

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo y validación de un modelo electrotérmico para la gestión térmica de baterías de ion-litio.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Alejandro Serrano Montesinos

DIRECTOR: Víctor Ángel Alfonsín Pérez

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universidade Vigo



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo y validación de un modelo electrotérmico para la gestión térmica de baterías de ion-litio.

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

Universidade Vigo

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado desarrolla y valida un modelo electrotérmico para analizar el comportamiento de baterías de ion-litio bajo distintas condiciones de operación. Dado que su rendimiento depende del estado de carga y la temperatura, resulta necesario disponer de modelos que describan su comportamiento.

Para ello, se realiza la caracterización experimental de una batería de ion-litio mediante ensayos controlados de carga y descarga en un banco diseñado específicamente. El sistema permite mantener condiciones térmicas controladas en una cámara térmicamente controlada, facilitando el estudio de la influencia de la temperatura en la relación entre la tensión en circuito abierto y el estado de carga. A partir de los datos obtenidos, se construyen las curvas que relacionan el estado de carga y la tensión de circuito abierto y se ajustan mediante un modelo polinómico continuo.

También se implementa un modelo electrotérmico en Simulink® utilizando la librería Simscape Electrical, integrando el comportamiento eléctrico y térmico de la batería.

Finalmente, los resultados de simulación se comparan con los datos experimentales, mostrando una buena concordancia entre las curvas simuladas y las experimentales lo que valida la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento real y su aplicabilidad en sistemas de gestión de baterías.

PALABRAS CLAVE

Estado de carga, Tensión de circuito abierto, Temperatura, Electrotérmico, Gestión térmica

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar estas líneas que me ofrecen para agradecer a todas aquellas personas que me han acompañado y apoyado durante este camino en esta Escuela.

A mis padres, Pedro y Juani, todo el apoyo que me han dado a lo largo de estos cinco años de Escuela y también el apoyo que me dieron durante el proceso para poder a llegar ser oficial de la Armada. También quiero agradecer a mi hermano Pedro por el apoyo que me ha dado cuando siempre lo he necesitado.

En segundo lugar, a mi tutor y director de este trabajo, el Dr Víctor Ángel Alfonsín Pérez por darme la oportunidad de cerrar mi etapa en esta Escuela con él y por toda la guía y ganas de aprender durante la realización del trabajo.

Por último, no me quiero olvidar de los grandes amigos y compañeros que me llevo de estos cinco años ya que sin ellos este camino no habría sido lo mismo. Gracias por acompañarme durante esta larga singladura y espero veros siempre en puerto o en la mar.

