UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"OPTIMIZACIÓN DE MÓDULOS DE GESTIÓN DE BATERÍA (BMS) PARA VEHÍCULOS CONVERTIDOS A ELÉCTRICOS EN CIUDADES DE ALTURA"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales renovables

AUTOR:

Pablo Andrés Guevara Gudiño

DIRECTOR:

Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo MSc.

Ibarra – Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Guevara Gudiño Pablo Andrés

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Optimización de módulos de gestión de batería (BMS) para vehículos convertidos a eléctricos en ciudades de altura
AUTOR (ES):	Guevara Gudiño Pablo Andrés
FECHA: DD/MM/AAAA	29/07/2026
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo MSc.

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 29 días del mes de Julio de 2026

EL AUTOR:



……

Pablo Andrés Guevara Gudiño

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Naranjo Cobo Francisco Roberto en calidad de director del señor estudiante Guevara Gudiño Pablo Andrés, certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "OPTIMIZACIÓN DE MÓDULOS DE GESTIÓN DE BATERÍA (BMS) PARA VEHÍCULOS CONVERTIDOS A ELÉCTRICOS EN CIUDADES DE ALTURA"

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FRANCISCO ROBERTO NARANJO COBO

……..

Ing. Naranjo Cobo Francisco Roberto MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mis padres, quienes, con su respaldo constante, sus enseñanzas y la confianza que siempre depositaron en mí hicieron posible la culminación de esta etapa. Su esfuerzo y perseverancia han sido una referencia permanente en mi formación, tanto personal como profesional.

A mi pareja, Carolina, por recorrer este camino a mi lado desde el inicio de mi carrera universitaria. Su compañía, comprensión y fortaleza en los momentos de mayor dificultad fueron fundamentales para superar cada desafío y alcanzar, juntos, las metas que nos propusimos.

A mis abuelitos, por su cariño, preocupación y apoyo permanente. Su presencia y sus palabras de aliento siempre me brindaron la tranquilidad y la motivación necesarias para continuar.

A José Francisco, mi ángel, cuya memoria permanece como una guía silenciosa en mi camino. Y a mi hijo, Julián, quien llegó para dar un nuevo sentido a cada esfuerzo y recordarme, cada día, el valor de seguir construyendo un mejor futuro.

Finalmente, a mi hermana, por ser una persona a quien admiro profundamente. Su ejemplo, su apoyo y su compañía, tanto en los momentos de alegría como en los de dificultad, han sido un pilar importante a lo largo de este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a los docentes que formaron parte de mi trayectoria universitaria, por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, las cuales contribuyeron de manera significativa a mi formación académica y profesional.

Mi especial reconocimiento a mi tutor, Ing. Francisco Naranjo, por su orientación, disposición y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Sus observaciones y recomendaciones fueron fundamentales para llevar este proyecto a su culminación.

A mis amigos, por su amistad, confianza y apoyo a lo largo de esta etapa. Su compañía y disposición para brindar su ayuda en los momentos en que fue necesaria hicieron este camino más llevadero.

Finalmente, agradezco a Dios por acompañarme en cada etapa de este proceso, darme fortaleza para enfrentar los desafíos y permitirme alcanzar una meta tan importante en mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA 3
AGRADECIMIENTOS 5
ÍNDICE DE CONTENIDO 6
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES 9
INDICE DE TABLAS 10
CAPITULO I 13
1.1. Tema 13
1.2. Problema 13
1.3. Formulación de la pregunta de investigación 13
1.4. Objetivos 14
1.4.1. Objetivo general 14
1.4.2. Objetivos específicos 14
1.5. Alcance 14
1.6. Justificación 15
1.7. Antecedentes 16
CAPITULO II 18
1.8. Impacto ambiental de las emisiones 18
1.9. Energía eléctrica 19
1.10. El uso de baterías 19
1.11. Eficiencia 20
1.12. Estado de los vehículos eléctricos en el país 20
1.13. Conversión de vehículos eléctricos (Retrofit) 21
1.14. Componentes necesarios en un vehículo eléctrico 22
1.15. Ventajas y desventajas 22
1.16. Sistema de gestión de baterías (BMS) 23
1.17. Arquitectura y topología de un BMS 23
1.18. Funciones principales del BMS 24

1.19. Tipos de baterías 25
1.20. Condiciones específicas de ciudades de altura 26
1.21. Impacto de la altitud en vehículos eléctricos 26
1.22. Reducción de la autonomía en altura 27
1.23. Gestión térmica y refrigeración 27
1.24. Impacto en la regeneración de la batería 27
1.25. Desbalance de celdas y variaciones de voltaje 28
1.26. Impacto en el algoritmo de estimación del estado de carga (SOC) y estado de salud (SOH) 28
1.27. Factores que afectan el rendimiento de las baterías 28
1.28. Profundidad de Descarga (DoD) y Degradación 29
1.29. Tasa de Carga y Descarga 29
1.30. Envejecimiento de la Batería 30
CAPÍTULO III 31
1.31. Métodos 31
1.32. Materiales 33
1.32.1. Matlab 33
3.3.1. Simulink 34
1.33. Modelos matemáticos 34
1.34. Modelado eléctrico de la batería 35
3.5. Estado de Carga (SOC) 36
3.6. Estado de Salud (SOH) 38
3.7. Balanceo de Celdas 40
3.8. Gestión térmica 42
CAPÍTULO IV 44
4.1. Modelo electroquímico de la batería $LiFePO_4$ 44
4.2. Parametrización de las celdas 46
4.3. Diseño del BMS 49

4.4. Protección por sobre corriente 50
4.5. Protección térmica 50
4.6. Estado de carga (SoC) 54
4.7. Estado de Salud (SOH) 55
4.8. Balanceo de celdas 56
4.9. Gestión térmica activa y derrateo de capacidad por temperatura 57
4.10. Perfil de Descarga 59
4.11. Resultados de las simulaciones 59
4.12. Comparación a nivel del mar frente a Ibarra a 5 °C 60
4.13. Comparación a nivel del mar frente a Ibarra a 25 °C 65
4.14. Estrategias de gestión óptimas para personalizar un BMS en ciudades de altura 70
4.15. Conclusiones 71
4.16. Recomendaciones 71
ANEXOS 72
5.1. Hoja técnica de la celda 72
5.2. Perfil de carga y descarga 73
5.3. Condiciones ambientales 74
BIBLIOGRAFÍA 76

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1:Topología de un BMS a) centralizada, b) distribuida 24
Ilustración 2: Flujograma de metodología..... 32
Ilustración 3: Diseño de celda LiFePo4..... 45
Ilustración 4: Diseño del pack de baterías..... 46
Ilustración 5: Vector de valores para SoC – Captura de Pantalla Battery Builder..... 47
Ilustración 6: Vector de temperatura – Captura de Pantalla Battery Builder..... 47
Ilustración 7: Vector voltaje en circuito abierto – Captura de Pantalla Battery Builder 47
Ilustración 8: Masa térmica y resistencia térmica hacia el ambiente – Captura de Pantalla Battery Builder..... 49
Ilustración 9: Pack de baterías en Simulink – Captura de Pantalla Simulink..... 49
Ilustración 10: Módulo monitor de corriente – Captura de Pantalla Simulink..... 50
Ilustración 11: Módulo monitor de temperatura – Captura de Pantalla Simulink..... 51
Ilustración 12: Protección por sobretemperatura – Captura de Pantalla Simulink..... 52
Ilustración 13: Área del pack y coeficiente de transferencia de calor – Captura de Pantalla Simulink..... 53
Ilustración 14: Módulo de estimación de SoC – Captura de Pantalla Battery Builder .. 54
Ilustración 15: Modulo para activar la carga mediante freno regenerativo..... 55
Ilustración 16: Modulo de estimación de SoH 56
Ilustración 17: Balanceo de celdas 57
Ilustración 18: Módulo de derrateo 58
Ilustración 19: Módulo calefactor 58
Ilustración 20: Módulo ventilador..... 59
Ilustración 21: Estado de carga (SOC) del pack - nivel del mar frente a Ibarra a 5 °C.. 61
Ilustración 22: Voltaje del pack – nivel del mar frente a Ibarra a 5 °C..... 62
Ilustración 23: Corriente del pack – nivel del mar frente a Ibarra a 5 °C..... 63
Ilustración 24: Temperatura interna de la celda – nivel del mar frente a Ibarra a 5 °C . 64

Ilustración 25: Estado de carga (SOC efectivo) del pack – nivel del mar frente a Ibarra a 25 °C 66

Ilustración 26: Voltaje del pack – nivel del mar frente a Ibarra a 25 °C 67

Ilustración 27: Corriente del pack – nivel del mar frente a Ibarra a 25 °C 68

Ilustración 28: Temperatura interna de la celda – nivel del mar frente a Ibarra a 25 °C 69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas y desventajas del retrofit 22

Tabla 2: Tipos de baterías en vehículos eléctricos[36-38] 25

Tabla 3: Temperatura y su impacto en la batería[46] 29

Tabla 4: Matriz 7x3 de Resistencia Interna R0 48

Tabla 5: Comparación de resultados del perfil Ascenso y Descenso por escenario 60

Tabla 6: Parámetros de celdas *Fuente: hojas de datos del fabricante EVE Energy para las celdas LF100MA y LF100LA (DNK Power, distribuidor autorizado; LiFePO4-Battery.com).* 72

Tabla 7: Configuración de escenario 75

RESUMEN

La conversión de vehículos de combustión interna a eléctricos (retrofit) representa una alternativa sostenible y de menor costo para la transición hacia la movilidad eléctrica; sin embargo, los sistemas de gestión de baterías (BMS) empleados no están diseñados para las condiciones particulares de las ciudades de altura, donde la menor densidad del aire y las bajas temperaturas afectan el desempeño del pack de baterías. El presente trabajo tuvo como objetivo proponer estrategias para el funcionamiento eficiente del módulo de gestión de baterías de vehículos convertidos a eléctricos en ciudades de altura, tomando como caso de estudio la ciudad de Ibarra (2225 msnm). Para ello se desarrolló en MATLAB/Simulink un modelo electro-térmico de un pack de baterías $LiFePO_4$ en configuración 34S1P (108 V – 100 Ah) y su respectivo BMS, con capas de protección por sobrecorriente, temperatura, estado de carga (SOC), estado de salud (SOH) y balanceo de celdas, al que se incorporaron módulos de gestión térmica activa: derrateo de corriente dependiente de la temperatura, calefacción y refrigeración con control por histéresis. Se simuló el perfil de ascenso y descenso bajo tres condiciones ambientales (nivel del mar, e Ibarra a 5 °C y 25 °C), comparando el comportamiento del pack con y sin gestión térmica. Los resultados evidenciaron que la temperatura ambiente, y no la altitud por sí misma, es el factor determinante en la caída de voltaje y la reducción del SOC disponible, y que las estrategias de gestión térmica propuestas revierten dicho deterioro en condiciones frías sin necesidad de sobredimensionar el pack. Se concluye que la personalización de un BMS mediante la parametrización local de sus umbrales de protección y gestión térmica constituye una solución viable y de bajo costo para garantizar la seguridad, autonomía y vida útil de las baterías en vehículos convertidos que operan en ciudades de altura.

Palabras Clave: sistema de gestión de baterías (BMS), vehículo eléctrico convertido, ciudades de altura, batería $LiFePO_4$, gestión térmica, simulación en MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

The conversion of internal combustion vehicles into electric vehicles (retrofit) represents a sustainable and lower-cost alternative for the transition toward electric mobility; however, the battery management systems (BMS) currently used are not designed for the particular conditions of high-altitude cities, where the lower air density and low temperatures affect the performance of the battery pack. The objective of this work was to propose strategies for the efficient operation of the battery management module of converted electric vehicles in high-altitude cities, using the city of Ibarra (2225 m.a.s.l.) as a case study. For this purpose, an electro-thermal model of a $LiFePO_4$ battery pack in a 34S1P configuration (108 V – 100 Ah) and its corresponding BMS were developed in MATLAB/Simulink, including protection layers for overcurrent, temperature, state of charge (SOC), state of health (SOH), and cell balancing, to which active thermal management modules were added: temperature-dependent current derating, and hysteresis-controlled heating and cooling. The ascent-and-descent driving profile was simulated under three ambient conditions (sea level, and Ibarra at 5 °C and 25 °C), comparing the pack's behavior with and without thermal management. The results showed that ambient temperature, rather than altitude itself, is the determining factor in the voltage drop and the reduction of available SOC, and that the proposed thermal management strategies reverse this deterioration under cold conditions without the need to oversize the pack. It is concluded that customizing a BMS through local parameterization of its protection and thermal management thresholds constitutes a viable, low-cost solution to ensure the safety, range, and service life of batteries in converted vehicles operating in high-altitude cities.

Keywords: battery management system (BMS), converted electric vehicle, high-altitude cities, $LiFePO_4$ battery, thermal management, MATLAB/Simulink simulation.

CAPITULO I

1.1. Tema

Optimización de módulos de gestión de batería (BMS) para vehículos convertidos a eléctricos en ciudades de altura

1.2. Problema

Los vehículos convertidos a eléctricos se enfrentan a una serie de retos cuando operan en ciudades de altura, debido a las condiciones ambientales típicas de estas regiones como la menor presión atmosférica, las bajas temperaturas o la limitada capacidad de disipación del calor, que repercuten en el rendimiento de las baterías y, por tanto, en el correcto funcionamiento de los módulos de gestión de baterías (BMS). Los BMS estándar diseñados para vehículos eléctricos comerciales no tienen en cuenta los efectos específicos de la altitud, como la ineficiencia en el equilibrio de las celdas de la batería debido a la temperatura y la presión ambientales, el riesgo de sobrecalentamiento o el bajo rendimiento a bajas temperaturas, agravado por la menor capacidad de disipación de calor en estas condiciones, y la reducción de la vida útil de la batería debido a una mala gestión de la carga y la descarga. Dado que los vehículos convertidos a eléctricos tienen configuraciones de batería personalizadas y menos estandarizadas, es importante desarrollar y optimizar un sistema BMS para maximizar la seguridad, eficiencia y durabilidad del sistema eléctrico en condiciones de altura.

1.3. Formulación de la pregunta de investigación

¿Qué estrategias se pueden incorporar en un módulo de gestión de batería (BMS) para su correcto funcionamiento en vehículos convertidos a eléctricos operando en ciudades de altura?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Proponer estrategias para el funcionamiento eficiente del módulo de gestión de las baterías para vehículos convertidos a eléctricos en ciudades de altura.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Analizar el impacto de las condiciones ambientales de ciudades de altura en el BMS.
2. Desarrollar un modelo de un sistema de baterías y su gestión mediante un BMS incorporando simulaciones que evalúen su desempeño en condiciones de altura.
3. Proponer estrategias de gestión óptimas para personalizar un BMS en ciudades de altura.

1.5. Alcance

El estudio se enfocará en la optimización de un BMS considerando las condiciones ambientales de las ciudades de altura, en este caso en la ciudad de Ibarra. Se analizará el impacto de estas condiciones en el rendimiento térmico y eléctrico de las baterías mediante el análisis de estudios previos relacionados con la degradación de baterías en zonas de altura y las limitaciones de los BMS en estas condiciones, además se identificarán variables críticas que influyen en el rendimiento de estos. Para poner a prueba estos datos se desarrollará los modelos en el software Matlab/Simulink de las baterías y cada una de sus celdas, así como también del módulo de gestión de batería (BMS), este modelado integrará el comportamiento eléctrico como variaciones en voltaje, corriente y estado de carga (SOC), comportamiento térmico como generación y disipación de calor bajo presión atmosférica reducida, luego se realizarán simulaciones en ambientes controlados y a diferentes alturas, considerando las variables obtenidas en la investigación previa, mismas que determinarán y validarán estrategias para el equilibrado de celdas, carga, descarga y gestión térmica. Para validar estas simulaciones se realizarán pruebas de campo en un BMS instalado en un vehículo convertido a eléctrico donde se evaluarán datos sobre la autonomía, estabilidad térmica y durabilidad de las

baterías. Gracias a estos resultados se elaborarán recomendaciones para personalizar los BMS de vehículos convertidos a eléctricos en ciudades de altura.

1.6. Justificación

La transición a la movilidad eléctrica es determinante para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático. Para ello, la conversión de vehículos con motor de combustión interna en vehículos eléctricos representa una opción asequible y sostenible. Sin embargo, los módulos de gestión de baterías (BMS), esenciales para el funcionamiento seguro y eficiente de los vehículos eléctricos, no están diseñados para las condiciones ambientales de las ciudades de altura, lo que afecta a su rendimiento. Por lo tanto, es crucial optimizar los BMS para estas condiciones específicas para garantizar su funcionalidad y fiabilidad.

Las ciudades altas se caracterizan por condiciones únicas como una presión atmosférica baja, temperaturas bajas y ciclos de conducción en zonas urbanas marcados por paradas constantes y pendientes marcadas. Estas variables del entorno afectan directamente el desempeño de las baterías, originando problemas como desbalances en el estado de carga (SOC), sobrecalentamiento o disminución de la eficiencia energética. Los BMS convencionales no están diseñados para tratar estas especificidades, incrementando así los riesgos de fallos, disminuyendo la duración de las baterías y perjudicando la autonomía de los vehículos eléctricos convertidos.

Gracias a las herramientas avanzadas de simulación como Matlab y Simulink se podrá poner a prueba todos estos fenómenos que se presentan en un sistema de baterías y que los BMS deben tomar en cuenta a la hora de garantizar el correcto funcionamiento, la seguridad y una vida útil prolongada en los escenarios de ciudades de altura. De esta manera podemos reducir costos y el tiempo de la investigación al no tener la necesidad de fabricar prototipos físicos para cada iteración y a su vez nos asegura que nuestras propuestas sean fundamentadas antes de su implementación.

Este proyecto ayudará a determinar la viabilidad económica y tecnológica de los vehículos transformados. Esto será significativo para países en desarrollo, donde los costos elevados de los vehículos eléctricos obstaculizan su fabricación en masa. Además, este campo ha sido poco estudiado y se podrá ofrecer soluciones novedosas a las restricciones presentes de los sistemas BMS en ciudades elevadas. Los resultados no solo favorecerán a los usuarios finales y a las compañías de conversión, sino que también potenciarán la capacidad para ajustar las tecnologías eléctricas a diferentes circunstancias geográficas y climáticas, promoviendo la equidad en la transición energética. Por lo tanto, se fomentará la creación de un sistema de movilidad más inclusivo y sostenible, idóneo para las demandas y retos de las zonas de altura.

1.7. Antecedentes

En la última década se ha incrementado la popularidad de los vehículos eléctricos, esto por la creciente necesidad de reducir la dependencia a los combustibles fósiles y por ende a la contaminación ambiental. Más de la mitad del CO2 expulsado a la atmósfera, debido a la quema de combustibles fósiles, ha sido emitido apenas en los últimos 30 años [1]. De acuerdo con un reporte de la Unión Europea el sector del transporte es responsable del 28% del total de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) [2] es por esto por lo que cientos de países han promovido el uso de vehículos eléctricos (VE) siendo una opción de movilidad eficiente. La eficiencia de estos vehículos presenta una mejora con respecto al modelo tradicional. Por ejemplo, la eficiencia de los vehículos a gasolina ronda entre el 11% al 27% y de los vehículos a diésel ronda entre el 25% al 37% mientras que los vehículos eléctricos muestran una eficiencia hasta el 70% [3] mostrando un gran incremento en la eficiencia.

