados, aes(x = distancia_m/1000, y = potencia_kw_suav)) +
geom_line(color = "#2E86C1") +
geom_hline(yintercept = potencia_motor_max_kw, color = "red", linetype = "dotted") +
labs(title = "Perfil de Potencia Requerida", x = "Distancia (km)", y = "Potencia (kW)") +
theme_minimal()

g_energia <- ggplot(datos_procesados, aes(x = distancia_m/1000, y = energia_acum_kwh)) +
geom_line(color = "purple", linewidth = 1.2) +
labs(title = "Consumo Energético Acumulado", x = "Distancia (km)", y = "Energía (kWh)") +
theme_minimal()

#
=====
=====
# 9. SALIDA DE RESULTADOS EN TABLAS
#
=====
=====

# --- TABLA 1: RENDIMIENTO GLOBAL ---
res_global <- datos_procesados %>%
summarise(
Dist_Total_km = max(distancia_m, na.rm = TRUE) / 1000,
`Pendiente Promedio %` = round(mean(pendiente_porc, na.rm = TRUE), 2),
`Potencia Promedio kW` = round(mean(potencia_kw_suav, na.rm = TRUE), 2),
`Consumo Total kWh` = round(max(energia_acum_kwh, na.rm = TRUE), 2),
`Fuerza Motor N` = round(mean(f_total, na.rm = TRUE), 2)
) %>%
mutate(
`Consumo Relativo kWh/100km` = round((`Consumo Total kWh` / Dist_Total_km) * 100, 2),
`Autonomía km` = round((capacidad_bateria_kwh / `Consumo Relativo kWh/100km`) * 100,
2)

```

```
) %>%
  select(`Pendiente Promedio %`, `Potencia Promedio kW`, `Consumo Total kWh`, `Fuerza Motor
N`, `Consumo Relativo kWh/100km`, `Autonomía km`)
```

```
# --- TABLA 2: ANÁLISIS DE FUERZAS RESISTIVAS ---
```

```
fuerzas_resumen <- data.frame(
  Metrica = c("Máxima (N)", "Mínima (N)", "Promedio (N)"),
  `Fuerza Pendiente` = c(
    round(max(datos_procesados$f_grad, na.rm = TRUE), 2),
    round(min(datos_procesados$f_grad, na.rm = TRUE), 2),
    round(mean(datos_procesados$f_grad, na.rm = TRUE), 2)
  ),
  `Fuerza Aerodinámica` = c(
    round(max(datos_procesados$f_aero, na.rm = TRUE), 2),
    round(min(datos_procesados$f_aero, na.rm = TRUE), 2),
    round(mean(datos_procesados$f_aero, na.rm = TRUE), 2)
  ),
  `Fuerza Rodadura` = c(
    round(max(datos_procesados$f_rod, na.rm = TRUE), 2),
    round(min(datos_procesados$f_rod, na.rm = TRUE), 2),
    round(mean(datos_procesados$f_rod, na.rm = TRUE), 2)
  )
)
```

```
# Gráfico D: Autonomía restante
```

```
g_autonomia <- ggplot(datos_procesados, aes(x = distancia_m/1000, y = energia_restante_kwh))
+
  geom_line(color = "#2ECC71", linewidth = 1.2) + geom_hline(yintercept = 0, linetype =
"dashed", color = "red") +
  labs(title = paste("Autonomía Estimada:", res_global$`Autonomía km`, "km"), x = "Distancia
(km)", y = "Energía Restante (kWh)") + theme_minimal()
```

```
# --- IMPRESIÓN DE TABLAS ---
```

```
cat("\n\n=====
\n")
```

```
print("TABLA 1: RESUMEN DE RENDIMIENTO DEL VEHÍCULO")
print(as.data.frame(res_global))
```

```
cat("\n\n=====
\n")
```

```
print("TABLA 2: DESGLOSE DE FUERZAS DE RESISTENCIA")
print(fuerzas_resumen)
```