CONTENIDO

Contenido 1

Índice de Figuras 4

Índice de Tablas 6

1 Introducción y Objetivos 7

1.1 Contexto general 7

1.2 Importancia de las baterías en la actualidad 7

1.3 Importancia de la temperatura 8

1.3.1 Capacidad de descarga y eficiencia energética. 9

1.3.2 Resistencia interna y polarización. 9

1.4 Necesidad de modelos equivalentes de baterías 9

1.5 Aplicación de los modelos en sistemas de gestión de baterías (BMS) 10

1.6 Objetivos 10

2 Estado del Arte 11

2.1 Introducción 11

2.2 Parámetros eléctricos básicos de la celda de una batería 11

2.3 Relación de las curvas SOC-OCV según tipos de batería 12

2.3.1 Factores que modifican la curva OCV de una batería 12

2.3.2 Baterías de litio ferrofosfato ($LiFePO_4$) 12

2.3.3 Baterías de óxido de litio y cobalto ($LiCoO_2$) 13

2.3.4 Comportamiento general de las baterías de ion-litio 14

2.4 Principios electroquímicos de una batería 15

2.5 Modelos eléctricos equivalentes. 16

2.5.1 Modelos eléctricos. 16

2.5.2 Modelos térmicos. 16

2.5.3 Modelos electrotérmicos. 17

2.6 Generación de calor en baterías. 18

2.6.1 Fuentes de calor internas. 18

2.6.2 Acoplamiento electrotérmico. 18

2.7 Estrategias para la gestión térmica de una batería. 18

2.7.1 Sistemas pasivos 19

2.7.2 Sistemas activos. 19

2.8 Problemas asociados de una inadecuada gestión térmicas en las baterías de ion-litio 20

2.8.1 Envejecimiento prematuro de la batería. 20

2.8.2 Riesgos a bajas temperaturas. 20

2.8.3 Fuga térmica. 20
2.9 Factores que afectan al rendimiento de una batería 21
2.9.1 Influencia de la temperatura de operación 22
2.9.2 Condiciones de carga y descarga 22
2.9.3 Profundidad de descarga (DoD) y rango de SOC 22
2.9.4 Envejecimiento por ciclado y envejecimiento por calendario 22
2.9.5 Mecanismos internos de degradación electroquímica 23
2.9.6 Incremento de la resistencia interna y pérdida de potencia 24
2.9.7 Influencia del diseño y la química de la celda 24
2.10 Métodos de carga y descarga en sistemas de almacenamiento de energía 25
3 Metodología Experimental 28
3.1 Introducción 28
3.2 Elementos para el ensayo 28
3.2.1 Batería de ion-litio de 2000 mAh. 29
3.2.2 Cargador y descargador SkyRC T1000 Maestro 30
3.2.3 Banco de pruebas. 31
3.3 Procedimiento experimental 37
3.3.1 Ensayos de carga y descarga 37
3.3.2 Carga y descarga de la batería 38
3.3.3 Ciclos con tiempo de relajación. 39
3.3.4 Construcción de gráficas mediante script MATLAB 39
4 Resultados experimentales 41
4.1 Introducción 41
4.2 Ensayo de carga y descarga a 20 ºC 41
4.3 Ensayo de carga y descarga a 35 ºC 43
4.4 Ensayo de carga y descarga a 45 ºC 44
4.5 Ensayo de carga y descarga a 55 ºC 45
4.6 Comparación de las curvas SOC-OCV a diferentes temperaturas 46
4.7 Ajuste polinómico de las curvas SOC-OCV 49
5 Modelado y Simulación 52
5.1 Entorno Simscape 52
5.1.1 Introducción 52
5.1.2 Librería Simscape Electrical 52
5.2 Esquema general del modelado electrotérmico 53
5.2.1 Introducción al modelado 53
5.2.2 Batería empleada para modelado y esquema del modelado 53