En la actualidad el método de almacenamiento más usado en los vehículos eléctricos son las baterías de iones de litio (Li-Ion), por su relación capacidad – durabilidad y otros factores adicionales como poco peso, ciclos de carga y efecto de memoria reducido [4]. Para satisfacer los requisitos de alto voltaje de estas aplicaciones, las baterías de iones de litio deben conectarse en serie, lo que significa que las corrientes que fluyen a través de

cada celda son estrictamente iguales.[1] Además, estas baterías deben funcionar dentro de un área de operación segura y fiable, teniendo un límite de temperatura y voltaje. Si se superan estas restricciones pueden provocar una mitigación del rendimiento de la batería e incluso pueden llegar a incendiarse o explotar, ya que a partir de los 150°C los electrolitos empiezan a destruirse. [2]

Otros aspectos importantes en la gestión de las baterías son la estimación del estado y la vida útil de la batería. Existen avances recientes en el análisis de Big Data para permitir la estimación de la salud de la batería basada en datos, concretamente, los clasifican en términos de viabilidad y rentabilidad, y discuten sus ventajas y limitaciones[3]. También se ha propuesto un sistema de aprendizaje automático basado en la regresión de procesos gaussianos (GPR) para predecir el envejecimiento de las baterías de iones de litio[4]. Otros enfoques exploran técnicas avanzadas de diagnóstico de fallos, ya que los fallos de las baterías pueden causar una degradación del rendimiento. [5]

Para la gestión de energía de los vehículos eléctricos se han diseñado sistemas de gestión de baterías (BMS) que se encargan de garantizar la seguridad, fiabilidad, rendimiento y vida útil de las baterías[6]. Los BMS actuales constan de varios bloques, como la unidad de suministro de energía, sensores y canales de comunicación integrados entre sí[7]. Los parámetros que debe cubrir un BMS son; adquisición de datos; procesamiento y almacenamiento de datos; gestión eléctrica; gestión térmica y comunicación.[8]

Según la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), las ventas de vehículos eléctricos han aumentado considerablemente. En el año 2023 las ventas de estos vehículos crecieron un 316,2% en comparación con el mismo período de 2022[9].

CAPITULO II
MARCO TEÓRICO

En la sociedad la necesidad de buscar una alternativa sostenible a los motores de combustión ha ido en aumento. En el pasado, la prioridad fue fomentar el uso de soluciones alternativas al automóvil, como el tren, los transportes públicos y la bicicleta.[10] Sin embargo, estas soluciones tienen dos grandes limitaciones: por una parte, necesitan un cambio en el estilo de vida de las personas y, por otra, no son viables en todas las circunstancias. Como resultado, estas prácticas han supuesto una mínima reducción de la emisión de gases contaminantes.[11]

Durante la última década, se ha producido un gran avance en la tecnología que permite fabricar coches que pueden funcionar parcial o totalmente con energía eléctrica.[12] Esta tecnología tendrá un impacto positivo en el clima, ya que los motores eléctricos pueden ser cero emisiones.[13] Debido a esto, varios países han implementado medidas para fomentar la incorporación de los vehículos eléctricos, como la reducción de los impuestos de importación de los automóviles eléctricos o la creación de estaciones de carga para estos vehículos.[14]

1.8. Impacto ambiental de las emisiones

Análisis científicos han demostrado que el transporte por motores de combustión es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica y del calentamiento global[15]. Por ejemplo, el uso de un vehículo particular genera la emisión de 11.6 kg de CO2 mientras que, los vehículos profesionales llegan a la emisión de 88 kg (taxi) y 124 kg (bus) de CO2[16]. Los vehículos eléctricos reducen el impacto ambiental en diferentes aspectos: limitan la emisión de gases de efecto invernadero, no necesitan productos químicos no biodegradables para su mantenimiento, como los lubricantes, y producen poco ruido[17]. Sin embargo, para evaluar la contribución a largo plazo de los vehículos eléctricos, es necesario tener en cuenta tres aspectos principales: primero, la producción

de la energía eléctrica necesaria para mover los vehículos; segundo, las especificaciones de las baterías, y tercero, el precio de los vehículos[18].

1.9. Energía eléctrica

Si bien los vehículos eléctricos no necesitan hidrocarburos, a nivel mundial, la mayor fuente de energía eléctrica procede de centrales termoeléctricas que queman hidrocarburos[19]. Por lo tanto, aunque el uso masivo de vehículos eléctricos reduciría las emisiones de CO2, el sistema aún dependería de los combustibles fósiles hasta que la tecnología permita la sustitución por fuentes renovables[13].

1.10. El uso de baterías

Mientras que el abastecimiento del vehículo de combustión interna necesita pocos minutos y la autonomía varía entre 500 y 1000 km, dependiendo del modelo[20], en el caso de los vehículos eléctricos son horas las que se necesitan para cargar la batería, cuya autonomía puede ser más limitada. Por ejemplo, el Kia Soul requiere aproximadamente 4,5 horas para una carga completa[21] y una autonomía máxima en ciclo no urbano de 300 km[20]. Esta autonomía está considerada para ciudades a nivel del mar.

Según el tipo de batería, hay distintos tipos de recarga: las recargas moderadamente rápidas utilizan una conexión que demanda una intensidad de 63 A, mientras que las cargas rápidas cuentan con tensiones de alrededor de 500 V e intensidades entre 50 y 550 A[22]. Sin embargo, hay que tener en cuenta que una mayor velocidad de recarga provoca temperaturas elevadas que afectan a la vida útil de las baterías, de modo que, cuanto más lenta sea la carga, mayor será el desempeño de la batería[22]. En los países sin recursos petrolíferos, el coste de abastecer un vehículo eléctrico es considerablemente más bajo que el de la gasolina. Por ejemplo, en el Reino Unido, donde la gasolina tiene un precio aproximado de $2,00 el litro, el abastecimiento de un vehículo del segmento C puede llegar a $120, mientras que, teniendo en cuenta que el precio medio de la energía eléctrica es de $0,251/KW, una carga del mismo modelo eléctrico cuesta alrededor de $10,04[18]. Sin embargo, en un futuro escenario con más coches eléctricos en circulación,

es plausible que la diferencia entre el costo de la energía eléctrica y el de la gasolina disminuya considerablemente, acercando los costos de abastecimiento de energía y gasolina.

1.11. Eficiencia

El vehículo eléctrico es más eficiente que el de gasolina, ya que convierte en energía cinética el 90 % de la energía generada, frente al 30 % de un vehículo convencional[23]. Además, los vehículos eléctricos están equipados con frenos regenerativos que permiten transformar la energía cinética en energía eléctrica durante el frenado[22]. Otra ventaja de los vehículos eléctricos es la relevante reducción de ruido, puesto que no utilizan un motor de combustión; por tanto, el uso generalizado de vehículos eléctricos reduciría considerablemente la contaminación acústica y el riesgo de enfermedades asociadas a ella.

1.12. Estado de los vehículos eléctricos en el país

En Ecuador, la marca Kia comercializó el primer vehículo eléctrico en 2016[24]. Desde entonces, el Gobierno ecuatoriano ha impulsado diversas medidas para impulsar la demanda de vehículos eléctricos, como la creación de proyectos con tarifas especiales que consisten en un descuento del 50 % en las tarifas existentes y en los horarios de baja demanda, entre las 22:00 y las 8:00[25]. Además, se aprobaron exenciones de aranceles, reducciones de impuestos para los vehículos y exenciones de IVA en los servicios de recarga y sus cargadores.[25] En Ecuador se han instalado 32 estaciones de carga y 62 puntos de carga públicos, pero se instalará más infraestructura de carga en las gasolineras del país conforme aumente la demanda de vehículos eléctricos[26]. Sin embargo, la presencia de los coches eléctricos en Ecuador todavía es muy limitada.

Algunas medidas de exoneración arancelaria ya se han implementado en el Ecuador por el Comité de Comercio Exterior, como son la resolución No. 009-2021 que establece una tarifa arancelaria variable para las importaciones de vehículos eléctricos, motos eléctricas, cocinas de inducción y radios para vehículos. También existe un decreto de exoneración

de tasa arancelaria para baterías de litio y sistemas de carga con y sin transformación de corriente[27].

Al analizar la adopción de los vehículos eléctricos en Ecuador, es crucial considerar que la tecnología de propulsión eléctrica constituye un nuevo paradigma tecnológico, por lo que resulta imperativo tener en cuenta los factores que influyen en la aceptación de una tecnología innovadora por parte de los usuarios. Además, es pertinente señalar que el vehículo eléctrico representa un bien sostenible que el usuario percibe como una solución ecológica para abordar problemas ambientales, como la contaminación atmosférica y el calentamiento global.

1.13. Conversión de vehículos eléctricos (Retrofit)

El término retrofit se utiliza en diversas aplicaciones y su traducción al español es «reacondicionar». Este proceso consiste en reutilizar una estructura existente a la que se añaden elementos, piezas nuevas, equipos nuevos y sistemas que no estaban disponibles anteriormente, con la finalidad de mejorar y modernizar algo específico. El retrofit de vehículos ha ganado popularidad en los últimos años, principalmente debido a la necesidad de reducir las emisiones de gases de escape y también por el alto coste que implica adquirir vehículos eléctricos nuevos. Con el paso del tiempo, el retrofit ha ido desarrollándose hasta que ahora es posible electrificar un vehículo de combustión interna y eliminar por completo las emisiones del motor de combustión[28].

El proceso consiste en elegir el vehículo, dimensionar el motor y el tipo de baterías. Un vehículo eléctrico utiliza motores eléctricos y controladores de motor en lugar de un motor de combustión interna, por lo que el motor de gasolina, el sistema de escape, el depósito de gasolina y el kit del embrague ya no son necesarios y se eliminan del vehículo durante el proceso de conversión. No es necesario cambiar el sistema de transmisión manual existente, ya que se acopla al motor eléctrico y además se instala un conjunto de baterías[29].

1.14. Componentes necesarios en un vehículo eléctrico

A continuación, se muestran los componentes principales de los que se constituye un vehículo eléctrico[30]:

- Motor eléctrico
- Baterías
- Sistema de gestión de la batería (BMS)
- Inversor DC/AC
- Convertidor DC/DC
- Convertidor AC/DC (freno regenerativo/carga de batería)
- Unidad de control electrónica
- Potenciómetro acelerador
- Cargador
- Climatización de la batería de tracción
- Freno regenerativo

1.15. Ventajas y desventajas

Para la viabilidad de un proyecto de este tipo se deben considerar algunas ventajas y desventajas las cuales se detallan a continuación:

Ventajas	Desventajas
Sostenibilidad ambiental	Costo elevado de la conversión
Costo inicial más bajo que un vehículo eléctrico nuevo	Complejidad técnica
Flexibilidad regulatoria y arancelaria	Homologación y normativas
Conservar modelos de vehículos clásicos o antiguos	Si el costo de recarga de las baterías es elevado puede no ser viable
Se adapta a las necesidades del propietario	
Ahorro en combustible	

Tabla 1: Ventajas y desventajas del retrofit

1.16. Sistema de gestión de baterías (BMS)

Se trata de un sistema electrónico que monitoriza y protege en todo momento los parámetros relacionados con la batería, como el estado de carga (SoC) y el estado de salud (SoH), y asegura su correcto funcionamiento y eficiencia, además de prolongar su vida útil. El BMS engloba el hardware (sensores, circuitos de equilibrado, actuadores, etc.) y el software (monitorización de datos en tiempo real, algoritmos de cálculo y control del BMS) que equipa el pack de baterías de los vehículos eléctricos y es responsable de mejorar su rendimiento y seguridad, aumentar su autonomía, proteger cada celda de posibles daños y prolongar su vida útil.[31]

1.17. Arquitectura y topología de un BMS

Un sistema de gestión de baterías no puede utilizarse de forma autónoma dentro de la infraestructura de un sistema. Se integra con otros módulos para cumplir sus objetivos. Por ejemplo, un sistema inteligente de automatización energética incluye un módulo de gestión de baterías (BMM), un módulo de interfaz de baterías (BIM), unidades de batería y un control supervisor de la batería. El sistema protege el paquete de baterías, prolonga su vida útil, gestiona la demanda de energía e interactúa con las distintas redes[32]

En el mercado de los sistemas de gestión de baterías existen tres topologías de implementación: centralizada, distribuida y modular. En la topología centralizada hay una única unidad de control y las celdas de la batería van unidas mediante múltiples cables. En la topología distribuida, cada unidad de control está dedicada a cada celda de la batería y se comunica con ella mediante un único cable. Por último, en la topología modular, varias unidades de control se ocupan de una celda de batería concreta, pero están interconectadas.[33] El BMS centralizado es el más económico, pero también el menos ampliable. El BMS distribuido es el más costoso, pero es el más fácil de instalar de los tres y ofrece el montaje más sencillo. El BMS modular incluye más hardware y requiere más esfuerzo de programación, y supone una elección entre las características y los problemas de las otras dos topologías.[31]

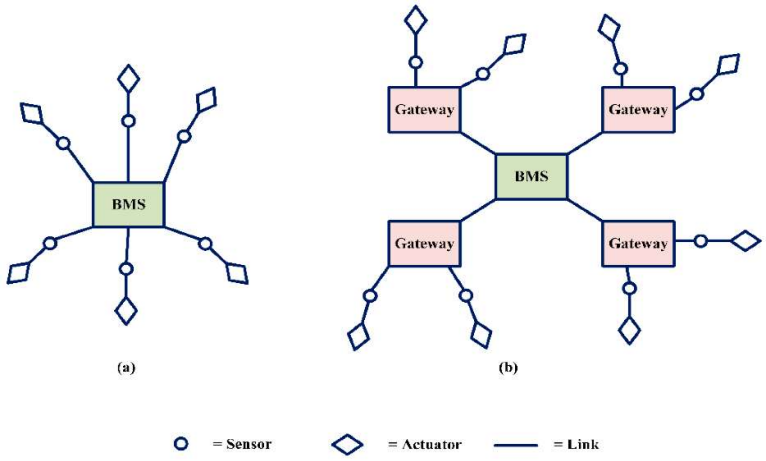


Ilustración 1:Topología de un BMS a) centralizada, b) distribuida

1.18. Funciones principales del BMS

Voltaje y corriente de la batería: indicadores clave de su salud y rendimiento. Las variaciones en el voltaje y la corriente pueden indicar problemas de degradación o mal funcionamiento;

Datos de temperatura: las variaciones anormales de temperatura pueden indicar un sobrecalentamiento, fuga térmica o una mala gestión térmica. Controlar la temperatura ayuda a identificar posibles riesgos para la seguridad;

SOC y SOH: estas métricas permiten comprender el estado general de la batería y su capacidad para mantener la carga, lo que resulta esencial para diagnosticar problemas de rendimiento;

Impedancia y resistencia: los cambios en la impedancia o la resistencia pueden indicar fallos internos o degradación de los componentes de la batería;

Ciclos de carga/descarga: analizar los patrones de los ciclos de carga y descarga ayuda a comprender el uso de la batería e identificar anomalías relacionadas con el rendimiento o la eficiencia.[34]

1.19. Tipos de baterías

En las aplicaciones de los vehículos eléctricos (VE), es indispensable que la batería posea un ciclo de vida prolongado, alta eficiencia energética, una elevada densidad de potencia y un nivel de seguridad adecuado. Entre los tipos de baterías más empleados en los VE se encuentran las de ión-litio (Li-ion), plomo-ácido, níquel-cadmio (NiCd), níquel-hidruro metálico (NiMH), fosfato de hierro y litio ($LiFePO_4$) y también han comenzado a desarrollarse e implementarse baterías de sodio, las cuales representan una alternativa prometedora debido a la abundancia y bajo costo del sodio en comparación con el litio. Aunque poseen una densidad energética inferior a la de las baterías de iones de litio, las baterías de sodio se destacan por su buen comportamiento térmico, su estabilidad química y su mayor sostenibilidad ambiental, lo que las convierte en una opción viable para aplicaciones futuras en movilidad eléctrica.

La tabla 1 muestra algunas de las características más relevantes de estos tipos de baterías ampliamente utilizadas. Se evidencia que la batería de iones de litio sobresale significativamente en comparación con otras opciones, particularmente en lo que respecta a su capacidad de proporcionar un ciclo de vida prolongado, aspecto fundamental para garantizar un rendimiento óptimo de los VE, con una vida útil que puede extenderse de 6 a 10 años. Por todo lo anteriormente mencionado, la batería de iones de litio se posiciona como la fuente de alimentación más popular para los vehículos eléctricos[35].

Tipo de batería	Vida útil (ciclos)	Voltaje nominal por celda (V)	Densidad de energía (Wh/kg)	Densidad de potencia (W/kg)	Eficiencia de carga (%)	Tasa de autodescarga (%/mes)	Temperatura de carga (°C)	Temperatura de descarga (°C)
Batería de Li-ion	600–3000	3.2–3.7	100–270	250–680	80–90	3–10	0 a 45	-20 a 60
Batería LiFePO	2000-5000	3.2	90-160	1000-3000	95-98	< 3	0 a 45	-20 a 60
Batería de Sodio	1000-5000	3.3	100-150	300-800	80	10-15	0 a 45	-40 a 60
Batería de ácido-plomo	200–300	2.0	30–50	180	50–95	5	-20 a 50	-20 a 50
Batería NiCd	1000	1.2	50–80	150	70–90	20	0 a 45	-20 a 65
Batería NiMH	300–600	1.2	60–120	250–1000	65	30	0 a 45	-20 a 65

Tabla 2: Tipos de baterías en vehículos eléctricos[36-38]

1.20. Condiciones específicas de ciudades de altura

Las ciudades ubicadas en áreas montañosas a altitudes superiores a 2000 m sobre el nivel del mar exhiben condiciones particulares que ejercen un impacto significativo en el diseño y la operatividad de los sistemas de gestión de baterías (BMS). En el ámbito de la ingeniería energética, se hace imperativo considerar los aspectos a mencionar en el proceso de optimización del desempeño del sistema de gestión de baterías y de las baterías en sí mismas. A continuación, se detallan dichos factores:

Presión atmosférica reducida: la reducción de la presión atmosférica es un factor clave a considerar. A medida que se aumenta la altitud, la presión atmosférica experimenta una disminución. Esta situación afecta la capacidad de los sistemas de gestión térmica para disipar el calor generado por las baterías, lo que puede tener implicaciones significativas en el rendimiento y la eficiencia del sistema en su conjunto;

Disminución de la densidad del aire: existe una disminución de la densidad del aire a medida que se aumenta la altitud. Esta reducción de la densidad afecta a los sistemas de enfriamiento por aire, lo que puede tener implicaciones en la transferencia de calor y en el rendimiento de los sistemas;

Variaciones de temperatura ambiente: En altitudes elevadas, las temperaturas pueden fluctuar drásticamente, lo que afecta tanto el rendimiento térmico como la química interna de las baterías;

Efectos en la electroquímica de las baterías: aunque las celdas de ion-litio están selladas, las condiciones de presión y temperatura pueden alterar las tasas de reacción electroquímica, afectando la eficiencia y la vida útil de las baterías.

1.21. Impacto de la altitud en vehículos eléctricos

Ya que el BMS es el encargado de regular el funcionamiento de las baterías en un vehículo eléctrico, asegurando su seguridad y eficiencia, la altura puede ser un factor que afecte la medición de ciertos parámetros y podría modificar la efectividad de dichas funciones.