```
cat("\n\n=====
\n")
```

```
print("TABLA 3: ANÁLISIS TÉRMICO DE BATERÍAS (EFECTO ALTITUD)")
```

```
res_termo_print <- res_termo
res_termo_print[,-1] <- lapply(res_termo_print[,-1], function(x) round(x, 3))
print(res_termo_print)

# --- MOSTRAR MAPA Y GRÁFICAS ---
print(mapa_ruta)
print(g_fuerzas / g_potencia / g_energia / g_autonomia)
```

REFERENCIAS

- [1] Z. M. Ali, F. Jurado, F. H. Gandoman, and M. Calasan, "Advancements in battery thermal management for electric vehicles: Types, technologies, and control strategies including deep learning methods," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 9, p. 102908, 2024/09/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102908>.
- [2] N. C. Alluraiah, V. Nandagopal, P. Veeramanikandan, D. Godfrey, S. Meena, and G. Brindha, "Comparison of SoC in Ni-MH and Lithium-Ion Battery for E-Vehicle," *International Journal of Electrical and Electronics Research*, Article vol. 12, no. 4, pp. 1258-1263, 2024, doi: 10.37391/IJEER.120417.
- [3] M. Amer, J. Masri, A. Dababat, U. Sajjad, and K. Hamid, "Electric vehicles: Battery technologies, charging standards, AI communications, challenges, and future directions," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 24, p. 100751, 2024/10/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100751>.
- [4] A. Celadon, H. H. Sun, S. H. Sun, and G. X. Zhang, "Batteries for electric vehicles: Technical advancements, environmental challenges, and market perspectives," *SUSMAT*, vol. 4, no. 5, OCT 2024, Art no. e234, doi: 10.1002/sus2.234.
- [5] M. Clemente, M. Salazar, and T. Hofman, "Concurrent design optimization of powertrain component modules in a family of electric vehicles," *Applied Energy*, Article vol. 379, 2025, Art no. 124840, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124840.
- [6] A. Debbarma, "Thermal management system of e-vehicle Li-ion battery modules: A comprehensive review," *Journal of Thermal Engineering*, Article vol. 10, no. 6, pp. 1679-1697, 2024, doi: 10.14744/thermal.0000868.
- [7] V. H. Duong, H. A. Bastawrous, and K. W. See, "Accurate approach to the temperature effect on state of charge estimation in the LiFePO₄ battery under dynamic load operation," *Applied Energy*, Article vol. 204, pp. 560-571, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.056.
- [8] G. Fandi, J. Novák, and J. Chyský, "Modeling electric Vehicle's and improving battery lifetime using AI tools case study: Postal cars," *Heliyon*, vol. 10, no. 15, p. e34792, 2024/08/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34792>.
- [9] A. Gharehghani *et al.*, "Progress in battery thermal management systems technologies for electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 202, p. 114654, 2024/09/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114654>.
- [10] D. K. Grebtsov *et al.*, "Electric Vehicle Battery Technologies: Chemistry, Architectures, Safety, and Management Systems," *WORLD ELECTRIC VEHICLE JOURNAL*, vol. 15, no. 12, DEC 2024, Art no. 568, doi: 10.3390/wevj15120568.
- [11] A. Kalhor, J. Dykas, K. Rodak, and A. Grajcar, "Materials and constructional design for electric vehicles: A review," *Advances in Science and Technology Research Journal*, Article vol. 19, no. 1, pp. 178-196, 2025, doi: 10.12913/22998624/195457.
- [12] A. Khazali *et al.*, "Planning a Hybrid Battery Energy Storage System for Supplying Electric Vehicle Charging Station Microgrids," *Energies*, Article vol. 17, no. 15, 2024, Art no. 3631, doi: 10.3390/en17153631.