5.2.3 Influencia de la temperatura en el modelado 55
5.3 Modelo eléctrico 56
5.3.1 Componentes del modelado eléctrico 56
5.3.2 Consideraciones del modelo eléctrico 57
5.3.3 Funcionamiento del modelo eléctrico 58
5.4 Modelo térmico 58
5.4.1 Componentes del modelado térmico 59
5.4.2 Funcionamiento del modelado térmico 60
5.5 Interacción modelo eléctrico y modelo térmico 60
5.6 Curvas SOC-OCV obtenidas de la simulación 62
5.6.1 Ensayo de carga y descarga simulado a 20 ºC 62
5.6.2 Ensayo de carga y descarga simulado a 55 ºC 63
5.7 Comparación de las curvas experimentales y simuladas 64
5.7.1 Análisis de las curvas SOC-OCV simulada y experimental a 20 ºC 64
5.7.1 Análisis de las curvas SOC-OCV simulada y experimental a 20 ºC 65
5.7.2 Comparación de las curvas SOC-OCV simuladas/experimentales a 20 ºC y 55 ºC 66
5.8 Aplicación del modelo electrotérmico en el desarrollo de sistemas de gestión de baterías (BMS) 67
5.8.1 Introducción a los sistemas de gestión de baterías 67
5.8.2 Implementación del modelo electrotérmico en un BMS 68
5.8.3 Aplicación del modelo desarrollado en un BMS 68
6 Conclusiones y Líneas Futuras 70
6.1 Introducción 70
6.2 Conclusiones 70
6.3 Líneas futuras 71
7 Bibliografía 72
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales 75
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales 76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Partes de una batería [Fuente: creación propia].....8
Figura 1-2 Capacidad de almacenamiento de energía de distintos tipos de baterías.[1].....8
Figura 2-1 Curva SOC-OCV característica de una batería $LiFePO_4$ [8].....13
Figura 2-2 Curva SOC-OCV característica de una batería $LiCoO_2$ [9].....13
Figura 2-3 Curva SOC-OCV característica de una batería litio ion [12].....14
Figura 2-4 Circuito equivalente Thévenin para una batería [Fuente: elaboración propia con SmartDraw].....16
Figura 2-5 Modelo electrotérmico [Fuente: creación propia].....17
Figura 2-6. Bucle explicativo de fuga térmica [Fuente: creación propia].....21
Figura 2-7. Capa SEI [40].....23
Figura 2-8. Diseños de celda: celda azul tipo *bobbin*, celda negra diseño espiralado. [Fuente: imagen creada con Google Gemini].....25
Figura 2-9. Carga CC-CV [Fuente: creación propia].....26
Figura 3-1. Batería AMEWI® Ion-litio [Fuente propia].....29
Figura 3-2. Cargador-descargador SkyRC T1000 Maestro [Fuente propia].....30
Figura 3-3. Exterior de la cámara térmicamente controlada para control de temperatura [Fuente propia].....32
Figura 3-4. Interior de la cámara térmicamente controlada [Fuente propia].....32
Figura 3-5. MOSFET [Fuente propia].....33
Figura 3-6. Conjunto MAX31865 y sonda PT100 [Fuente propia].....34
Figura 3-7. Microcontrolador Arduino empleado para el control [Fuente propia].....34
Figura 3-8. Módulo reductor de tensión [43].....35
Figura 3-9. Parte delantera y trasera del LCD [Fuente propia].....35
Figura 3-10. Diseño electrónico para el control PID de gestión de temperatura [Fuente: elaboración propia mediante Cirkit Designer IDE].....36
Figura 3-11. Disposición de los componentes electrónicos necesarios para el control PID [Fuente propia].....37
Figura 3-12. Vista completa de una carga (izquierda) y descarga (derecha) a 2A de la batería. [Fuente: elaboración propia con software Charger Master].....38
Figura 4-1. Curva OCV del sistema a 20 ºC [Fuente: elaboración propia con MATLAB].....42
Figura 4-2. Curva OCV del sistema a 35 ºC [Fuente: elaboración propia con MATLAB].....44
Figura 4-3. Curva OCV del sistema a 45 ºC [Fuente: elaboración propia con MATLAB].....45
Figura 4-4. Curva OCV del sistema a 55 ºC [Fuente: elaboración propia con MATLAB].....46
Figura 4-5. Comparación de las curvas OCV a diferentes temperaturas [Fuente: elaboración propia].....47
Figura 4-6. Comparación de resistencia interna a lo largo del SOC a 20 ºC y 55º C.....48

Figura 4-7. Ajuste polinómico de sexto grado para curva experimental de 35 ºC. 50

Figura 5-1. Modelo electrotérmico desarrollado con Simulink® [Fuente: elaboración propia]. 54

Figura 5-2 Parte eléctrica del modelo electrotérmico [Fuente propia].....56

Figura 5-3. Configuración del bloque *Signal Editor*. 57

Figura 5-4. Parte térmica del modelo electrotérmico. 59

Figura 5-5. Graficas que representan el funcionamiento interno del modelo electrotérmico [Fuente propia]. 61

Figura 5-6. Curva SOC-OCV a 20 ºC obtenida con modelo Simscape. 62

Figura 5-7. Curva SOC-OCV a 55 ºC obtenida con modelo Simscape. 63

Figura 5-8. Comparación de las curvas SOC-OCV a 20 ºC. 64

Figura 5-9 Comparación de las curvas SOC-OCV a 55 ºC.....65

Figura 5-10 Implementación del modelo electrotérmico en un sistema de gestión de baterías [Fuente: creación propia].....69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Comparación curvas SOC-OCV con diferentes químicas 14
Tabla 3-1. Especificaciones técnicas de la batería 30
Tabla 3-2. Características técnicas cargador-descargador [42]. 31
Tabla 3-3. Planificación ensayos experimentales. 39
Tabla 4-1. Datos de R_{int} calculados para el ensayo a 20 ºC. 43
Tabla 4-2 Datos de R_{int} calculados para el ensayo a 55 ºC 46
Tabla 4-3. Datos OCV, en voltios, obtenidos experimentalmente 47
Tabla 4-4 Coeficientes obtenidos del ajuste de sexto grado 51
Tabla 5-1. Especificaciones técnicas batería Panasonic® NCR18500A. 55
Tabla 5-2. Parámetros eléctricos del modelo de batería implementado para la simulación. 56