1.22. Reducción de la autonomía en altura

En las ciudades de altura, se observa una disminución en las temperaturas medias, lo que tiene un impacto en la eficacia de las celdas de ion-litio. Se ha documentado que, en condiciones de temperatura inferiores a 0 °C, la autonomía de los vehículos eléctricos puede experimentar una reducción que oscila entre un 20 % y un 40 %, como consecuencia de la disminución de la eficiencia de la batería.[39] A medida que se incrementa la altitud, se produce una disminución en la densidad del aire, lo que resulta en una reducción de la resistencia aerodinámica y potencialmente puede conducir a un aumento en la eficiencia del motor eléctrico. No obstante, la disminución de la presión atmosférica también afecta los sistemas de refrigeración de la batería, que dependen de la circulación del calor por convección para disipar el calor.[40]

1.23. Gestión térmica y refrigeración

En este sentido, la menor densidad del aire en altitudes elevadas reduce la eficiencia de los sistemas de refrigeración utilizados en las baterías. Asimismo, existe el riesgo de sobrecalentamiento, ocasionado por la dificultad para disipar el calor generado en las celdas de batería, puede comprometer la vida útil del BMS y de las baterías y afectar su rendimiento. Se hace necesaria la implementación de ajustes en el algoritmo del BMS para compensar la reducción de enfriamiento, mediante la adecuación de los umbrales de temperatura, con el propósito de evitar daños en la batería.[41]

1.24. Impacto en la regeneración de la batería

En áreas montañosas con pendientes pronunciadas, la recuperación de energía a través del frenado regenerativo puede ser más eficiente, ya que el vehículo desacelera con mayor frecuencia. No obstante, cuando la batería opera en condiciones de baja temperatura, su capacidad de absorber energía regenerativa se ve comprometida, lo que resulta en una limitación de la cantidad de energía recuperada.[42]

1.25. Desbalance de celdas y variaciones de voltaje

En lo que respecta al impacto en la uniformidad de carga, se ha observado que las variaciones de temperatura en entornos de gran altitud afectan la resistencia interna de las celdas, generando un desequilibrio en el voltaje de cada una. Es preciso señalar que el sistema de balanceo del BMS (activo o pasivo) debe trabajar de manera más intensa, lo que puede incrementar el consumo energético y disminuir la eficiencia global del sistema.[43]

1.26. Impacto en el algoritmo de estimación del estado de carga (SOC) y estado de salud (SOH)

En el ámbito de la gestión de la energía, se ha observado una mayor inexactitud en la predicción del SOC (State of Charge) en condiciones de altitud. Este fenómeno se atribuye a la modificación de la dinámica de carga y descarga, lo que puede comprometer la precisión de los modelos tradicionales de estimación del SOC. También se evidencia una dificultad para evaluar el SOH, debido a la degradación acelerada que ocurre en entornos de alta altitud y que puede afectar la precisión de los algoritmos empleados para la predicción de la vida útil de las baterías.[44]

1.27. Factores que afectan el rendimiento de las baterías

Uno de los requerimientos importantes para lograr la gestión de la vida útil de la batería, se relaciona con el control de la temperatura de la batería y de esta forma limitar el rango de temperatura de funcionamiento. En la práctica, sólo la temperatura de la superficie de la celda puede ser medida, y se utiliza para el monitoreo de seguridad. Además, la degradación de las baterías de iones de litio se ve influenciada por la temperatura del núcleo, el cual está más cerca del electrodo [3], de esta forma, éste parámetro proporcionará una referencia más precisa para la estimación de la vida útil de la batería.

El rendimiento de las baterías en vehículos eléctricos depende de múltiples factores ambientales, operativos y de diseño. Entre los factores clave se incluyen la temperatura, la tasa de carga y descarga, la profundidad de descarga (DoD), el envejecimiento de las

celdas y el balanceo de voltaje entre celdas. Las bajas temperaturas afectan negativamente la movilidad de los iones de litio, lo que incrementa la resistencia interna de la batería y reduce su eficiencia.[45]

Temperatura (°C)	**Impacto en la Batería**
-20°C	Reducción del 40% en la capacidad de carga y aumento de resistencia interna.
0°C	Reducción del 20% en la eficiencia de carga y descarga.
25°C	Rango óptimo de operación.
50°C	Aceleración del envejecimiento de la celda y posible fuga térmica.

Tabla 3: Temperatura y su impacto en la batería[46]

1.28. Profundidad de Descarga (DoD) y Degradación

La profundidad de descarga (DoD) es una métrica que indica la proporción de la capacidad total de la batería que se utiliza en cada ciclo. Un DoD del 100% genera un mayor estrés en las celdas, lo que reduce la vida útil de la batería. Por lo tanto, se recomienda operar en un rango del 20 % al 80 % para prolongar la vida útil de la batería.[47]

1.29. Tasa de Carga y Descarga

El incremento de la temperatura de la batería, así como la posibilidad de la formación de litio metálico en el ánodo, son efectos asociados al aumento de las tasas de carga rápida. Estos efectos pueden tener como resultado una reducción de la capacidad de la batería y un aumento del riesgo de cortocircuitos.[48] Es por esto que se utiliza el término tasa C para describir la velocidad de carga o descarga relativa a la capacidad nominal de la batería. Por ejemplo, una tasa de 1C implica que la batería se carga completamente en una hora, mientras que una tasa de 0,5C indica una carga más lenta que se completa en dos horas. Se ha observado que la carga rápida, con tasas superiores a 1C, genera un incremento significativo en la temperatura interna, lo cual acelera la degradación del

sistema electroquímico. Por el contrario, la carga lenta, con tasas inferiores a 0,5C, reduce el estrés térmico sobre la batería, promoviendo una mayor vida útil y un funcionamiento más estable.[49]

1.30. Envejecimiento de la Batería

El propósito de este estudio es analizar los factores que contribuyen a la pérdida de capacidad de las baterías de iones de litio con el tiempo. Se examinó el crecimiento de la capa SEI (Solid Electrolyte Interphase), que aumenta la resistencia interna, así como los efectos de los ciclos de carga y descarga repetidos, que degradan los materiales del cátodo y el ánodo. Además, se investigó la influencia de la exposición a altas temperaturas, que acelera la degradación de los electrodos.[46]

Como resultado se destaca el incentivo de la transición hacia la movilidad eléctrica como una gran alternativa para mitigar el impacto ambiental de los motores de combustión interna. Tambien podemos comprender que el BMS se encarga del monitoreo, protección y optimización del rendimiento de las baterías, garantizando seguridad y eficiencia operativa. Por último existe una gran variedad de baterías, pero la de sodio destaca como una opción prometedora por su bajo costo, abundancia y estabilidad térmica.

CAPÍTULO III
MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo describe el enfoque metodológico adoptado, los modelos desarrollados, las herramientas computacionales utilizadas y las condiciones de simulación consideradas. Además se detallan los elementos necesarios para el desarrollo del estudio, incluyendo los criterios de selección de los componentes del sistema de batería, la descripción de las variables físicas y eléctricas involucradas, así como los procedimientos seguidos para la evaluación del desempeño bajo condiciones de altura. Esta sección proporciona el soporte técnico y conceptual necesario para la interpretación de los resultados en el siguiente capítulo.

1.31. Métodos

El enfoque de esta investigación es cuantitativo y se fundamenta en la simulación computacional mediante el uso de Matlab, permitiendo medir, analizar y comparar el desempeño del sistema de gestión de baterías bajo condiciones específicas, como son las ciudades de altura, obteniendo una evaluación objetiva y sistemática del comportamiento del BMS.

Tipo de investigación

- Investigación aplicada

Este estudio tiene un carácter aplicado que busca plantear la optimización del BMS para vehículos convertidos a eléctricos que operan en ciudades de gran altitud. Se orienta a generar soluciones prácticas y útiles para la movilidad eléctrica en condiciones particulares del entorno.

- Investigación experimental

Se considera experimental debido al uso de simulaciones que permiten reproducir el comportamiento del sistema de baterías y su gestión a diferentes altitudes. Aunque no se

realicen pruebas físicas, el entorno de simulación permite controlar variables, evaluar el rendimiento, y comparar configuraciones o estrategias diferentes.

- Investigación descriptiva y explicativa

Es descriptiva porque inicialmente será necesario plantear las condiciones de funcionamiento de los vehículos eléctricos en ciudades de altura, así como las funciones y limitaciones de los BMS comerciales y es explicativa porque se pretende entender y justificar cómo ciertas variables (como presión atmosférica, temperatura, densidad del aire, etc.) afectan el desempeño del sistema, y por qué ciertas estrategias de gestión resultan más eficientes bajo estas condiciones.

Flujograma de la metodología

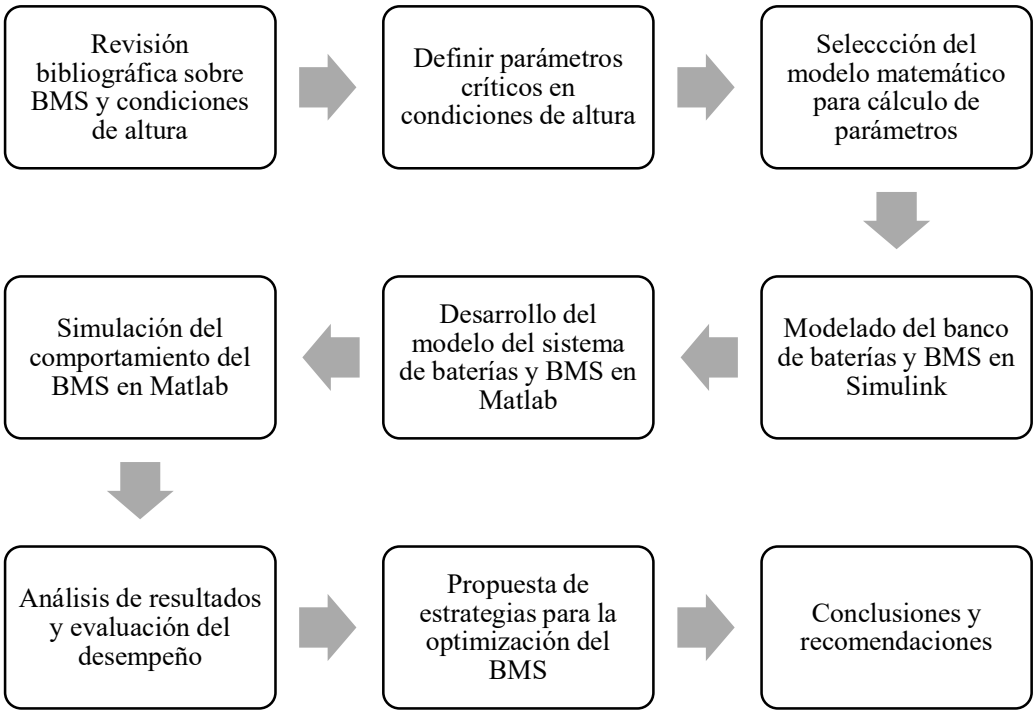


Ilustración 2: Flujograma de metodología

1.32. Materiales

A continuación, se describe el software empleado en el desarrollo de la presente investigación, mismos que constituyen herramientas fundamentales para la modelación, simulación y análisis del sistema de gestión de baterías propuesto. La selección de estas plataformas se basa en su amplia aceptación en el ámbito académico e industrial, así como en su capacidad para representar de forma precisa sistemas dinámicos complejos, integrar modelos matemáticos avanzados y considerar variables ambientales relevantes.

1.32.1. Matlab

Matlab es un entorno de programación de alto nivel y una plataforma de computación numérica desarrollado por MathWorks diseñado para el análisis de datos, desarrollo de algoritmos, y la creación de modelos y simulaciones. Esta capacidad de diseño de modelos y simulación de Matlab se ha utilizado y desarrollado ampliamente en varias disiplinas de la ingeniería y la ciencia.[50] Además, ofrece una gran variedad de toolboxes específicos para áreas como sistemas de control, procesamiento de señales, electrónica de potencia, y sistemas eléctricos.

En esta investigación Matlab se usa para el desarrollo y análisis del sistema. Gracias a su capacidad para manipular datos numéricos y resolver sistemas complejos de ecuaciones, se podrá implementar los modelos matemáticos que describen el comportamiento electroquímico de las baterías, así como los algoritmos de control que rigen la gestión del sistema. Además, será utilizado para incorporar variables ambientales relevantes, como la temperatura y la presión atmosférica propias de ciudades de altura, que influyen significativamente en el desempeño de las baterías. La capacidad de Matlab para procesar estos parámetros y generar resultados cuantitativos confiables lo convierte en una herramienta ideal para simular distintos escenarios de operación y evaluar el rendimiento del BMS en ciuades de altura.

3.3.1. Simulink

Simulink es una herramienta complementaria a Matlab que permite la simulación y modelado de sistemas dinámicos en un entorno gráfico basado en diagramas de bloques. Está orientado a la representación y análisis de sistemas físicos, de control, eléctricos y mecánicos. Simulink permite diseñar sistemas complejos facilitando la visualización de interacciones entre componentes y la ejecución de simulaciones en tiempo continuo, discreto o híbrido. Es ampliamente utilizado en la industria y en la investigación para el desarrollo y prueba de sistemas embebidos y de control, como los sistemas de gestión de batería (BMS).

Simulink complementa el trabajo realizado en Matlab proporcionando una plataforma gráfica que permite modelar de manera visual el sistema completo de baterías y su gestión mediante el BMS. Gracias a su entorno basado en diagramas de bloques, será posible construir un modelo del sistema que integre los componentes eléctricos, de control y ambientales. Simulink facilita la representación de la arquitectura del BMS, permitiendo simular flujos de energía, estrategias de carga y descarga, protección térmica y balanceo de celdas. Además, al poder incorporar condiciones ambientales como la altitud, se pueden analizar los efectos de estas variables en tiempo real durante las simulaciones para evaluar el comportamiento del sistema en entornos de altura.

1.33. Modelos matemáticos

El diseño de un BMS debe contemplar la monitorización continua de voltaje, corriente y temperatura, variables que no sólo determinan el estado operativo de la batería, sino que también intervienen directamente en los procesos de estimación de su estado de carga (SOC) y estado de salud (SOH).

Para que el BMS pueda medir y estimar los parámetros y variables de la manera más precisa posible, se requieren ciertos algoritmos o modelos matemáticos. La implementación de estos modelos varía según la aplicación, pero para un vehículo eléctrico se requieren estimar los siguientes parámetros.

1.34. Modelado eléctrico de la batería

El modelado de la batería constituye la base metodológica para comprender su comportamiento ante diferentes condiciones de operación. Los modelos de baterías se clasifican en tres tipos principales:[51]

1. **Modelos electroquímicos**: describen los procesos internos con alto nivel de detalle físico, aunque requieren elevados recursos de cómputo.
2. **Modelos de circuito equivalente (ECM)**: simplifican el comportamiento eléctrico de la celda mediante resistencias y capacitancias, equilibrando exactitud y complejidad.
3. **Modelos basados en datos**: emplean algoritmos de inteligencia artificial o aprendizaje automático para inferir la dinámica de la batería a partir de mediciones históricas.

Entre estos, el modelo de circuito equivalente, en específico el modelo de Thévenin ha sido identificado como el más adecuado para simulaciones de BMS por su precisión y facilidad de implementación. Este modelo reproduce con fidelidad la respuesta transitoria de voltaje ante variaciones de carga, mediante una fuente de voltaje dependiente del SOC, una resistencia interna y una red RC en paralelo que representa los efectos de polarización.[52]

En este estudio, el modelo de Thévenin se implementará en Matlab/Simulink, empleando los bloques del entorno Simscape Electrical, con los parámetros de resistencia R_0, capacitancia C_1 y resistencia de polarización R_1. El voltaje terminal se expresa como:

$$V(t) = V_{OCV}(SOC) - I(t)R_0 - V_p(t) \quad (1)$$

donde $V_p(t)$corresponde al voltaje de polarización del circuito RC equivalente.[52]

3.5. Estado de Carga (SOC)

La estimación precisa del estado de carga (SOC) es esencial para garantizar la seguridad, durabilidad y eficiencia de un sistema de baterías. Es una función crítica del BMS, ya que determina la cantidad de energía utilizable en la batería en tiempo real. Los métodos de estimación se clasifican en cinco grupos: métodos convencionales, basados en modelo, de filtrado adaptativo, basados en datos e híbridos. [51]

Entre ellos, los métodos de filtrado adaptativo, especialmente los que utilizan el Filtro de Kalman Extendido (EKF), son los más empleados en aplicaciones de simulación y control por su equilibrio entre exactitud y estabilidad numérica.[51]

En esta investigación se seleccionó un modelo híbrido de estimación basado en el conteo de culombios (Coulomb Counting) corregido mediante un Filtro de Kalman Extendido (Extended Kalman Filter, EKF), debido a su equilibrio entre simplicidad de implementación y precisión en entornos de simulación. El método de conteo de culombios se fundamenta en la integración de la corriente eléctrica respecto al tiempo:

$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{1}{Q}\int_0^t I(\tau)d\tau \quad (2)$$

donde SOC_0es el estado inicial de carga, $C_n$la capacidad nominal de la batería (Ah) e $I(\tau)$ la corriente instantánea (A).[51]

El método Coulomb Counting presenta acumulación de error por deriva de los sensores y variación de la capacidad efectiva, motivo por el cual se complementa con un algoritmo de corrección basado en EKF. Este algoritmo ofrece mayor precisión y estabilidad frente al ruido de medición y la variación de parámetros eléctricos, siendo ampliamente utilizado tanto en entornos de simulación como en sistemas embebidos de gestión energética.

El Filtro de Kalman Extendido (EKF) es una de las herramientas más empleadas para la estimación del estado de carga (SOC) en sistemas de gestión de baterías (BMS), debido a su capacidad para manejar sistemas no lineales como el comportamiento eléctrico de

las baterías de ion-litio. Este filtro representa una mejora significativa respecto al filtro de Kalman clásico, ya que este fue hecho para sistemas lineales y no puede modelar con precisión las variaciones dinámicas de voltaje, corriente y temperatura, características de las celdas electroquímicas.[51]

El principio de funcionamiento del EKF consiste en linealizar el modelo no lineal de la batería alrededor del punto de operación actual, utilizando una expansión de primer orden de la serie de Taylor.

Esto permite aproximar las ecuaciones del sistema en una forma que puede ser procesada mediante las mismas operaciones matriciales del Kalman clásico, sin perder la capacidad de capturar la dinámica no lineal del sistema[51]

El modelo de EKF se formula a partir de un sistema no lineal descrito mediante las ecuaciones de estado:

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \\ y_k = h(x_k, u_k) + v_k \end{cases} \quad (3)$$

Donde x_k representa el vector de estados (que incluye el SOC y la tensión de polarización de la celda), u_k las variables de entrada (corriente) y y_k la salida del sistema (voltaje terminal). Los términos w_k y v_k corresponden a los ruidos de proceso y medición, respectivamente.[51]

Se resalta que el EKF, al combinar mediciones de voltaje y corriente con un modelo predictivo, logra reducir los errores de estimación de SOC a menos del 2 % en simulaciones dinámicas, superando ampliamente los métodos directos o basados exclusivamente en integración. Así mismo los filtros adaptativos, como el EKF y el UKF, son los métodos más empleados en sistemas BMS avanzados, dada su compatibilidad con los entornos de simulación de Matlab/Simulink y su capacidad para adaptarse a condiciones de operación cambiantes.[51]

El SoC es un indicador clave de la autonomía del vehículo eléctrico, ya que permite determinar cuánta energía queda disponible para su funcionamiento.[53]

La implementación del modelo híbrido de estimación del SOC se desarrolla en el entorno Matlab/Simulink utilizando el conjunto de herramientas Simscape Electrical y bloques de modelado dinámico.