- [13] A. König, L. Nicoletti, D. Schröder, S. Wolff, A. Waclaw, and M. Lienkamp, "An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles," *WORLD ELECTRIC VEHICLE JOURNAL*, vol. 12, no. 1, MAR 2021, Art no. 21, doi: 10.3390/wevj12010021.
- [14] Y. H. Li, B. B. Kong, C. H. Qiu, Y. Li, and Y. L. Jiang, "Numerical study on air-cooled battery thermal management system considering the sheer altitude effect," *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, vol. 258, JAN 1 2025, Art no. 124707, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124707.
- [15] F. Liu, M. Shafique, and X. Luo, "Unveiling the determinants of battery electric vehicle performance: A systematic review and meta-analysis," *Communications in Transportation*

- Research*, vol. 4, p. 100148, 2024/12/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2024.100148>.
- [16] M. Nizam, H. Maghfiroh, F. N. Kuncoro, and F. Adriyanto, "Dual battery control system of lead acid and lithium ferro phosphate with switching technique," *World Electric Vehicle Journal*, Article vol. 12, no. 1, pp. 1-16, 2021, Art no. 4, doi: 10.3390/WEVJ12010004.
 - [17] M. Ntombela, K. Musasa, and K. Moloi, "A Comprehensive Review for Battery Electric Vehicles (BEV) Drive Circuits Technology, Operations, and Challenges," *WORLD ELECTRIC VEHICLE JOURNAL*, vol. 14, no. 7, JUL 2023, Art no. 195, doi: 10.3390/wevj14070195.
 - [18] P. U. Nzereogu *et al.*, "Solid-State lithium-ion battery electrolytes: Revolutionizing energy density and safety," *Hybrid Advances*, vol. 8, p. 100339, 2025/03/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100339>.
 - [19] A. Purwadi, J. Dozeno, and N. Heryana, "Testing Performance of 10 kW BLDC Motor and LiFePO₄ Battery on ITB-1 Electric Car Prototype," *Procedia Technology*, vol. 11, pp. 1074-1082, 2013/01/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.296>.
 - [20] M. Rezaei *et al.*, "A review of lithium-ion battery recycling for enabling a circular economy," *Journal of Power Sources*, vol. 630, p. 236157, 2025/02/28/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.236157>.
 - [21] D. Romero Guillén *et al.*, "Physical Process for Li-Ion Battery Recycling from Electric Vehicles," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Article vol. 63, no. 45, pp. 19788-19803, 2024, doi: 10.1021/acs.iecr.4c03271.
 - [22] R. M. Salgado, F. Danzi, J. E. Oliveira, A. El-Azab, P. P. Camanho, and M. H. Braga, "The Latest Trends in Electric Vehicles Batteries," *MOLECULES*, vol. 26, no. 11, JUN 2021, Art no. 3188, doi: 10.3390/molecules26113188.
 - [23] M. Şen, M. Özcan, and Y. R. Eker, "A review on the lithium-ion battery problems used in electric vehicles," *Next Sustainability*, vol. 3, p. 100036, 2024/01/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100036>.
 - [24] M. Wang, G. Wang, Z. Xiao, Y. Sun, and Y. Zheng, "State of Charge Estimation of LiFePO₄ in Various Temperature Scenarios," *Batteries*, Article vol. 9, no. 1, 2023, Art no. 43, doi: 10.3390/batteries9010043.
 - [25] A. Agrawal *et al.*, "Mathematical Modeling of Driving Forces of an Electric Vehicle for Sustainable Operation," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 95278-95294, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3309728.
 - [26] A. K. Koech, G. Mwandila, F. Mulolani, and P. Mwaanga, "Lithium-ion battery fundamentals and exploration of cathode materials: A review," *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 50, pp. 321-339, 2024/10/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.09.008>.