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto general

Las baterías de ion-litio se han consolidado como la tecnología de almacenamiento electroquímico predominante en la actualidad, siendo empleadas en aplicaciones que abarcan desde la electrónica portátil hasta el vehículo eléctrico y los sistemas estacionarios de almacenamiento de energía. Su elevada densidad energética, su alta eficiencia y su capacidad de operar en múltiples ciclos de carga y descarga las convierten en un elemento clave en el contexto actual de transición energética y electrificación de sistemas.

En este escenario, el almacenamiento de energía desempeña un papel fundamental en la integración de fuentes renovables y en el desarrollo de soluciones de movilidad sostenible, lo que ha impulsado el crecimiento y la mejora continua de las tecnologías basadas en baterías de ion-litio.

1.2 Importancia de las baterías en la actualidad

Los sistemas de almacenamiento basados en la química de ion-litio son hoy en día una de las tecnologías de almacenamiento energético más relevantes y mundialmente extendida. Una batería es un conjunto de dos o más celdas conectadas en serie o en paralelo considerándose una celda como la unidad de la batería capaz de convertir la energía química en eléctrica a través de reacciones electroquímicas. Las principales partes de una batería son ánodo, cátodo, separador y electrolito. Entre ánodo y cátodo se producirán reacciones de oxidación y reducción teniendo así una pérdida o ganancia de electrones, respectivamente, que permiten la generación de corriente eléctrica.

Desde el inicio de su comercialización en la década de los 90 este tipo de baterías, clasificadas como baterías secundarias o recargables, han experimentado un considerable crecimiento dadas sus ventajas frente a otras tecnologías de almacenamiento. Tanto es así que este tipo de almacenamiento electroquímico se ha visto empleado en numerosos tipos de dispositivos portátiles y elementos cotidianos. Desde hace no mucho tiempo también se han usado en vehículos eléctricos, robots o incluso en satélites [1].

Las principales ventajas que presentan este tipo de baterías respecto a otras son una elevada densidad de energía tanto gravimétrica como volumétrica. Estas propiedades le atribuyen a este tipo de baterías la capacidad de almacenar una mayor cantidad de energía con menor peso y volumen.

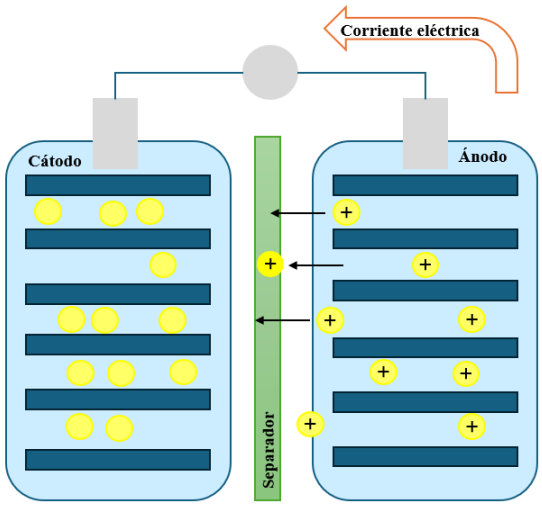


Figura 1-1 Partes de una batería [Fuente: creación propia]

La Figura 1-2 muestra una comparación entre distintas tecnologías de baterías en función de su densidad de energía gravimétrica (Wh/kg) y densidad de energía volumétrica (Wh/L). Como puede observarse, las baterías de ion-litio se sitúan en una región con valores superiores a tecnologías más tradicionales como las baterías de ácido-plomo, Ni-Cd o Ni-MH, lo que evidencia su mayor capacidad para almacenar energía con menor peso y volumen. Asimismo, la figura indica que tecnologías más recientes, como las baterías de litio-metal, presentan potenciales densidades energéticas aún mayores. Estas características explican por qué las baterías de ion-litio se han convertido en la tecnología predominante en aplicaciones portátiles, vehículos eléctricos y sistemas modernos de almacenamiento de energía.