El esquema general del sistema incluye:

1. **Subsistema de batería:** basado en el modelo equivalente de Thévenin, que permite simular la respuesta transitoria del voltaje terminal mediante resistencias internas R_0, R_1y una capacidad C_1, asociadas a la polarización de la celda.[54]
2. **Bloque de integración de corriente:** encargado del cálculo primario del SOC mediante conteo de culombios.
3. **Filtro de Kalman Extendido:** implementado mediante el bloque Extended Kalman Filter o mediante una función personalizada (MATLAB Function Block), donde se definen las matrices de transición de estado F_k, observación H_k, y las covarianzas de ruido Q_ky R_k.[54]
4. **Módulo de corrección:** encargado de ajustar el valor de SOC con base en la diferencia entre el voltaje medido y el estimado, aplicando la ganancia de Kalman.

Este tipo de implementación resulta ideal para entornos de simulación, ya que no requiere datos experimentales extensivos ni entrenamiento previo, a diferencia de los métodos basados en aprendizaje automático.[54]

3.6. Estado de Salud (SOH)

El Estado de Salud (SOH) constituye un parámetro fundamental para determinar la condición real de una batería de ion-litio en un vehículo eléctrico, ya que refleja su degradación acumulada, su capacidad disponible y su aptitud para seguir entregando energía de forma segura. El SOH sintetiza la salud global de la batería en términos de

capacidad, envejecimiento y estabilidad operativa, lo que lo convierte en un elemento crítico para la operación confiable del BMS y para la toma de decisiones durante la vida útil del vehículo.[55]

El método más común de estimación del SOH se basa principalmente en el análisis de la capacidad, dado que la degradación electroquímica reduce progresivamente la cantidad de carga que la batería puede almacenar y entregar. Los ensayos de capacidad consisten en descargar completamente la batería desde un estado totalmente cargado hasta un voltaje de corte definido, registrando corriente y voltaje para determinar la capacidad efectiva. Esta capacidad medida se compara con la capacidad nominal inicial definida por el fabricante, permitiendo determinar la fracción de degradación acumulada. Por ello, los métodos experimentales directos consideran esta comparación como una herramienta confiable para evaluar el envejecimiento en condiciones controladas de laboratorio y validar modelos de degradación utilizados en simulaciones y sistemas BMS.[56]

El método basado en capacidad, se formula mediante la relación entre la capacidad máxima disponible en el tiempo y la capacidad nominal inicial. Se expresa matemáticamente como:

$$SOH = \frac{Q_{actual}}{Q_{nuevo}} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

- Q_{actual} es la capacidad actual de la batería después de varios ciclos de carga y descarga.
- Q_{nuevo} es la capacidad nominal original de la batería cuando era nueva.

Este método se utiliza de manera extensa debido a su estabilidad, su relación directa con los mecanismos de degradación y su facilidad de implementación tanto en sistemas reales como en ambientes de simulación como MATLAB/Simulink.[56] Un SoH del 100%

significa que la batería está en perfecto estado, mientras que un SoH del 80% indica que ha perdido el 20% de su capacidad original.[57]

3.7. Balanceo de Celdas

El balanceo de celdas constituye una de las funciones esenciales del sistema de gestión de baterías (BMS), ya que garantiza la uniformidad en los niveles de carga entre las celdas que conforman un paquete de baterías. El BMS debe igualar los voltajes de cada celda con el fin de evitar condiciones de sobrecarga o sobre descarga, especialmente en configuraciones en serie, donde incluso una pequeña desviación puede comprometer la seguridad y el rendimiento global del pack. Esta función es imprescindible para mantener la estabilidad operativa del sistema y prolongar el ciclo de vida útil de la batería en vehículos eléctricos.[55]

Existen dos principales métodos, balanceo activo y balanceo pasivo, mismos que se explican a continuación:

El balanceo activo es una estrategia más avanzada que permite transferir la energía de las celdas con mayor carga a las celdas con menor carga, en lugar de disiparla en forma de calor[54] y funciona de la siguiente manera: en primer lugar, se procede a la identificación de las celdas que presentan un mayor voltaje, así como de aquellas que exhiben un menor voltaje. Posteriormente, la energía excedente contenida en las celdas que presentan una mayor carga se transfiere a aquellas que presentan una menor carga, mediante la utilización de convertidores de energía DC-DC o condensadores. Este proceso se repite hasta que todas las celdas alcanzan un nivel de carga uniforme.[54]

El balanceo pasivo es el método más simple y económico. Consiste en disipar el exceso de energía de las celdas con mayor carga en forma de calor mediante resistencias de derivación.[36] El procedimiento se lleva a cabo de la siguiente manera: se detectan las celdas que presentan un mayor voltaje dentro del conjunto de baterías y se activan resistencias en paralelo con el propósito de disipar el exceso de energía en forma de calor.

Este proceso se mantiene hasta que el voltaje de todas las celdas se encuentre nivelado.[36]

Conociendo cómo funcionan estos dos métodos, en términos de desempeño energético de las baterías, el balanceo activo suele ser mejor que el pasivo, porque transfiere energía desde celdas con mayor carga hacia celdas con menor carga en lugar de disiparla como calor, lo que reduce pérdidas y puede acelerar el proceso de ecualización, especialmente en paquetes de mayor capacidad (típicos de un vehículo eléctrico). Es por esto por lo que el balanceo activo es más eficiente y rápido, a costa de mayor complejidad de potencia y control.[58]

Sin embargo, el criterio principal es viabilidad y robustez de la simulación y el balanceo pasivo suele ser la mejor elección para un primer modelo de BMS, porque es más simple de implementar, tiene menos parámetros difíciles de identificar y, además, Matlab ofrece bloques y ejemplos listos para modelar el algoritmo y el dimensionamiento de la resistencia de sangrado (bleed resistor). Esto reduce el tiempo de desarrollo del modelo y permite priorizar la “optimización” del BMS (lógica de activación, umbrales, tiempos, condiciones de reposo, interacción con SOH/temperatura, etc.) [59]

El balanceo pasivo también presenta cierta relevancia desde el punto de vista térmico. Este tipo de balanceo disipa el exceso de energía de las celdas con mayor voltaje mediante resistencias, transformando dicha energía en calor. En condiciones de altura, la menor densidad del aire reduce la eficacia de la convección, que es el mecanismo mediante el cual el calor se transfiere desde la superficie de los componentes hacia el aire circundante debido al movimiento del fluido. Al existir menos masa de aire en contacto con las superficies calientes, la capacidad de evacuar calor disminuye, lo que puede provocar incrementos locales de temperatura en las celdas y en los elementos del BMS. Por esta razón, el balanceo pasivo permite analizar de forma directa el impacto de la disipación térmica y evaluar cómo la altitud influye en la estabilidad térmica del paquete de baterías.[59]

3.8. Gestión térmica

La gestión térmica de las baterías constituye una función crítica dentro del sistema de gestión de baterías (BMS), debido a que la temperatura influye directamente en la eficiencia, seguridad y vida útil de las celdas de ion-litio utilizadas en vehículos eléctricos. Cuando la batería opera fuera de su rango térmico óptimo, su rendimiento disminuye significativamente y se aceleran los procesos de degradación química, afectando tanto la capacidad disponible como la resistencia interna. El BMS debe monitorear y regular la temperatura de cada celda de manera continua para evitar sobrecalentamiento y preservar la integridad del sistema, garantizando así una operación segura y eficiente del vehículo eléctrico.[60]

Desde una perspectiva metodológica orientada a la simulación en Matlab, el uso del balanceo pasivo resulta adecuado ya que facilita la integración de modelos eléctricos y térmicos con menor complejidad computacional. La disipación por convección puede incorporarse mediante coeficientes de transferencia de calor ajustados a condiciones de altura, permitiendo estudiar la interacción entre balanceo, temperatura y degradación de las celdas. En este punto, el balanceo activo puede plantearse como una alternativa de mejora o como trabajo futuro, destacando que su principal ventaja radica en la reducción de pérdidas térmicas al redistribuir energía entre celdas en lugar de disiparla. No obstante, su implementación implica un mayor nivel de complejidad en el modelado y control, lo que justifica que el balanceo pasivo sea la opción inicial para un estudio de optimización enfocado en condiciones reales de operación en ciudades de altura.

Como conclusión del capítulo se definió un marco metodológico sustentado un enfoque cuantitativo y experimental basado en simulación computacional. Se justificó el uso de Matlab y Simulink como herramientas principales para modelar el comportamiento eléctrico del sistema bajo condiciones ambientales variables, seleccionando el modelo equivalente de Thévenin por su adecuada relación entre precisión y complejidad. Asimismo, se estableció un esquema híbrido para la estimación del SOC mediante conteo de culombios corregido con un filtro de Kalman extendido, y un método basado en la

capacidad para la estimación del SOH, ambos compatibles con entornos de simulación. Finalmente, se fundamentó la elección del balanceo pasivo y la inclusión de la gestión térmica como elementos clave para analizar los efectos de la altitud en la disipación de calor y la estabilidad del sistema, constituyendo así la base técnica para el desarrollo y validación de las simulaciones presentadas en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS

En el presente capítulo se desarrolla la validación mediante simulación de los modelos matemáticos formulados en el capítulo 3, con el objetivo de analizar el comportamiento eléctrico y térmico del banco de baterías $LiFePO_4$ y del sistema de gestión de baterías (BMS) aplicado a un vehículo convertido a eléctrico que opera en ciudades de altura. Para ello, se emplea el entorno de programación MATLAB y su plataforma de modelado dinámico Simulink, donde se modela el pack de baterías, se grafica los valores de voltaje, corriente, temperatura, los algoritmos de estimación del estado de carga (SoC) y estado de salud (SoH), así como la lógica de protección y balanceo de celdas. Adicionalmente, se integra un modelo térmico que considera las condiciones ambientales propias de la altitud, particularmente la variación de temperatura y la reducción del coeficiente de convección, factores que influyen directamente en la disipación de calor y en el desempeño global del sistema. A partir de distintos escenarios de operación representativos del ciclo urbano, se presentan y analizan los resultados obtenidos, permitiendo evaluar la estabilidad del modelo, la efectividad del BMS y el impacto de las condiciones de altura en la operación del banco de baterías.

4.1. Modelo electroquímico de la batería $LiFePO_4$

El modelo electroquímico de la batería $LiFePO_4$ usado en esta investigación se basa en el modelo equivalente de Thevenin desarrollado en el Capítulo 3, el cual permite representar de manera adecuada la dinámica transitoria y el comportamiento estacionario de la celda mediante un circuito eléctrico equivalente compuesto por una fuente de voltaje dependiente del estado de carga (OCV), una resistencia interna óhmica y una red RC que modela los fenómenos de polarización. Este enfoque ofrece un equilibrio entre precisión y complejidad computacional, siendo especialmente adecuado para simulaciones dinámicas en tiempo real dentro de entornos de modelado como Simulink.

Para la configuración del sistema de almacenamiento energético se estableció, desde la etapa de proforma técnica del vehículo convertido, la necesidad de un banco de baterías con un voltaje nominal de 108 V y una capacidad de 100 Ah, parámetros acordes con los requerimientos de potencia y tensión del sistema de tracción eléctrica. En función de estas especificaciones, se diseñó el arreglo del pack utilizando la herramienta Battery Builder del entorno de Matlab, permitiendo estructurar jerárquicamente la batería desde el nivel de celda hasta el nivel de paquete completo dentro de Simulink.

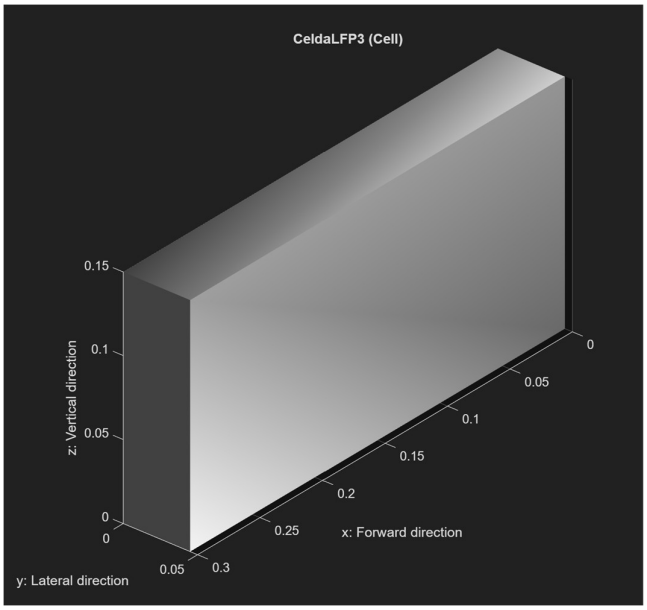


Ilustración 3: Diseño de celda LiFePo4

Considerando que las celdas $LiFePO_4$ presentan un voltaje nominal aproximado de 3,2 V por unidad, se definió una configuración de 34 celdas conectadas en serie (34S), obteniendo un voltaje nominal total cercano a 108,8 V, valor coherente con la especificación inicial de 108 V del sistema. Para alcanzar la capacidad nominal de 100 Ah, se seleccionaron celdas con capacidad equivalente, manteniendo una configuración 34S1P, lo que simplifica el modelado térmico y el análisis de balanceo al tratarse de una única rama en paralelo.

La estructura geométrica del pack, generada mediante Battery Builder, muestra una disposición lineal de las celdas a lo largo del eje longitudinal como se muestra en la ilustración 4, lo cual permite modelar tanto la distribución eléctrica como la propagación térmica entre elementos adyacentes. Esta configuración resulta adecuada para evaluar gradientes de temperatura, efectos de resistencia interna acumulada y comportamiento dinámico bajo condiciones de descarga propias del ciclo urbano. Asimismo, la parametrización del pack incluyó límites de operación en términos de voltaje mínimo y máximo por celda, corriente máxima de descarga y rangos térmicos permitidos, garantizando que la simulación reproduzca condiciones realistas de operación y protección del sistema.

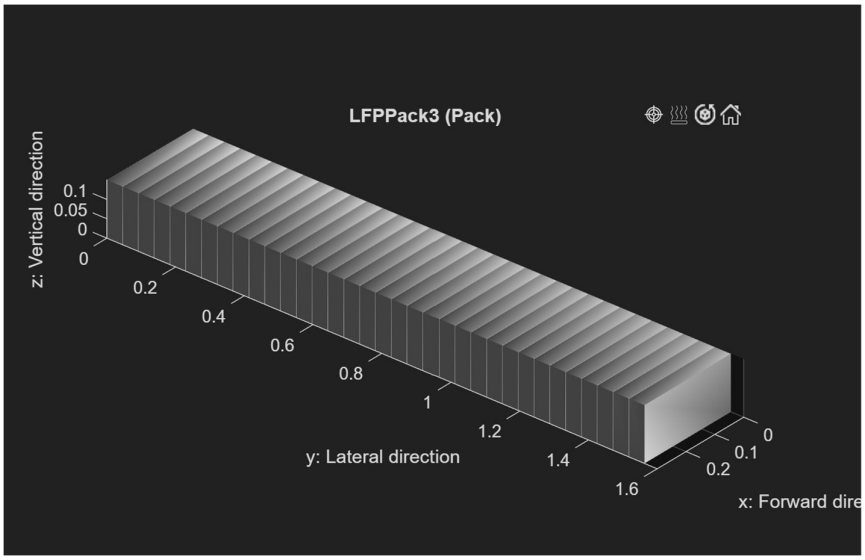


Ilustración 4: Diseño del pack de baterías

4.2. Parametrización de las celdas

La parametrización del modelo de celda $LiFePO_4$ se realizó definiendo tablas dependientes del estado de carga (SoC) y de la temperatura con el objetivo de capturar el comportamiento no lineal característico de esta tecnología. Para ello, se estableció un vector discreto de estado de carga comprendido entre 0 y 1, con puntos intermedios en 0,1; 0,25; 0,5; 0,75 y 0,9 tal como se observa en la ilustración 5.

Vector of state-of-charge values, SOC	[0, .1, .25, .5, .75, .9, 1]

Ilustración 5: Vector de valores para SoC – Captura de Pantalla Battery Builder

En cuanto a la dependencia térmica, en la ilustración 6 se aprecia la definición de un vector de temperaturas de 278 K, 293 K y 318 K, equivalentes aproximadamente a 5 °C, 20 °C y 45 °C, representando condiciones de operación en ambientes fríos, nominales y de temperatura elevada. Esta selección resulta pertinente para el análisis en ciudades de altura, donde las variaciones térmicas pueden afectar tanto la resistencia interna como la tensión en circuito abierto de la celda.

› Vector of temperatures, T	[278, 293, 318]	K

Ilustración 6: Vector de temperatura – Captura de Pantalla Battery Builder

La tensión en circuito abierto V_0 (SoC, T) fue ingresada como una tabla bidimensional dependiente del estado de carga y la temperatura tal como se observa en la ilustración 7, con valores comprendidos entre 2,7 V y 3,62 V aproximadamente, coherentes con el comportamiento típico de una celda $LiFePO_4$. Asimismo, se estableció un rango operativo de tensión terminal entre 2,5 V y 3,65 V por celda, garantizando que el modelo respete los límites de seguridad recomendados para evitar degradación prematura o condiciones de sobrecarga.

Open-circuit voltage, V0(SOC,T)	[2.7, 2.75, 2.8; 3.10, 3.15, 3.20; ...	V
Terminal voltage operating range [Min Max]	[2.5, 3.65]	V

Ilustración 7: Vector voltaje en circuito abierto – Captura de Pantalla Battery Builder

La resistencia interna R_0 (SoC, T) fue definida igualmente como función del estado de carga y la temperatura, con valores en el orden de los milésimos de ohm (≈ 0,0021–0,003 Ω) mostrados en la tabla 4, permitiendo modelar la caída de tensión bajo carga y las variaciones de pérdidas resistivas en función de las condiciones operativas. Esta parametrización es fundamental para analizar el incremento térmico debido a pérdidas por efecto Joule, especialmente bajo corrientes elevadas de descarga.

0.0030	0.0022	0.0023
0.0028	0.0022	0.0023
0.0029	0.0022	0.0024
0.0027	0.0021	0.0023
0.0027	0.0021	0.0023
0.0029	0.0022	0.0023
0.0030	0.0022	0.0023

Tabla 4: Matriz 7x3 de Resistencia Interna R0

La capacidad nominal de la celda fue fijada en 100 Ah, coherente con la especificación del banco de 108V – 100Ah definido en la etapa de diseño preliminar. En el apartado térmico se asignó una masa térmica de 2170 J/K, calculada como el producto de la masa de una celda $LiFePO_4$ prismática de 100 Ah representativa de la utilizada en este trabajo (1,92 kg) por el calor específico reportado para esta química (≈1130 J/(kg·K)). En cuanto a la resistencia térmica celda-ambiente (Ilustración 9), un primer valor de 0,2 K/W resultó ser excesivamente optimista frente a las dimensiones reales de la celda de referencia (EVE LF100LA, 160 × 118,5 × 50,1 mm): un cálculo de la resistencia de convección natural R = 1/(h·A) a partir del área de las caras expuestas de una celda interior del arreglo (es decir, excluyendo las dos caras grandes en contacto con las celdas adyacentes, A_celda ≈ 0,0279 m^2) arroja valores de aproximadamente 4,48 K/W a nivel del mar (h = 8 W/(K·m^2)) y 5,53 K/W en Ibarra (h = 6,48 W/(K·m^2)), es decir, entre 20 y 27 veces mayores que el valor inicialmente asumido. Por ello, la resistencia térmica celda-ambiente se recalculó de forma dinámica en cada escenario a partir de esta relación, en lugar de emplear un valor fijo, garantizando que el modelo represente una disipación de calor realista y sensible al coeficiente de convección de cada escenario.