 - [27] A. Nekahi, A. Kumar M.R, X. Li, S. Deng, and K. Zaghib, "Sustainable LiFePO₄ and LiMn_xFe_{1-x}PO₄ (x=0.1–1) cathode materials for lithium-ion batteries: A systematic review from mine to chassis," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 159, p. 100797, 2024/06/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2024.100797>.
 - [28] Z. Wang *et al.*, "Synthesis of Carbon-coated LiFePO₄ Composites as a Cathode Material for Improved Electrochemical Performance," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 14, no. 5, pp. 4611-4619, 2019/05/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.20964/2019.05.38>.
 - [29] T. Zhang, Z. Yang, L. Wang, X. Zhao, and Q.-C. Zhuang, "Electrochemical Properties of Olivine-Type LiFePO₄/C Cathode Material for Lithium Ion Batteries," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 13, no. 9, pp. 8322-8337, 2018/09/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.20964/2018.09.30>.
 - [30] Q. Zhao *et al.*, "Combined First-principles and Experimental Studies of a V-doped LiFePO₄/C Composite as a Cathode Material for Lithium-ion Batteries," *International Journal of*

- Electrochemical Science*, vol. 16, no. 5, p. 21053, 2021/05/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.20964/2021.05.01>.
- [31] M. Zhi *et al.*, "Review of prevention and mitigation technologies for thermal runaway in lithium-ion batteries," *Aerospace Traffic and Safety*, vol. 1, no. 1, pp. 55-72, 2024/03/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aets.2024.06.002>.
- [32] S. Zhu, A. Huang, and Y. Xu, "Improving Methods for better Performance of Commercial LiFePO₄/C Batteries," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 16, no. 5, p. 210564, 2021/05/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.20964/2021.05.49>.
- [33] S. Cuco Pardillos, *Infraestructura para la recarga del vehiculo electrico*. Editorial de la Universidad Politecnica de Valencia (in es), 2022, p. 109.
- [34] A. Fly, I. Kirkpatrick, and R. Chen, "Low temperature performance evaluation of electrochemical energy storage technologies," *Applied Thermal Engineering*, Article vol. 189, 2021, Art no. 116750, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116750.
- [35] O. Folorunso, R. Sadiku, Y. Hamam, and W. Kupolati, "Modeling and Analysis of Current Loading Effects on Electric Vehicle's Lithium-Ion Batteries: A MATLAB-Based Model Approach," *Batteries*, Article vol. 10, no. 12, 2024, Art no. 417, doi: 10.3390/batteries10120417.
- [36] B. Gulsoy, H. Chen, C. Briggs, T. A. Vincent, J. E. H. Sansom, and J. Marco, "Real-time simultaneous monitoring of internal temperature and gas pressure in cylindrical cells during thermal runaway," *Journal of Power Sources*, Article vol. 617, 2024, Art no. 235147, doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.235147.
- [37] H. Najafi Khaboshan *et al.*, "Thermal uniformity analysis of a hybrid battery pack using integrated phase change material, metal foam, and counterflow minichannels," *Applied Thermal Engineering*, vol. 259, p. 124910, 2025/01/15/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124910>.
- [38] V. Talele and P. Zhao, "Effect of nano-enhanced phase change material on the thermal management of a 18650 NMC battery pack," *Journal of Energy Storage*, vol. 64, p. 107068, 2023/08/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107068>.
- [39] C. Wang *et al.*, "Cold ageing of nmc811 lithium-ion batteries," *Energies*, Article vol. 14, no. 16, 2021, Art no. 4724, doi: 10.3390/en14164724.
- [40] T. F. Yang, P. Y. Lin, C. Y. Lin, W. M. Yan, and S. Rashidi, "Study on thermal aspects of lithium-ion battery packs with phase change material and air cooling system," *Case Studies in Thermal Engineering*, Article vol. 53, 2024, Art no. 103809, doi: 10.1016/j.csite.2023.103809.