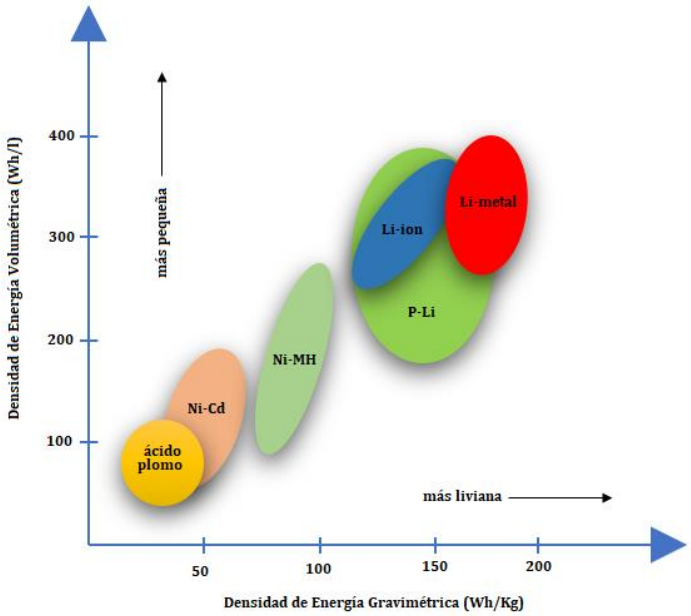


Figura 1-2 Capacidad de almacenamiento de energía de distintos tipos de baterías.[1]

1.3 Importancia de la temperatura

La temperatura desempeña un papel importante en el comportamiento electroquímico y en la degradación de las baterías de ion-litio, ya que influye directamente en parámetros como la resistencia interna, la potencia suministrable y la capacidad de descarga, de gran importancia en la gestión energética de las baterías. Las variaciones de temperatura modifican la velocidad de las reacciones

electroquímicas, afectando a la resistencia interna y, en consecuencia, a la tensión terminal y a la energía que puede extraerse de la batería [2].

Por otra parte, la temperatura condiciona los mecanismos de envejecimiento de la batería. El rango óptimo de operación de una batería oscila entre los 15 ºC y los 35 ºC y un funcionamiento por debajo de ese rango favorece la deposición de litio activo disponible provocando una pérdida progresiva de capacidad. También, la exposición a temperaturas elevadas acelera la aparición de reacciones secundarias, como la degradación del electrolito y el crecimiento de la capa de interfase sólido-electrolito (SEI), incrementando la resistencia interna y deteriorando el estado de salud (SOH) de la batería [3].

1.3.1 Capacidad de descarga y eficiencia energética.

La capacidad de una batería de ion-litio no es constante, sino que fluctúa significativamente en relación con la temperatura. En entornos de baja temperatura, inferiores a 0 ºC, la capacidad de descarga disminuye notablemente debido a la reducción de la actividad del electrolito y al incremento de su viscosidad, lo que dificulta el movimiento de los iones. Por el contrario, un calor moderado de entorno 25 ºC a 55 ºC suele incrementar ligeramente la capacidad al reducir la resistencia interna y acelerar el movimiento de los iones [2].

1.3.2 Resistencia interna y polarización.

La resistencia interna es otro parámetro que se ve altamente influenciado por la temperatura. Al descender la temperatura, la velocidad de las reacciones electroquímicas se reduce y la resistencia óhmica y de polarización aumentan considerablemente. Este incremento lo que provoca es que la batería alcance antes su voltaje de corte, terminando la descarga de forma prematura y reduciendo la potencia disponible. El estado de carga (SOC) también se ha observado que también influye, ya que la resistencia interna es máxima cuando la batería está totalmente cargada (SOC de 100%) o cuando está vacía (SOC del 0%). Además, la polarización de la batería es más sensible a los cambios del SOC que a la resistencia óhmica pura [2].