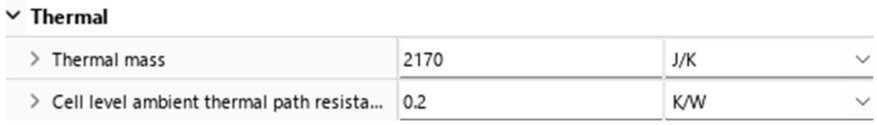


Ilustración 8: Masa térmica y resistencia térmica hacia el ambiente – Captura de Pantalla Battery Builder

La configuración adoptada proporciona un modelo electro–térmico acoplado, capaz de representar la interacción entre corriente, caída de tensión, generación de calor y variación de temperatura, constituyendo la base para la posterior integración del sistema de gestión BMS y el análisis de desempeño bajo distintos escenarios de simulación.

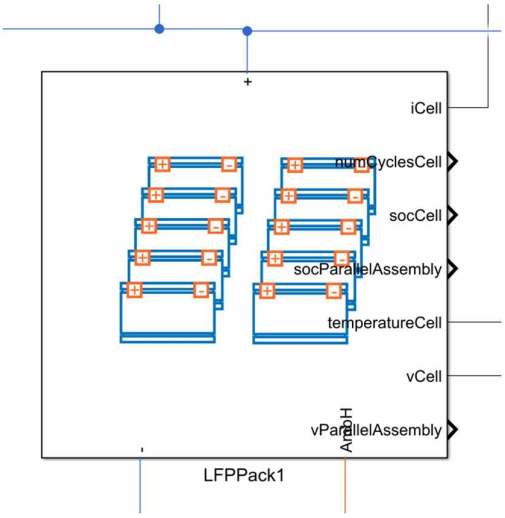


Ilustración 9: Pack de baterías en Simulink – Captura de Pantalla Simulink

4.3. Diseño del BMS

Con base en el modelo electro-térmico del pack descrito en el apartado anterior, se implementó en Simulink la arquitectura de protección del sistema de gestión de baterías (BMS), estructurada en cinco capas de monitoreo y control que actúan de forma independiente sobre la corriente aplicada al pack: protección por sobrecorriente, protección térmica, estado de carga (SoC), estado de salud (SOH) y balanceo de celdas. Estas capas replican, dentro del entorno de simulación, las funciones de protección típicas de un BMS comercial descritas en el Capítulo 2.

4.4. Protección por sobre corriente

La protección por sobre corriente se implementó mediante el bloque Battery Current Monitoring de la librería de protección de baterías de Simulink, configurado con un límite de carga de +50 A y un límite de descarga de -100 A. Esta asimetría es coherente con el comportamiento típico de las celdas $LiFePO_4$, que toleran corrientes de descarga considerablemente mayores que las de carga sin incurrir en riesgo de deposición de litio metálico en el ánodo. La señal de corriente que alimenta este bloque proviene de los diferentes perfiles de descarga creados para diferentes escenarios los cuales se ingresan mediante un archivo de Matlab. La convención de signos del perfil de descarga corresponde a corriente positiva = carga y corriente negativa = descarga, mismos que fueron verificados ante los límites configurados en el bloque de monitoreo, confirmando su coherencia.

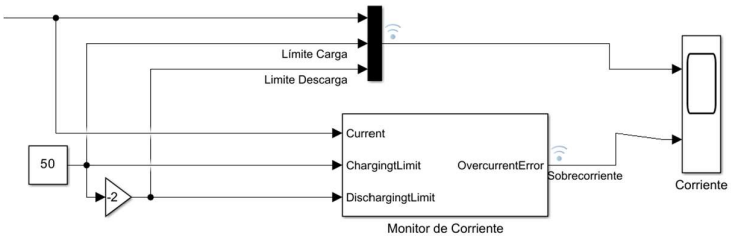


Ilustración 10: Módulo monitor de corriente – Captura de Pantalla Simulink

4.5. Protección térmica

La protección térmica se implementó mediante el bloque Battery Temperature Monitoring, con rangos de 273 K (0 °C) y 318 K (45 °C) como límites de temperatura mínima y máxima de operación de la celda, respectivamente; este último valor corresponde a la temperatura máxima de operación indicada en la hoja de datos del fabricante.

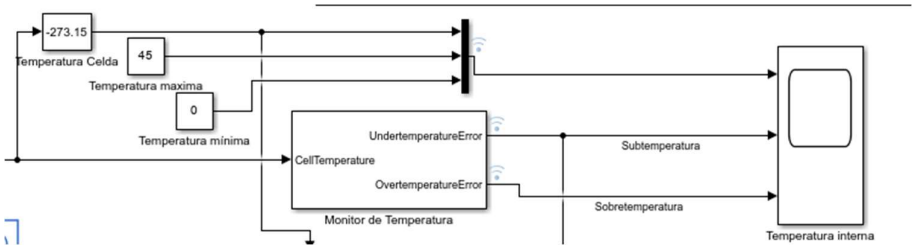


Ilustración 11: Módulo monitor de temperatura – Captura de Pantalla Simulink

A diferencia de la protección por sobre corriente, cuyo bloque nativo corta la corriente de forma directa, las etiquetas Subtemperatura y Sobretemperatura que entrega el bloque Battery Temperature Monitoring no actúan por sí solas sobre la corriente aplicada al pack; para ello se construyó una lógica adicional, equivalente en estructura a la implementada para la protección de SoC.

Ambas banderas se combinan mediante un bloque Logical Operator (OR), cuya salida indica si la celda se encuentra fuera del rango seguro de temperatura en cualquiera de los dos sentidos. Para evitar que esta señal alterne rápidamente entre activada y desactivada justo en el límite de temperatura, la decisión de corte se construyó a partir de un bloque Relay con histéresis: la corriente se bloquea al alcanzar los 45 °C y solo se restablece una vez que la celda desciende por debajo de los 40 °C, evitando activaciones y desactivaciones sucesivas en fracciones de segundo. Al igual que en la protección de SoC, se incorporó un bloque de retardo unitario (Unit Delay) en la realimentación de la temperatura hacia esta lógica, para evitar un bucle algebraico entre la corriente aplicada y la temperatura de la celda, que depende de ella.

La salida de este bloque se combina, mediante un segundo Logical Operator (OR), con la señal de bloqueo ya existente de la protección de SoC, de modo que ambas capas comparten el mismo bloque Switch final: la corriente se fuerza a cero si el SoC está fuera de rango, si la temperatura está fuera de rango, o si ambas condiciones se cumplen simultáneamente.

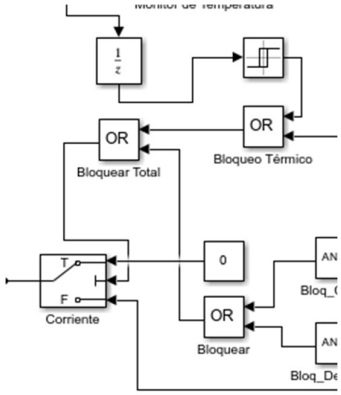


Ilustración 12: Protección por sobretemperatura – Captura de Pantalla Simulink

Las variables que tenemos son el área de disipación y el coeficiente de transferencia de calor, configurados en el bloque de transferencia de calor por convección (Convective Heat Transfer) donde el área corresponde al número total de celdas del arreglo 34S1P, quedando en 3,5 m², de manera que el modelo refleje de forma más representativa la disipación térmica real del conjunto de celdas.

El coeficiente de transferencia de calor por convección depende de qué tan densa es el aire que rodea al paquete de baterías mientras el vehículo está en movimiento. Esta densidad del aire influye directamente en cómo se produce el intercambio de calor entre el pack y el ambiente. Para el tipo de flujo de aire turbulento que se genera al circular el vehículo, existe una relación conocida en la literatura de transferencia de calor que indica que este coeficiente aumenta o disminuye de forma proporcional a la densidad del aire elevada a la potencia 0,8 (es decir, si la densidad baja, el coeficiente baja de forma parecida, aunque no exactamente igual).

A su vez, la densidad del aire depende de la presión y la temperatura del lugar, las cuales cambian con la altitud según el modelo de atmósfera estándar internacional (ISA), una referencia ampliamente usada para calcular estas propiedades del aire a distintas alturas. A nivel del mar (presión aproximada de 101,3 kPa y temperatura de 298 K) la densidad del aire es de aproximadamente 1,18 kg/m³. En cambio, en la ciudad de Ibarra (2225

msnm, presión aproximada de 77,3 kPa y temperatura de 291 K) la densidad baja a aproximadamente 0,93 kg/m³, es decir, casi un 22 % menos que a nivel del mar, lo cual es coherente con la menor presión atmosférica propia de las ciudades de altura.

Al aplicar esta diferencia de densidad a la relación mencionada anteriormente, se obtiene que el coeficiente de transferencia de calor debería reducirse aproximadamente entre un 18 % y un 19 % en Ibarra respecto al nivel del mar. Esto respalda los valores utilizados en el modelo térmico de este trabajo y coincide con lo reportado en estudios previos sobre cómo la altitud afecta el comportamiento térmico de paquetes de baterías de iones de litio [39].

Una vez realizados estos cálculos, a nivel del mar este coeficiente tiene un valor de 8W/(K*m^2) mientras que en Ibarra este valor es de 6,48 W/(K*m^2), parámetros que se ingresan en el módulo de transferencia de calor por convección, tal como se muestra en la ilustración 14. Esta variable es ingresada en cada perfil de descarga para comprobar los resultados y verificar diferencias de temperatura en la ciudad de Ibarra y al nivel del mar.



Ilustración 13: Área del pack y coeficiente de transferencia de calor – Captura de Pantalla Simulink

La fuente de temperatura ambiente se ingresó en un bloque como una constante configurable por escenario. Para nivel del mar se empleó 298 K (25 °C, h = 8 W/(K·m²)). Para Ibarra se emplearon dos temperaturas representativas con el mismo coeficiente de convección reducido (h = 6,48 W/(K·m²)): 278 K (5 °C), representando una mañana fría típica de la ciudad, y 298 K (25 °C), representando una condición diurna cálida, con el fin de aislar el efecto de la temperatura ambiente del efecto de la altitud sobre el coeficiente de convección. Esta configuración de tres puntos (detallada en la sección 24 y en el Anexo 28.3) sustituye la comparación inicial de un único par nivel del mar/Ibarra,

y permite evaluar de forma independiente cuánto del comportamiento observado se debe estrictamente al frío y cuánto a la menor densidad del aire en altura.

4.6. Estado de carga (SoC)

A diferencia de las protecciones por corriente y temperatura, la librería de protección de baterías de Simulink no incluye un bloque nativo para limitar la corriente en función del estado de carga. Por esta razón, se diseñó una lógica de protección específica para este trabajo, construida a partir de bloques estándar de lógica y comparación (Relational Operator, Compare To Zero, Logical Operator) que evalúan simultáneamente el SoC estimado por el filtro de Kalman extendido y la dirección de la corriente solicitada por el perfil de descarga.

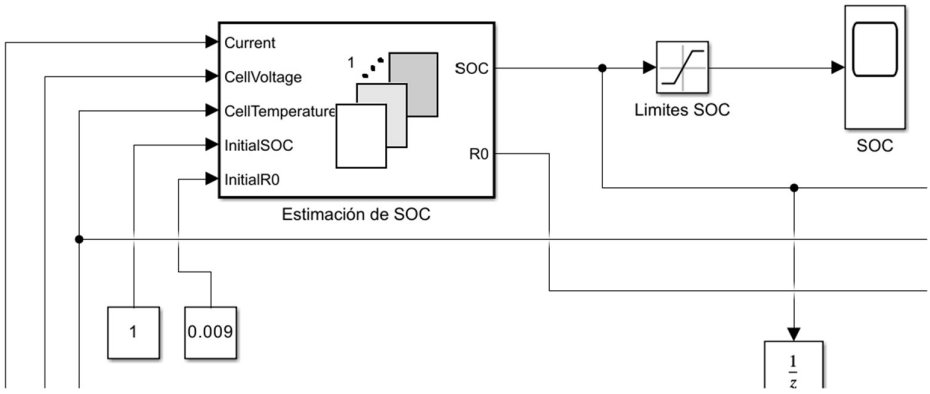


Ilustración 14: Módulo de estimación de SoC – Captura de Pantalla Battery Builder

Cuando el SoC estimado alcanza el límite superior definido (90 %) y se solicita corriente de carga, o el límite inferior (15 %) y se solicita corriente de descarga, la lógica activa un bloque Switch que fuerza la corriente aplicada a cero, bloqueando la operación en el sentido correspondiente. Para evitar un bucle algebraico entre la corriente aplicada y la estimación de SoC que depende de ella, se incorporó un bloque de retardo unitario (Unit Delay) en la realimentación de la señal de SoC hacia la lógica de comparación.

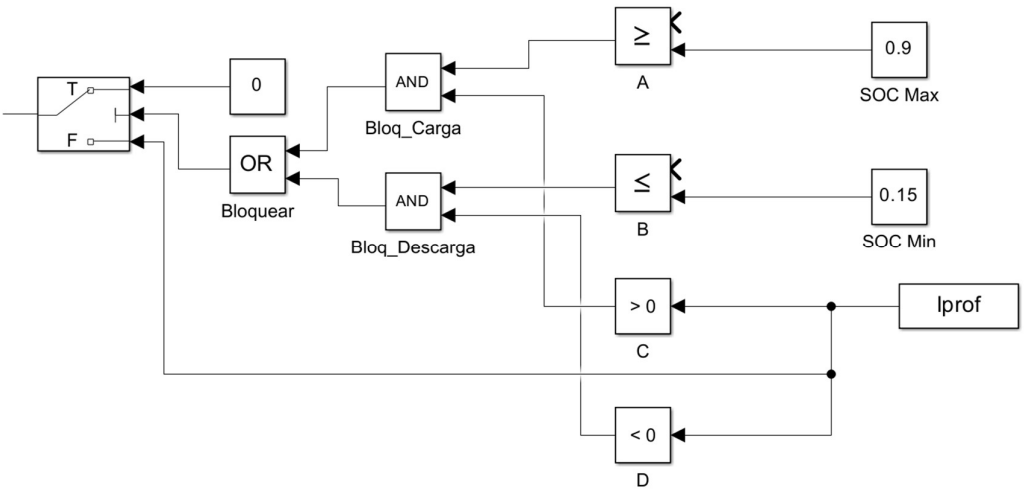


Ilustración 15: Modulo para activar la carga mediante freno regenerativo

El funcionamiento de esta protección se validó mediante una prueba de simulación específica, en la que se forzó un tramo de corriente de carga con el pack en un estado de carga elevado. El resultado mostró la activación sostenida de la señal de bloqueo durante toda la duración del tramo de carga forzado, confirmando que la lógica responde correctamente ante las condiciones para las que fue diseñada.

4.7. Estado de Salud (SOH)

La estimación del estado de salud (SOH) de la batería se implementó mediante el bloque SOH Estimator de la librería de estimadores de baterías de Simulink, el cual determina el envejecimiento de la celda comparando su resistencia interna estimada con dos tablas de referencia dependientes del estado de carga y la temperatura: una correspondiente a una celda nueva (R0 new) y otra correspondiente al final de su vida útil (R0 EOL), definida en este trabajo como el doble de la resistencia inicial, criterio habitual para establecer el umbral de fin de vida de celdas de litio. A partir de la posición relativa de la resistencia interna estimada entre ambos extremos, el bloque calcula un valor normalizado de SOH que decrece de 1 (celda nueva) a 0 (fin de vida útil).

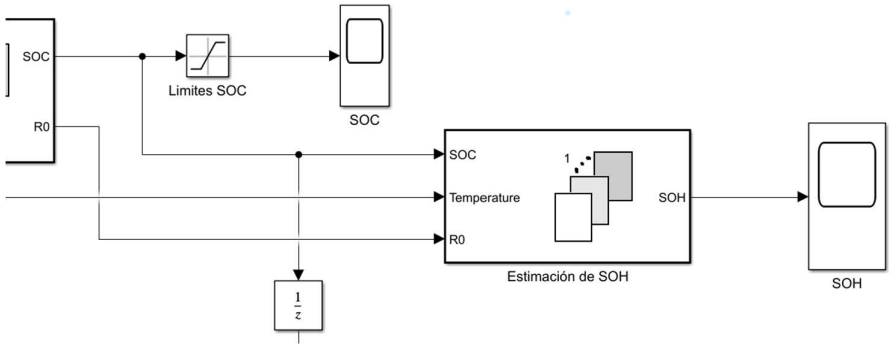


Ilustración 16: Modulo de estimación de SoH

4.8. Balanceo de celdas

Dado que el módulo generado mediante Battery Builder representa las 34 celdas del arreglo con parámetros eléctricos y térmicos homogéneos, sin variabilidad de fabricación entre ellas, el desbalance inicial entre celdas se incorporó de forma artificial a nivel de señal, sumando a la salida vectorial socCell (34×1) del bloque del pack, un vector de desviación aleatoria de hasta ±1% generado en Matlab, representando así la dispersión de estado de carga típica de un pack real sin necesidad de modificar la física del modelo electro-térmico.

A partir de esta señal con el desbalance simulado, se construyó la lógica que decide cuándo y cómo debe actuar el balanceo pasivo, usando bloques estándar de Simulink. Primero, un bloque MinMax identifica en todo momento cuál es la celda con menor estado de carga dentro del arreglo. Ese valor mínimo se resta de la señal de todas las celdas, obteniendo así cuánto SOC de más tiene cada una respecto a la celda más baja. Después, este exceso se compara contra un umbral de 0,5%: si una celda supera ese umbral, se marca como una celda que necesita balanceo. Esta condición se combina con una segunda: que el pack no esté en un momento de descarga exigente, es decir, que la corriente sea mayor o igual a cero (en reposo o cargando). Esto sigue la práctica habitual de los sistemas de balanceo pasivo, que evitan derivar corriente de las celdas mientras el vehículo está exigiendo descarga. Solo cuando ambas condiciones se cumplen a la vez (hay exceso de SOC y el pack no está en descarga) se activa el balanceo. Finalmente, ese

exceso de SOC se convierte, mediante una ganancia, en un valor equivalente de corriente de derivación, y se deja pasar únicamente cuando la condición de activación es verdadera. El resultado es la señal final I_balance, que indica la corriente de bypass que debería aplicarse a cada celda.