- [41] L. P. Zhu, F. Xiong, H. Chen, D. Wei, G. Li, and C. Z. Ouyang, "Thermal analysis and optimization of an EV battery pack for real applications," *INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER*, vol. 163, DEC 2020, Art no. 120384, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120384.
- [42] D. Li, J. J. Deng, Z. S. Zhang, P. Liu, and Z. P. Wang, "Multi-dimension statistical analysis and selection of safety-representing features for battery pack in real-world electric vehicles," *APPLIED ENERGY*, vol. 343, AUG 1 2023, Art no. 121188, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121188.
- [43] S. Y. Wang, L. Wang, Y. M. Shang, S. Q. Zhen, G. Y. Tian, and X. M. He, "Safety Insight of Li(Ni₀₅Co_{0.2}Mn_{0.3})O₂/sub> Based Lithium Ion Batteries with Gel Electrolyte," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, vol. 13, no. 10, pp. 9385-9398, OCT 2018, doi: 10.20964/2018.10.56.</sub></sub></sub>
- [44] G. F. Hu, P. F. Huang, Z. H. Bai, Q. S. Wang, and K. X. Qi, "Comprehensively analysis the failure evolution and safety evaluation of automotive lithium ion battery," *ETRACTION*, vol. 10, NOV 2021, Art no. 100140, doi: 10.1016/j.etrans.2021.100140.

- [45] S. Q. Liu *et al.*, "Thermal safety studies of high energy density lithium-ion batteries under different states of charge," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, vol. 44, no. 3, pp. 1535-1545, MAR 10 2020, doi: 10.1002/er.4918.
- [46] J. Y. Xu, J. Ma, X. Zhao, H. Chen, B. Xu, and X. Q. Wu, "Detection Technology for Battery Safety in Electric Vehicles: A Review," *ENERGIES*, vol. 13, no. 18, SEP 2020, Art no. 4636, doi: 10.3390/en13184636.
- [47] R. Q. Shen, Y. F. Quan, J. D. McIntosh, A. Salem, and Q. S. Wang, "Fire Safety of Battery Electric Vehicles: Hazard Identification, Detection, and Mitigation," *SAE INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRIFIED VEHICLES*, vol. 13, no. 3, pp. 279-294, 2024, doi: 10.4271/14-13-03-0024.
- [48] Z. R. Jia, Z. P. Wang, Z. Y. Sun, P. Liu, X. Q. Zhu, and F. C. Sun, "A Data-Driven Approach for Battery System Safety Risk Evaluation Based on Real-World Electric Vehicle Operating Data," *IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION*, vol. 10, no. 3, pp. 5660-5676, SEP 2024, doi: 10.1109/TTE.2023.3324450.
- [49] F. N. Esfahani, A. Darwish, and X. D. Ma, "Design and Control of a Modular Integrated On-Board Battery Charger for EV Applications with Cell Balancing," *BATTERIES-BASEL*, vol. 10, no. 1, JAN 2024, Art no. 17, doi: 10.3390/batteries10010017.
- [50] G. H. John and G. A. Goodarzi, "Vehicle Dynamics," in *Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles*: Wiley, 2018, pp. 40-67.
- [51] S. Kremzow-Tennie, M. Hellwig, and F. Pautzke, "A study on the influencing factors regarding energy consumption of electric vehicles," in *2020 21st International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, 9-11 Dec. 2020 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/REM49740.2020.9313934.
- [52] A. Gunawan, M. L. F. Cheong, and J. Poh, "An Essential Applied Statistical Analysis Course using RStudio with Project-Based Learning for Data Science," in *2018 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*, 4-7 Dec. 2018 2018, pp. 581-588, doi: 10.1109/TALE.2018.8615145.
- [53] B. Jin, T. Zhang, and Q. Fei, "Temperature Simulation for Prismatic Power Lithium-ion Battery based on Electrochemical-Thermal Coupling Model," in *2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*, 20-21 Aug. 2022 2022, pp. 20-23, doi: 10.1109/AEECA55500.2022.9918822.