Por ello, resulta necesario el desarrollo e implementación de modelos electrotérmicos capaces de describir la evolución térmica de la batería y analizar el impacto de la temperatura tanto en su funcionamiento como en su envejecimiento. Estos modelos constituyen una herramienta útil para el diseño y la validación de estrategias de gestión térmica orientadas a maximizar el rendimiento, la vida útil y la seguridad de las baterías de ion-litio.

1.4 Necesidad de modelos equivalentes de baterías

El comportamiento de las baterías de ion-litio es el resultado de la interacción de múltiples fenómenos físicos y electroquímicos, lo que dificulta su caracterización directa a partir de magnitudes medibles. Variables internas como el estado de carga (SOC), la resistencia interna o la generación de calor no pueden determinarse de forma directa mediante sensores convencionales, pero resultan fundamentales para evaluar el estado y el rendimiento de la batería [4].

En este contexto, el desarrollo de modelos equivalentes se convierte en una herramienta imprescindible para describir y predecir el comportamiento del sistema. Estos modelos permiten estimar variables internas a partir de magnitudes accesibles como la corriente, la tensión y la temperatura, facilitando el análisis del funcionamiento de la batería bajo distintas condiciones de operación.

Además, la creciente complejidad de las aplicaciones basadas en almacenamiento electroquímico, como el vehículo eléctrico o los sistemas de almacenamiento de energía, exige herramientas que permitan simular el comportamiento de la batería de forma fiable. En particular, la fuerte dependencia entre los fenómenos eléctricos y térmicos hace necesario el uso de modelos que integren ambos dominios, capaces de representar no solo la respuesta eléctrica del sistema, sino también su evolución térmica.

En este sentido, los modelos electrotérmicos permiten capturar el acoplamiento existente entre la generación de calor y la variación de los parámetros eléctricos, proporcionando una representación más realista del comportamiento de la batería. Su utilización resulta especialmente relevante en el diseño, control y optimización de sistemas de gestión de baterías, donde la estimación precisa de variables internas es primordial para garantizar un funcionamiento seguro, eficiente y duradero.

1.5 Aplicación de los modelos en sistemas de gestión de baterías (BMS)

Los sistemas de gestión de baterías (*Battery Management System*,BMS) constituyen un elemento bastante importante en cualquier sistema basado en baterías de ion-litio, ya que se encargan de garantizar su funcionamiento seguro, eficiente y fiable. Estos sistemas supervisan variables externas como la tensión, la corriente y la temperatura, y a partir de ellas deben estimar magnitudes internas no directamente medibles, como el estado de carga o la generación de calor [4].

Para llevar a cabo estas funciones de forma precisa, los BMS requieren del uso de modelos matemáticos capaces de reproducir el comportamiento de la batería bajo distintas condiciones de operación. La calidad de estas estimaciones depende en gran medida de la fidelidad del modelo empleado, lo que influye directamente en aspectos clave como la autonomía disponible, la vida útil del sistema o la prevención de situaciones de riesgo.

En este contexto, el desarrollo de modelos electrotérmicos como el propuesto en este trabajo permite avanzar hacia una representación más realista del comportamiento de la batería, al considerar de forma conjunta la interacción entre los fenómenos eléctricos y térmicos. Este tipo de modelado resulta especialmente adecuado para su futura integración en sistemas BMS, donde puede emplearse como base para la estimación en tiempo real de variables internas y para la implementación de estrategias de control más avanzadas.

De este modo, el modelo desarrollado no solo tiene un valor académico, sino que se orienta hacia su aplicación en sistemas reales de gestión de baterías. En este contexto, el presente trabajo se centra en el desarrollo y validación de un modelo electrotérmico de baterías de ion-litio, con el objetivo de analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación.

1.6 Objetivos

A continuación, se presentan los principales objetivos de este trabajo. Estos objetivos establecen las etapas necesarias para llevar a cabo el estudio, desde el desarrollo del montaje experimental hasta la construcción del modelo de simulación y la validación de los resultados obtenidos. De esta forma, se define una metodología que permite relacionar los ensayos experimentales con su representación en el entorno de simulación.