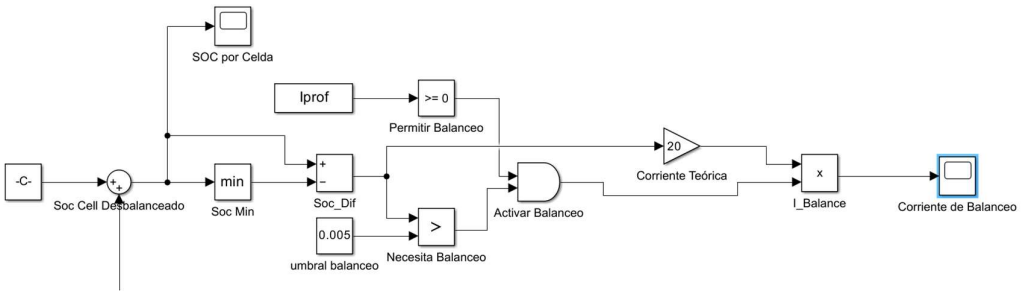


Ilustración 17: Balanceo de celdas

Esta implementación corresponde a la capa de decisión y control del sistema de balanceo pasivo: determina cuándo y en qué magnitud debería activarse el balanceo de cada celda, sin modelar físicamente el circuito resistivo de derivación, ya que el bloque de módulo de Battery Builder no permite inyectar corrientes independientes por celda dentro de un arreglo en serie modelado de forma vectorizada. La validación mediante simulación confirmó que la señal I_balance se activa correctamente durante los periodos de reposo o carga en que existe una celda con exceso de SOC por encima del umbral definido, y permanece en cero durante los tramos de descarga, evidenciando el correcto funcionamiento del algoritmo de decisión implementado.

4.9. Gestión térmica activa y derrateo de capacidad por temperatura

Las cinco capas de protección descritas anteriormente (sobrecorriente, temperatura, SoC, SOH y balanceo) actúan únicamente como mecanismos de resguardo ante condiciones límite, pero no modifican el comportamiento del pack dentro del rango seguro de operación. Para representar de forma realista el impacto del frío sobre el desempeño disponible del pack se incorporaron tres módulos adicionales al modelo: derrateo de

corriente por temperatura, calefacción activa (tipo PTC) y refrigeración activa por ventilador,

El derrateo de corriente se implementó mediante una tabla de límites máximos de corriente en función de la temperatura de la celda, aplicada de forma independiente para carga y descarga a través de un bloque Switch posicionado entre el perfil Iprof y la entrada de corriente del pack. La asimetría entre los límites de carga y descarga es intencional: la literatura reporta un riesgo significativo de deposición de litio metálico al cargar celdas de $LiFePO_4$ por debajo de 0 °C, por lo que el límite de corriente de carga se reduce de forma más agresiva en frío que el de descarga.

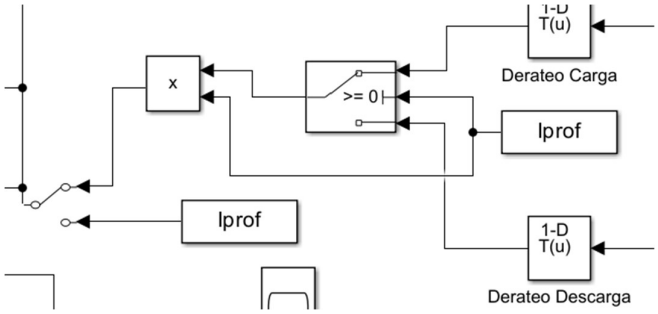


Ilustración 18: Módulo de derrateo

La calefacción activa se modeló mediante un bloque Controlled Heat Flow Rate Source, controlado por un bloque Relay con histéresis: el calefactor se activa cuando la temperatura de la celda desciende de 15 °C (288 K) y se desactiva al superar los 22 °C (295 K), evitando conmutaciones rápidas en el límite.

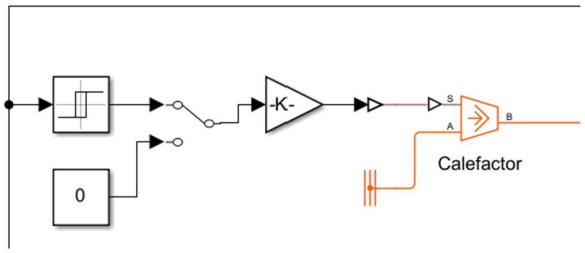


Ilustración 19: Módulo calefactor

La refrigeración activa se implementó de forma simétrica al calefactor, mediante otro bloque Relay con histéresis que activa el ventilador al superar los 40 °C (313 K) y lo desactiva por debajo de 32 °C (305 K)

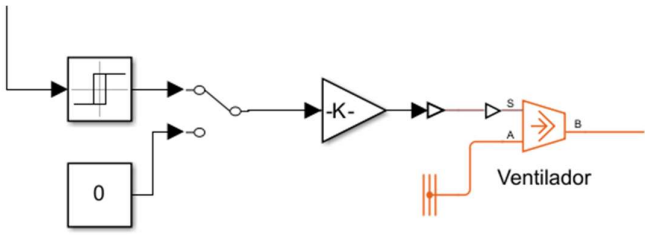


Ilustración 20: Módulo ventilador

4.10. Perfil de Descarga

Es una simulación de dos horas, de manera que se pueda observar tanto el consumo de energía al subir una cuesta como la recuperación de carga por frenado regenerativo al bajarla. La primera hora (ascenso) está compuesta por cinco tramos de distinta inclinación, cada uno con una corriente de descarga sostenida de entre 50 y 65A, precedida por un breve pico de mayor exigencia hasta 95A al iniciar cada tramo más empinado, resultando en una descarga neta cercana al 55 % de la capacidad del pack.

La segunda hora (descenso) invierte esta dinámica: predomina el frenado regenerativo, con corriente positiva de entre 15 y 32A la mayor parte del tiempo, interrumpida por breves tramos de descarga entre 8 y 15 A que simulan secciones planas o de leve contrapendiente donde el vehículo aún requiere potencia, recuperando carga.

4.11. Resultados de las simulaciones

Con el fin de aislar el efecto real de la temperatura y la altura sobre el desempeño del pack y de evidenciar el aporte de los módulos de gestión térmica activa descritos en la sección 22.6, se ejecutaron cinco simulaciones del perfil de descarga, combinando las tres condiciones ambientales de la Tabla 5 con la gestión térmica activa o desactivada según

corresponda: nivel del mar (escenario de control y sin gestión), Ibarra a 5°C sin gestión, Ibarra a 5°C con gestión, Ibarra a 25°C sin gestión e Ibarra a 25°C con gestión.

La Tabla 5 resume, para cada una de las cinco simulaciones, el valor mínimo de SOC efectivo alcanzado durante el tramo de descarga, el voltaje mínimo del pack y la temperatura de estabilización de la celda.

Escenario	SOC mínimo	Voltaje mínimo (V)	Temperatura de estabilización (°C)
Nivel del mar, sin gestión	0,50	105,8	35°
Ibarra 5 °C, sin gestión	0,475	104,4	16°-17°
Ibarra 5 °C, con gestión	0,542	105,8	23°
Ibarra 25 °C, sin gestión	0,487	105,7	35°
Ibarra 25 °C, con gestión	0,487	105,7	35°

Tabla 5: Comparación de resultados del perfil Ascenso y Descenso por escenario

4.12. Comparación a nivel del mar frente a Ibarra a 5 °C

En esta comparación se contrastan tres casos: el escenario de nivel del mar como referencia a 25 °C de temperatura ambiente, Ibarra a 5 °C sin gestión térmica e Ibarra a 5 °C con gestión térmica activa. Al tratarse de la condición ambiental más fría, es el escenario donde se espera el mayor impacto de la temperatura y, por tanto, donde mejor se aprecia el efecto de la gestión térmica.

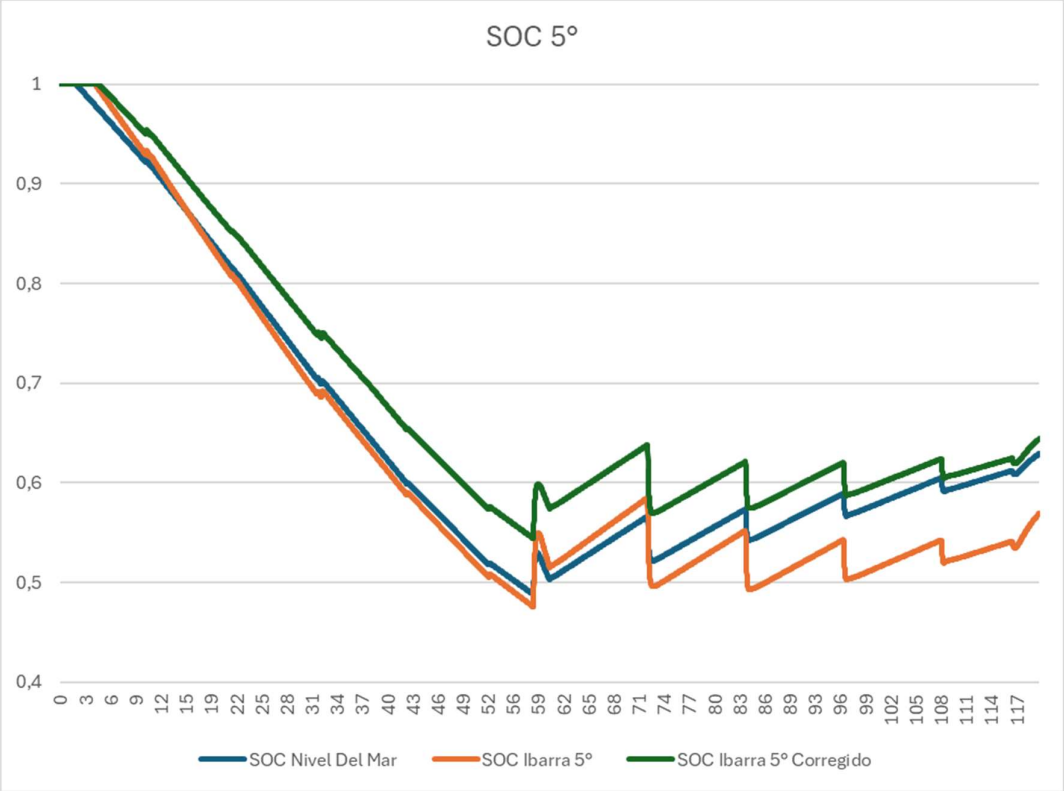


Ilustración 21: Estado de carga (SOC) del pack - nivel del mar frente a Ibarra a 5 °C

La gráfica de estado de carga muestra las tres curvas partiendo del 100 % y descendiendo durante el tramo de descarga hasta un valle en torno al minuto 58, para luego recuperarse parcialmente durante la fase de frenado regenerativo. El escenario de Ibarra a 5 °C sin gestión alcanza el valle más bajo, cercano a 0,47 que penaliza la capacidad utilizable a baja temperatura a comparación del escenario al nivel del mar, dado que ambos casos demandan exactamente la misma corriente. El escenario de Ibarra a 5 °C con gestión no solo revierte esa pérdida, sino que se mantiene por encima de las otras dos curvas durante toda la simulación, con un valle cercano a 0,542. Esta recuperación responde a dos efectos combinados: por un lado, la calefacción activa eleva la temperatura de la celda y con ello el factor de capacidad; por otro, el derrateo de corriente limita ligeramente la corriente de descarga en frío, reduciendo la carga extraída del pack. Cabe precisar que esta última

contribución representa una menor corriente entregada, por lo que el SOC más alto no debe interpretarse como una ganancia neta de energía, sino como el resultado de una operación más conservadora en frío.

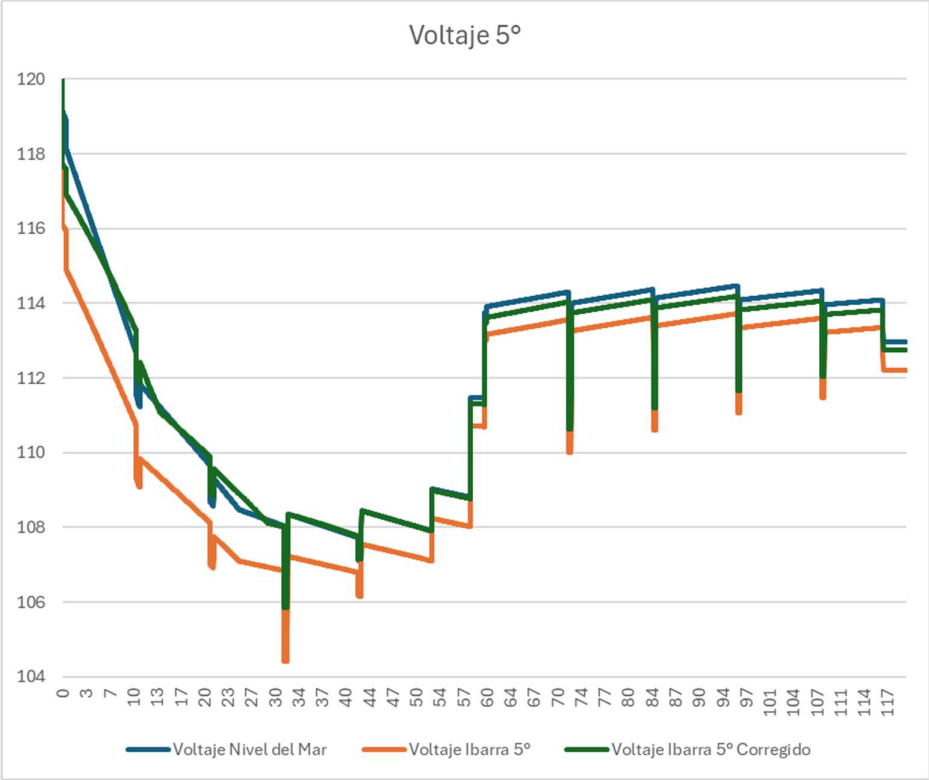


Ilustración 22: Voltaje del pack – nivel del mar frente a Ibarra a 5 °C

En la gráfica de voltaje se observa que el escenario de Ibarra a 5 °C sin gestión presenta la mayor caída de tensión, alcanzando un mínimo cercano a 104,4 V durante el pico de descarga más exigente, frente a los 105,8 V registrados tanto a nivel del mar como en Ibarra con gestión. Esta diferencia es consecuencia directa del incremento de la resistencia interna a baja temperatura: con la celda fría, la misma corriente produce una caída óhmica mayor. Al activar la gestión térmica, la curva de Ibarra se acerca a la de nivel del mar y se mantiene por encima de la del caso sin gestión durante toda la corrida, confirmando

que el calentamiento de la celda reduce la resistencia interna efectiva y, con ella, la caída de tensión bajo carga.

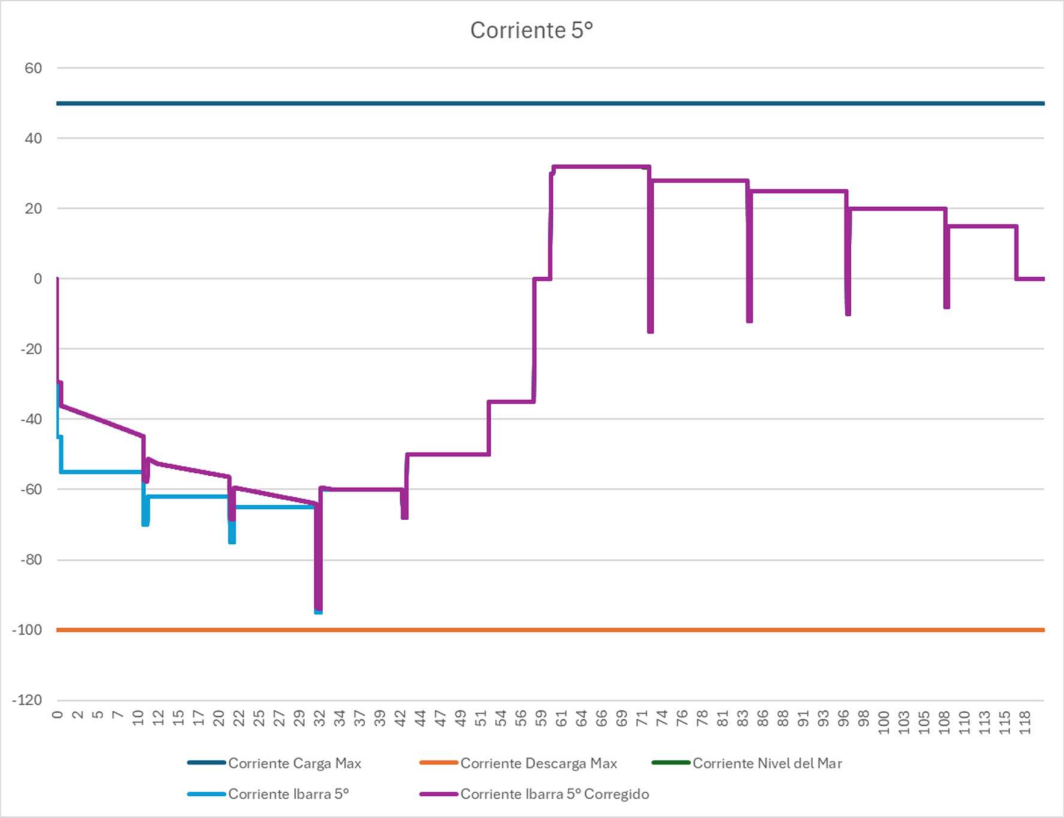


Ilustración 23: Corriente del pack – nivel del mar frente a Ibarra a 5 °C

La gráfica de corriente confirma que la corriente se mantiene dentro de los límites de protección (+50 A en carga y −100 A en descarga) en los tres casos, sin activar la alerta de sobrecorriente. Los perfiles de corriente son prácticamente idénticos, ya que la señal de demanda es común a todos los escenarios; únicamente en el caso con gestión se aprecian pequeñas diferencias en los tramos de descarga más fríos, donde el derrateo por temperatura reduce la corriente respecto a los casos sin gestión.

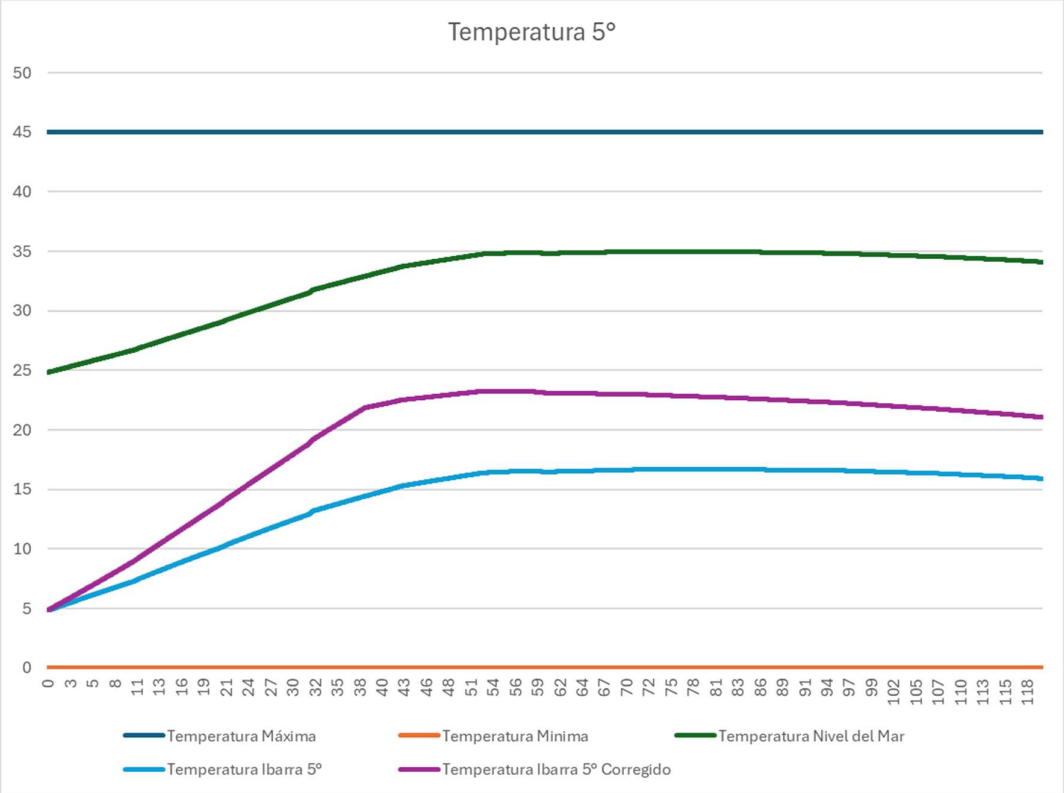


Ilustración 24: Temperatura interna de la celda – nivel del mar frente a Ibarra a 5 °C

La gráfica de temperatura muestra la evolución térmica de la celda frente a los límites de operación (0 °C y 45 °C). El escenario de nivel del mar parte de 25 °C y se estabiliza en torno a 35 °C por autocalentamiento. El escenario de Ibarra a 5 °C sin gestión parte de 5 °C y, pese al autocalentamiento por efecto Joule, solo alcanza unos 16-17 °C, permaneciendo por debajo del rango óptimo de la química (20-35 °C) durante toda la simulación. Con la gestión térmica activa, el calefactor eleva la temperatura de la celda hasta unos 23 °C, situándola dentro del rango óptimo; la ligera disminución posterior (hacia 21 °C) corresponde a la desactivación del calefactor una vez superado el umbral superior de su histéresis. En ninguno de los casos la temperatura se aproxima al límite superior de 45 °C, por lo que el ventilador no requiere activarse en este escenario.

En conjunto, la comparación a 5 °C constituye la evidencia central de este trabajo: bajo una misma condición fría, el pack sin gestión térmica sufre una mayor caída de voltaje y una reducción del SOC respecto al escenario cálido de referencia, y la incorporación de la gestión térmica activa revierte por completo ese deterioro, devolviendo el comportamiento del pack a niveles equivalentes o incluso ligeramente superiores a los de nivel del mar.

4.13. Comparación a nivel del mar frente a Ibarra a 25 °C

En esta comparación se contrastan el escenario de nivel del mar y los dos casos de Ibarra a 25 °C (sin y con gestión térmica). A diferencia del escenario frío, aquí la temperatura ambiente es la misma que a nivel del mar (25 °C) y la única diferencia respecto a este es el menor coeficiente de transferencia de calor por convección propio de la altitud (6,48 frente a 8 $W/(K \cdot m^2)$). Esta comparación funciona, por tanto, como control del experimento: permite verificar si la altitud, por sí sola, introduce alguna diferencia cuando la temperatura ambiente se mantiene en el rango óptimo de la celda.

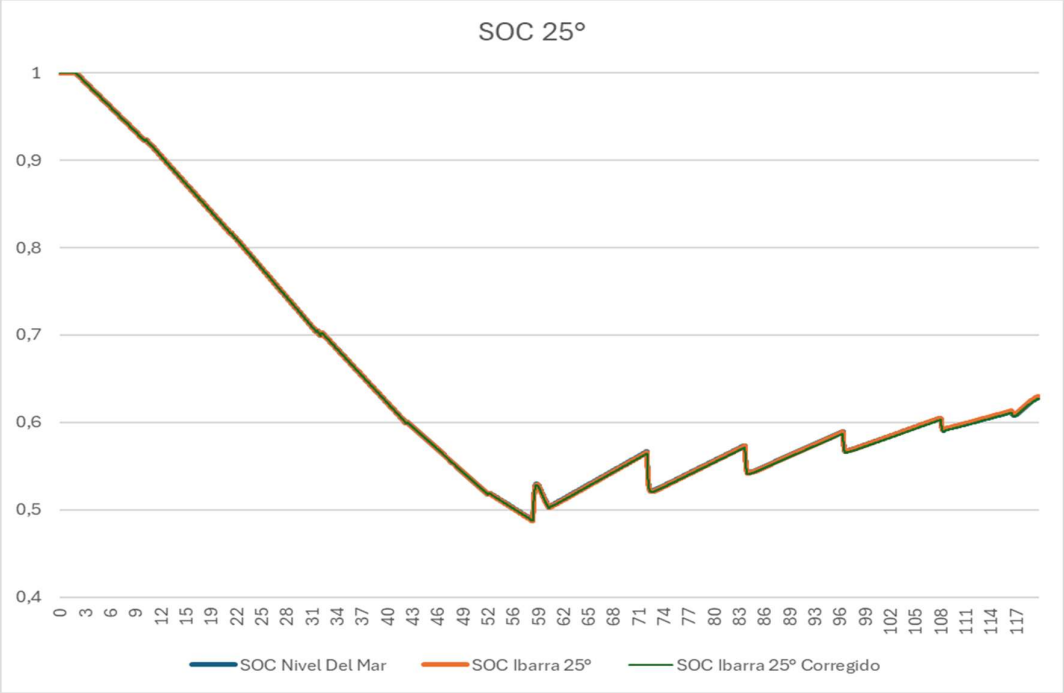


Ilustración 25: Estado de carga (SOC efectivo) del pack – nivel del mar frente a Ibarra a 25 °C

En la gráfica de estado de carga, las tres curvas resultan prácticamente indistinguibles entre sí, superponiéndose a lo largo de toda la simulación con un valle común cercano a 0,49. Esto confirma que, a 25 °C, el factor de derrateo de capacidad es igual a la unidad en los tres casos (la celda opera dentro de su rango óptimo), por lo que no existe penalización alguna sobre el SOC efectivo. La coincidencia entre las curvas de nivel del mar e Ibarra evidencia además que el menor coeficiente de convección de la altitud, por sí solo, no produce ninguna diferencia apreciable en el estado de carga.

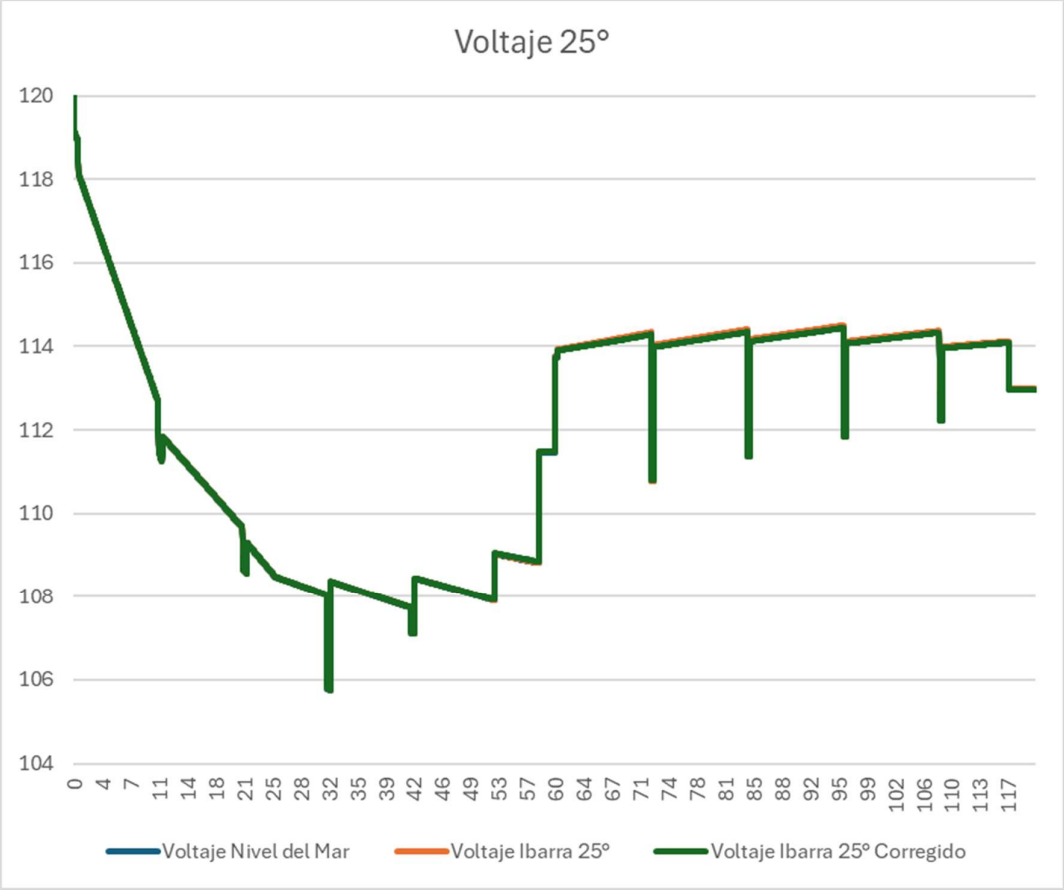


Ilustración 26: Voltaje del pack – nivel del mar frente a Ibarra a 25 °C

El voltaje del pack presenta igualmente curvas superpuestas para los tres casos, con un mínimo común cercano a 105,8 V durante el pico de descarga más exigente. Dado que la temperatura de la celda es equivalente en los tres escenarios, la resistencia interna toma el mismo valor y, por tanto, la caída óhmica de tensión bajo carga es idéntica. La ausencia de diferencia entre nivel del mar e Ibarra confirma que la altitud no afecta el comportamiento eléctrico del pack mientras la temperatura ambiente se mantenga en el rango templado.

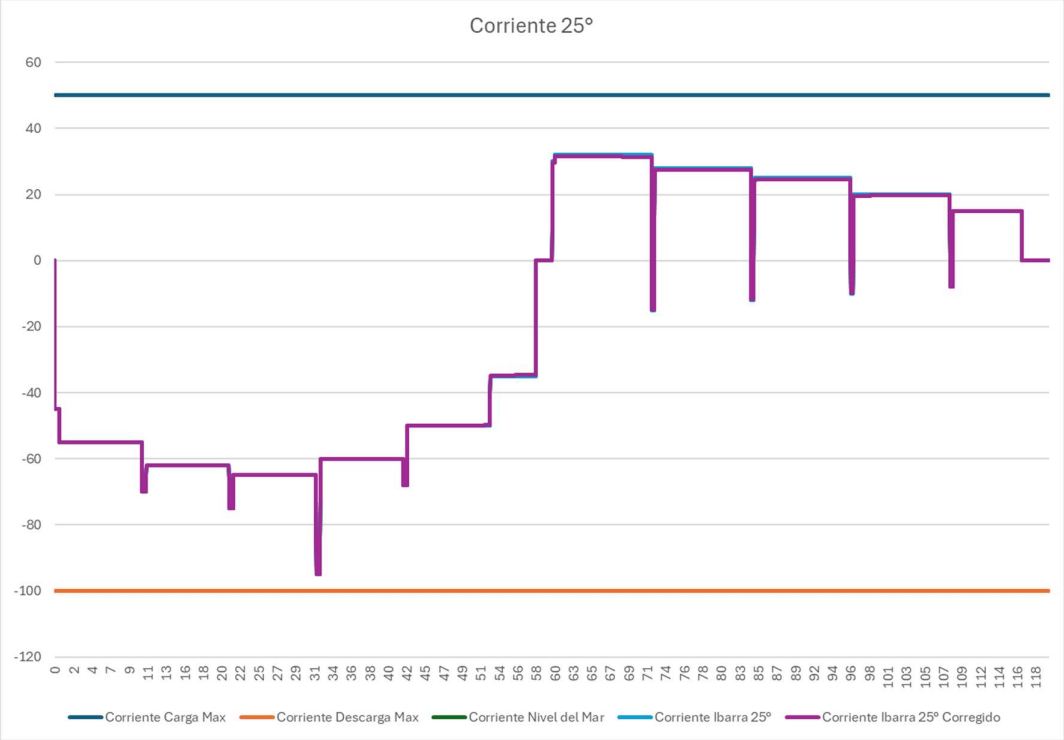


Ilustración 27: Corriente del pack – nivel del mar frente a Ibarra a 25 °C

La corriente se mantiene dentro de los límites de protección (+50 A en carga y −100 A en descarga) y las tres curvas coinciden por completo, sin activar la protección de sobrecorriente. Como la temperatura de la celda permanece dentro del rango seguro durante toda la simulación, el derrateo por temperatura no interviene en ninguno de los casos, y la corriente entregada corresponde en su totalidad a la demandada por el perfil de descarga.

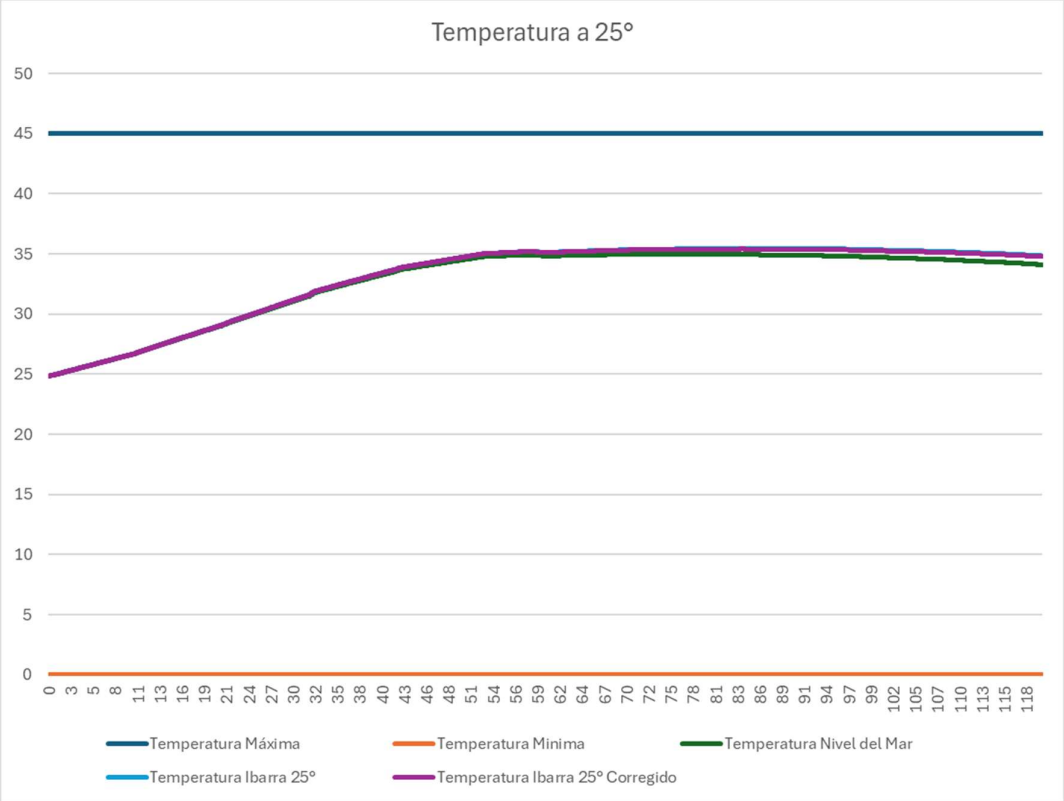


Ilustración 28: Temperatura interna de la celda – nivel del mar frente a Ibarra a 25 °C

La temperatura interna es la única variable donde se aprecia una diferencia, partiendo los tres casos de 25 °C, el escenario de Ibarra se estabiliza en torno a 35,5 °C, ligeramente por encima de los ≈34 °C del escenario de nivel del mar. Esta pequeña diferencia se debe precisamente al menor coeficiente de convección de la altitud, que disipa el calor de forma menos eficiente. No obstante, al permanecer todos los casos dentro del rango óptimo (20-35 °C) y muy por debajo del límite de 45 °C, el ventilador no llega a activarse, por lo que los casos con y sin gestión resultan idénticos. Esta diferencia térmica de aproximadamente 1,5 °C es demasiado pequeña para modificar la resistencia interna, el voltaje o el SOC de forma apreciable.

En resumen, la comparación a 25 °C cumple una doble función. Por un lado, confirma que las diferencias observadas en el escenario frío se deben estrictamente a la temperatura

ambiente y no a la altitud en sí misma, ya que al igualar la temperatura ambiente el comportamiento de Ibarra y el de nivel del mar se vuelven indistinguibles. Por otro lado, valida que el sistema de gestión térmica actúa de forma selectiva: no interviene cuando la celda ya se encuentra en su rango óptimo, evitando así un consumo energético innecesario del calefactor y del ventilador.

4.14. Estrategias de gestión óptimas para personalizar un BMS en ciudades de altura

A partir de los resultados de la sección 24, se pudieron incorporar estrategias de gestión que, en conjunto, permiten personalizar un BMS comercial o de código abierto para su operación en ciudades de altura como Ibarra, sin necesidad de sobredimensionar el pack ni sacrificar autonomía de forma innecesaria en condiciones cálidas.

- Derrateo de corriente asimétrico dependiente de temperatura: limitar la corriente máxima de carga de forma más agresiva que la de descarga por debajo de los 10 °C
- Calefacción activa con control por histéresis: activar el calefactor cuando la temperatura de celda descienda por debajo de un umbral cercano al límite inferior del rango óptimo de la química (en este trabajo, 15 °C), y desactivarlo al superar un segundo umbral (22 °C), evitando conmutaciones rápidas. Los resultados de la sección 24 muestran que este mecanismo es responsable de la mayor parte de la recuperación de SOC y voltaje observado en el escenario frío con gestión.
- Refrigeración activa simétrica: activar un ventilador cuando la temperatura de celda supere el límite superior del rango óptimo (40 °C) y desactivarlo por debajo de un segundo umbral (32 °C). Si bien esta estrategia no fue determinante en los escenarios evaluados en este trabajo donde la temperatura máxima alcanzada (35 °C) no llegó a activar el ventilador, resulta necesaria como protección ante perfiles de conducción más exigentes o de mayor duración que los simulados, y su bajo costo de implementación justifica incluirla de forma preventiva.

Estas estrategias comparten un requisito común: la parametrización de sus umbrales debe realizarse con datos propios de la celda y del clima local, y no con valores genéricos de hoja de datos del fabricante, dado que estos últimos suelen estar definidos para condiciones de operación mucho más amplias que las de una ciudad de altura específica.

4.15. Conclusiones

- Se determinó que la menor densidad del aire y menor temperatura ambiente afectan al BMS en la reducción del coeficiente de convección que incrementa levemente la temperatura de operación de la celda, y que la temperatura ambiente más baja incide directamente sobre el voltaje del pack provocando una caída de voltaje y en consecuencia una reducción en el SoC.
- La realización del modelo electro-térmico del pack y del BMS desarrolladas en MATLAB/Simulink permitieron reproducir de forma consistente el comportamiento eléctrico y térmico del pack bajo escenarios de simulación a nivel del mar y en Ibarra en condición fría y cálida.
- Las estrategias propuestas como el derrateo, el calefactor y el ventilador resultaron suficientes para revertir la pérdida de SOC y caída de voltaje en el escenario frío respecto al escenario cálido y a nivel del mar, sin necesidad de sobredimensionar el pack de baterías o causar una degradación en el pack de baterías a largo plazo

4.16. Recomendaciones

- Validar en campo la caída de voltaje y la reducción de SOC medidas en un vehículo real operando en Ibarra, para contrastar la magnitud del efecto térmico predicho por el modelo y ajustar el coeficiente de convección a las condiciones reales de circulación.
- Ampliar el modelo a otros perfiles de conducción y otras ciudades de altura con el fin de evaluar resultados en ciudades con menor temperatura o mayor altitud.
- Optimizar el consumo energético del calefactor y el ventilador mediante un ajuste fino de sus umbrales de histéresis a partir de datos reales, evaluando el balance entre la energía gastada en la gestión térmica y la autonomía recuperada.

ANEXOS

5.1. Hoja técnica de la celda

A continuación, se presenta la hoja técnica de referencia de la celda LiFePO4 empleada como base para la parametrización del modelo desarrollado en la sección 21.1. Los parámetros de masa, voltaje y resistencia interna (AC, 1 kHz) utilizados en este trabajo corresponden a la celda prismática EVE LF100MA / LF100LA (3,2 V, 100 Ah), tomando como referencia dos variantes de la misma familia de celdas del fabricante EVE Energy, ambas de capacidad y química equivalentes.

Parámetro	Valor
Química	LiFePO4 (litio-ferro fosfato)
Modelo de referencia	EVE LF100MA / LF100LA
Capacidad nominal	100 Ah
Voltaje nominal	3,2 V
Rango de voltaje operativo	2,5 V - 3,65 V
Voltaje de corte de carga	3,65 V
Voltaje de corte de descarga	2,5 V ($T > 0$ °C); 2,0 V ($T \leq 0$ °C)
Masa	≈1,92 - 1,98 kg
Dimensiones (Alto x Ancho x Espesor)	≈118,5 x 160 x 50,1 mm
Resistencia interna (AC, 1 kHz)	≤0,5 mΩ
Corriente de carga estándar	50 A (0,5C)
Corriente continua máxima	100 A (1,0C)
Corriente de pulso máxima	200 A (2C, 30 s)
Vida útil	2000 - 4000 ciclos, según profundidad de descarga
Rango de temperatura de carga	0 °C a 55 °C
Rango de temperatura de descarga	-20 °C a 55 °C
Energía	≈320 - 323 Wh

Tabla 6: Parámetros de celdas *Fuente: hojas de datos del fabricante EVE Energy para las celdas LF100MA y LF100LA (DNK Power, distribuidor autorizado; LiFePO4-Battery.com).*

5.2.Perfil de carga y descarga

Se incluye a continuación el código fuente en MATLAB de los tres perfiles de corriente de descarga/carga utilizados para generar las señales de entrada (bloque timeseries Iprof) de las simulaciones presentadas en la sección 24, correspondientes a los perfiles Urbano, Ascenso y Descenso, y de Viaje definidos en la sección 23. Cada script genera un vector de corriente en función del tiempo, con la convención de signo negativo para descarga y positivo para carga/regeneración, empleada de forma consistente en todo este trabajo.

Perfil Ascenso y Descenso (PerfilAscensoDescenso.m)

```
% Perfil de descarga - Ascenso seguido de Descenso (ida y vuelta)
% Duracion total: 2 horas (7200 s).
Ts = 1;
Tend = 7200;
t = (0:Ts:Tend)';
RAMP = 3;   % duracion de la rampa entre tramos (s)

% Tramo 1: Ascenso (primera hora, 0-3600 s)
% Cada fila: [duracion (s), corriente (A)]
tramos ascenso = [
     30   -45   % arranque, aceleracion inicial
    600   -55   % ascenso sostenido, tramo 1
     30   -70   % pendiente mas pronunciada
    600   -62   % ascenso sostenido, tramo 2
     30   -75   % pendiente mas pronunciada
    600   -65   % ascenso sostenido, tramo 3 (el mas exigente)
     30   -95   % tramo mas empinado del recorrido
    600   -60   % ascenso sostenido, tramo 4
     30   -68   % pendiente mas pronunciada
    600   -50   % ascenso sostenido, tramo 5 (la pendiente se suaviza)
    330   -35   % tramo final, cerca de la cima
    120     0   % llegada a la cima, reposo
];

% Tramo 2: Descenso (segunda hora, 3600-7200 s)
tramos_descenso = [
     20    30   % inicio del descenso, frenado regenerativo leve
    700    32   % descenso sostenido, tramo 1
     20   -15   % breve tramo plano / contrapendiente
    700    28   % descenso sostenido, tramo 2
     20   -12   % breve tramo plano
    700    25   % descenso sostenido, tramo 3
     20   -10   % breve tramo plano
    700    20   % descenso sostenido, tramo 4 (la pendiente se suaviza)
     20    -8   % breve tramo plano
    500    15   % tramo final, pendiente leve
    200     0   % llegada, reposo
];
```

```
tramos = [tramos_ascenso; tramos_descenso];

n = size(tramos,1);
starts = [0; cumsum(tramos(1:end-1,1))];

seg_t = starts(1);
seg_I = tramos(1,2);

for i = 2:n
    seg_t(end+1,1) = starts(i);
    seg_I(end+1,1) = tramos(i-1,2);
    seg_t(end+1,1) = starts(i) + RAMP;
    seg_I(end+1,1) = tramos(i,2);
end

seg_t(end+1,1) = Tend;
seg_I(end+1,1) = seg_I(end);

I = interp1(seg_t, seg_I, t, 'linear');

Iprof = timeseries(I, t);
```

5.3. Condiciones ambientales

Todas las simulaciones presentadas en la sección 24 se ejecutaron bajo una de tres condiciones ambientales, seleccionadas mediante el script de configuración ConfiguracionEscenario.m antes de cada corrida: nivel del mar, Ibarra en condición fría (5 °C) o Ibarra en condición cálida (25 °C). La Tabla siguiente resume la temperatura ambiente y el coeficiente de transferencia de calor por convección empleados en cada caso, ya descritos en la sección 22.2.

Escenario	Temperatura ambiente (K)	Temperatura ambiente (°C)	Coeficiente de transferencia de calor h (W/(K·m²))
Nivel del mar	298	25	8,00
Ibarra condición fría	278	5	6,48
Ibarra condición cálida	298	25	6,48

Tabla 7: Configuración de escenario

Script de configuración (ConfiguracionEscenario.m)

```
% Configuracion base del escenario de simulación
% Desbalance inicial simulado entre las 34 celdas para el balanceo
rng(42);
delta_soc = 0.02*(rand(34,1) - 0.5);   % +-1% de variacion entre celdas

% Escenario de altura:
% Ibarra (2225 msnm aprox.)

%t_amb = 298;    % K  (~25 C) más alta
%t_amb = 278;    % K  (~5 C) más baja
%htc   = 6.48;   % W/m2K

% Nivel del mar
t_amb = 298;    % K  (~25 C)
htc   = 8;      % W/m2K

% Resistencia termica celda-ambiente (dependiente de htc)
A_celda = 0.0279;                % m2, area superficial celda EVE LF100LA
R_amb_celda = 1/(htc * A_celda);  % K/W
```

BIBLIOGRAFÍA

[1] A. Farzan Moghaddam and A. Van den Bossche, "An Efficient Equalizing Method for Lithium-Ion Batteries Based on Coupled Inductor Balancing," *Electronics,* vol. 8, no. 136, 2019.

[2] L. Languang, H. Xuebing, L. Jianqiu, H. Jianfeng, and O. Minggao, "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles,," *Journal of Power Sources,* vol. 226, pp. 272-288, 2013.

[3] Y. Li *et al.*, "Data-driven health estimation and lifetime prediction of lithium-ion batteries: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 113, 2019.

[4] K. Liu, Y. Li, X. Hu, M. Lucu, and W. D. Widanage, "Gaussian Process Regression With Automatic Relevance Determination Kernel for Calendar Aging Prediction of Lithium-Ion Batteries," *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* vol. 16, no. 6, pp. 3767-3777, 2020.

[5] X. Hu, K. Zhang, K. Liu, X. Lin, S. Dey, and S. Onori, "Advanced Fault Diagnosis for Lithium-Ion Battery Systems: A Review of Fault Mechanisms, Fault Features, and Diagnosis Procedures," *IEEE Industrial Electronics Magazine,* vol. 14, no. 3, pp. 65-91, 2020.

[6] J. Linghu, L. Kang, M. Liu, X. Luo, Y. Feng, and C. Lu, "Estimation for state-of-charge of lithium-ion battery based on an adaptive high-degree cubature Kalman filter," *Energy,* p. 189, 2019.

[7] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez, "A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges," Smart Cities, 2021.

[8] A. Hauser and R. Kuhn, " High-voltage battery management systems (BMS) for electric vehicles," *Advances in Battery Technologies for,* pp. 265–282, 2015.

[9] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), "Anuario 2024," 2024. [Online]. Disponible: https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2025/03/AEADE-ANUARIO-2024_digital.pdf."

[10] H. Uribe-Bedoya, A. Valencia-Arias, and S. Ramos y Yovera, "Tendencias y evolución investigativa sobre la movilidad sostenible: una aproximación bibliométrica," *Producción + Limpia,* vol. 14, pp. 42-60, 2019.

[11] J. Castro, L. Orbea, J. Toapaxi, and C. Guano, "Análisis de incentivos y proyecciones del vehículo 100% eléctrico en el ecuador," *INNOVA Research Journal,* vol. 2, pp. 112-124, 2017.

[12] D. SandovalL and E. Torres, "Respuesta de demanda de energía por introducción de vehículos eléctricos: estado del arte," *I+D Tecnológico,* vol. 16(1), pp. 5-11, 2020.

[13] D. Pérez Jaramillo, M. C. Gutiérrez, and R. Mix, "Electromovilidad: panorama actual en América Latina y el Caribe," *Banco Interamericano de Desarrollo Versión Infográfica,* 2019.

[14] F. Dulcich and D. y. A. C. Otero, "Evolución reciente y situación actual de la producción y difusión de vehículos eléctricos a nivel global y en Latinoamérica," *Asian Journal of Latin American Studies,* vol. 32, pp. 21-51, 2019.

[15] M. Maks, "Más allá del petróleo: Una mirada al impacto de los autos eléctricos en las tres principales ciudades del Ecuador," *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca,* vol. 6(10), pp. 151-158, 2017.

[16] M. Rojas, M. Carballo, O. Álvarez, and S. Vivanco, "Emisión de dióxido de carbono de vehículos automotores en la ciudad de Loja, Ecuador," *Cedamaz,* vol. 8(1), pp. 23-29, 2018.

[17] G. Poveda, F. Carrillo, and F. Castro, "Impacto social ante eliminación del subsidio a los combustibles en el Ecuador," *Observatorio de La Economía Latinoamericana,* 2018.

[18] L. Bonisoli and Y. M. Román Córdova, "Relacionando innovación y conciencia ambiental. Análisis de los vehículos eléctricos en el Ecuador," *Revista Geográfica Venezolana,* vol. 64(1), pp. 58-72, 2022.

[19] R. Parra, "Factor de emisión de CO2 debido a la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001-2014," *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías,* vol. 7(2), p. 6, 2015.

[20] F. S. Castaño, "Conducción, en condiciones reales de Galicia, de un vehículo eléctrico con autonomía extendida (REX)," *Dínamo Técnica: Revista Gallega de Energía,* vol. 19, pp. 12-15, 2016.

[21] J. González. (2019, Noviembre 08) La primera electrolinera del Ecuador se inauguró en Guayaquil. *El Comercio*.

[22] J. Ortega and G. A., "Sistema de recarga de vehículos eléctricos: revisión tecnológica e impacto en el sistema eléctrico," *Economía industrial,* vol. 411, pp. 35-44, 2019.

[23] J. Catalá, *Todo lo que debes saber sobre el coche eléctrico*. Valencia: Universidad de Valencia, 2019.

[24] A. Araujo. (2016, Enero 27) Kía lanzó a la venta el primer vehículo eléctrico en Ecuador a USD 34 990. *El Comercio*.

[25] J. Gómez, L. González, P. Vide, and N. Gameiro, "Impacto de las estaciones de carga para vehículo eléctrico en la curva de carga de la Ciudad de Cuenca," *Maskana - Ingeniería Eléctrica Y Electrónica,* pp. 1-8.

[26] E. Zambrano. (2021, Septiembre 22) ¿Por qué no despegan las electrolineras en Ecuador?, uno de los principales problemas a la hora de impulsar la venta de autos eléctricos. *El Universo*.

[27] "RESOLUCIÓN No. 009 - 2021,"

[28] G. A. Martínez Correa, "Descripción del proceso y análisis del Retrofit de un vehículo de combustión interna a pila de combustible,"

[29] R. D. e. al, "Analysis of critical issues in retrofitting of ICE vehicles," *Journal of Physics: Conference Series,* vol. 2070, no. doi:10.1088/1742-6596/2070/1/012151, 2021.

[30] A. Basurco Hernández de Santamaría, "Conversión a eléctrico de un vehículo de combustión interna,"

[31] H. A. Gabbar, A. M. Othman, and M. R. Abdussami, "Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards," *Technologies,* vol. 9, no. 2, p. 28, 2021.

[32] M. Abbas, I. Cho, and J. Kim, "Analysis of High-Power Charging Limitations of a Battery in a Hybrid Railway System," *Electronics,* vol. 9, no. 2, p. 28212, 2020.

[33] E. Arnieri, L. Boccia, F. Amoroso, G. Amendola, and C. , G., "Improved efficiency management strategy for battery-based energy storage systems," *Electronics,* vol. 8, no. 12, p. 1459, 2019.

[34] M. G. M. Abdolrasol *et al.*, "Advanced data-driven fault diagnosis in lithium-ion battery management systems for electric vehicles: Progress, challenges, and future perspectives," *eTransportation,* vol. 22, p. 100374, 2024.

[35] L. Kailong, L. Kang, P. Qiao, and Z. Cheng, "A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles," *Frontiers of Mechanical Engineering,* vol. 14, pp. 47–64, 2019.

[36] W. Liu, T. Placke, and K. T. Chau, "Overview of batteries and battery management for electric vehicles," *Energy Reports,* vol. 8, pp. 4058-4084, 2022/11/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.016.

[37] A. Ria and P. Dini, "A Compact Overview on Li-Ion Batteries Characteristics and Battery Management Systems Integration for Automotive Applications," *Energies*, vol. 17, no. 23, doi: 10.3390/en17235992.

[38] G. T and D. C, "A Review on Different State of Battery Charge Estimation Techniques and Management Systems for EV Applications," *Electronics*, vol. 11, no. 11, doi: 10.3390/electronics11111795.

[39] M. Cortés-Carmona, A. Mallco-Mallco, R. Palma-Behnke, W. Calderón-Muñoz, and J. Reyes-Marambio, "Altitude effect in the design of a lithium-ion battery packing system," in *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 18-20 Oct. 2017 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/CHILECON.2017.8229556.

[40] F. S. Hwang *et al.*, "Review of battery thermal management systems in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 192, p. 114171, 2024/03/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114171.

[41] P. Rahmani *et al.*, "Driving the future: A comprehensive review of automotive battery management system technologies, and future trends," *Journal of Power Sources,* vol. 629, p. 235827, 2025/02/15/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235827.

[42] M. K. Hasan, M. Mahmud, A. K. M. Ahasan Habib, S. M. A. Motakabber, and S. Islam, "Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges," *Journal of Energy Storage,* Article vol. 41, 2021, Art no. 102940, doi: 10.1016/j.est.2021.102940.

[43] T. Talluri, T. H. Kim, and K. J. Shin, "Analysis of a Battery Pack with a Phase Change Material for the Extreme Temperature Conditions of an Electrical Vehicle," *Energies*, vol. 13, no. 3, doi: 10.3390/en13030507.

[44] M. Steinstraeter, T. Heinrich, and M. Lienkamp, "Effect of Low Temperature on Electric Vehicle Range," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 3, doi: 10.3390/wevj12030115.

[45] P. Iora and L. Tribioli, "Effect of Ambient Temperature on Electric Vehicles' Energy Consumption and Range: Model Definition and Sensitivity Analysis Based on Nissan Leaf Data," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 10, no. 1, doi: 10.3390/wevj10010002.

[46] S. Ma *et al.*, "Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review," *Progress in Natural Science: Materials International,* vol. 28, no. 6, pp. 653-666, 2018/12/01/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002.

[47] K. Das and R. Kumar, "Electric vehicle battery capacity degradation and health estimation using machine-learning techniques: a review," *Clean Energy,* vol. 7, no. 6, pp. 1268-1281, 2023, doi: 10.1093/ce/zkad054.

[48] A. Ashraf *et al.*, "Review of Cell-Balancing Schemes for Electric Vehicle Battery Management Systems," *Energies*, vol. 17, no. 6, doi: 10.3390/en17061271.

[49] L. Zhou *et al.*, "State Estimation Models of Lithium-Ion Batteries for Battery Management System: Status, Challenges, and Future Trends," *Batteries*, vol. 9, no. 2, doi: 10.3390/batteries9020131.

[50] N. Horri and M. Pietraszko, "A Tutorial and Review on Flight Control Co-Simulation Using Matlab/Simulink and Flight Simulators," *Automation*, vol. 3, no. 3, pp. 486-510doi: 10.3390/automation3030025.

[51] T. Chaudhari and S. Chakravorty, "Analysis and advancements of the state of charge estimation methods in smart battery management system supported by lithium-ion battery operated electric vehicles," *Next Energy,* vol. 8, p. 100337, 2025/07/01/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100337.

[52] A. O. Ali, O. Abdelrehim, M. M. Saafan, M. R. Elmarghany, and A. M. Hamed, "Comprehensive review of battery management systems for electric vehicles: Thermal management, charging strategies, and emerging technologies," *Journal of Power Sources,* vol. 658, p. 238269, 2025/12/01/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238269.

[53] H. A. Gabbar, A. M. Othman, and M. R. Abdussami, "Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards," *Technologies*, vol. 9, no. 2, doi: 10.3390/technologies9020028.

[54] S. Thangavel, D. Mohanraj, T. Girijaprasanna, S. Raju, C. Dhanamjayulu, and S. M. Muyeen, "A Comprehensive Review on Electric Vehicle: Battery Management System, Charging Station, Traction Motors," *IEEE Access,* Review vol. 11, pp. 20994-21019, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3250221.

[55] R. P. Tapaskar, P. P. Revankar, and S. V. Ganachari, "Advancements in Battery Management Systems for Electric Vehicles: A MATLAB-Based Simulation of 4S3P Lithium-Ion Battery Packs," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, no. 6, doi: 10.3390/wevj15060222.

[56] K. Tang *et al.*, "The State of Health Estimation of Lithium-Ion Batteries: A Review of Health Indicators, Estimation Methods, Development Trends and Challenges," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 8, doi: 10.3390/wevj16080429.

[57] Y. Xing, E. W. M. Ma, K. L. Tsui, and M. Pecht, "Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles," *Energies*, vol. 4, no. 11, pp. 1840-1857doi: 10.3390/en4111840.

[58] H. Li, C. A. Ooi, Z. Jia, K. Ammar, and M. K. Ishak, "A review of active cell balancing methods in electric vehicles," *Energy Conversion and Management: X,* vol. 28, p. 101244, 2025/10/01/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101244.

[59] N. Khan, C. A. Ooi, A. Alturki, M. Amir, Shreasth, and T. Alharbi, "A critical review of battery cell balancing techniques, optimal design, converter topologies, and performance evaluation for optimizing storage system in electric vehicles," *Energy Reports,* vol. 11, pp. 4999-5032, 2024/06/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.04.041.

[60] O. Demirci, S. Taskin, E. Schaltz, and B. Acar Demirci, "Review of battery state estimation methods for electric vehicles-Part II: SOH estimation," *Journal of Energy Storage,* vol. 96, p. 112703, 2024/08/15/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112703.