Los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

1. Diseñar y desarrollar el banco de pruebas necesario para la realización de los ensayos experimentales con la batería, incluyendo los elementos de medida, carga y control que permitan obtener unos datos fiables del comportamiento del sistema.
2. Diseñar y configurar el sistema electrónico necesario para poder realizar ensayos controlados bajo diferentes condiciones de temperatura.
3. Implementar un modelo de la batería en un entorno de simulación de forma que se reproduzca lo más fielmente posible las condiciones y características observadas en los ensayos experimentales.
4. Comparar los resultados obtenidos en la simulación con los datos experimentales, analizando las curvas características obtenidas en ambos casos con el fin de evaluar la validez y precisión del modelo desarrollado.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

El presente estado del arte se centra en aquellos aspectos fundamentales necesarios para el desarrollo de un modelo que describa el comportamiento de una batería de ion-litio. A diferencia de un enfoque general, en el que se abordan de forma amplia las características y aplicaciones de estos sistemas, en este apartado se seleccionan y analizan únicamente los conceptos que resultan relevantes para la modelización del sistema.

En primer lugar, se estudia la relación entre la tensión en circuito abierto y el estado de carga (OCV–SOC), ya que constituye una de las bases para la estimación del estado interno de la batería. A continuación, se presentan los modelos eléctricos empleados para representar su comportamiento dinámico, así como los modelos térmicos que permiten describir la evolución de la temperatura.

Posteriormente, se introduce el concepto de modelado electrotérmico, que integra ambos dominios y permite capturar el acoplamiento entre los fenómenos eléctricos y térmicos. Finalmente, se analizan los mecanismos de generación de calor y la influencia de la temperatura sobre los parámetros de la batería, aspectos clave para comprender su comportamiento real y justificar la necesidad de modelos más completos.

De este modo, en este estado del arte se establecen las bases teóricas necesarias para el desarrollo del modelo electrotérmico que se implementa y valida en los capítulos posteriores.

2.2 Parámetros eléctricos básicos de la celda de una batería

Antes de abordar el análisis de la relación entre la tensión en circuito abierto y el estado de carga, resulta necesario definir los principales parámetros eléctricos que caracterizan el comportamiento de una celda de batería. Magnitudes como la tensión de circuito abierto (OCV), la tensión en carga (CCV), el estado de carga (SOC) o la capacidad constituyen la base para la descripción de su funcionamiento y permiten interpretar correctamente las curvas características que se presentan a continuación. Estas variables no solo describen el estado instantáneo de la batería, sino que también resultan fundamentales para el desarrollo de modelos que reproduzcan su comportamiento eléctrico y térmico.

Desde el punto de vista eléctrico, el comportamiento de una celda de ion-litio se caracteriza mediante una serie de parámetros básicos en este contexto.

- **Tensión teórica**. Es función directa de los materiales activos que componen el ánodo y el cátodo de la batería, la composición del electrolito y la temperatura. Es el potencial máximo que la batería puede entregar basándose solamente en la termodinámica de sus materiales.

- **Tensión de circuito abierto (OCV, Open Circuit Voltage).** Es el voltaje de la batería en una condición de carga nula, es decir, cuando no circula ninguna corriente por ella. Esto es por tanto un estado de reposo y es normalmente una aproximación cercana al voltaje teórico.
- **Tensión de circuito cerrado (CCV, Close Circuit Voltage).** Es la tensión medida cuando la batería está bajo una condición de carga. También se le puede llamar voltaje de trabajo y siempre tiene que ser menor que la tensión de circuito abierto.
- **Estado de carga (SOC, State of Charge).** Es una medida que estima la capacidad de la batería. Dependerá de la capacidad de cada batería y suele expresarse en tanto por ciento.
- **Capacidad**, expresada en Ah, indica la cantidad de carga eléctrica que puede almacenarse. Este parámetro se relaciona con la energía específica, medida en Wh/kg, que relaciona la energía almacenada con la masa de la celda.

Otros parámetros como como la resistencia interna y la tasa de carga o descarga son imprescindibles en la respuesta dinámica de la batería, ya que son condicionantes de las caídas de tensión bajo carga, la generación de calor en las celdas de la batería y la potencia suministrable.

2.3 Relación de las curvas SOC-OCV según tipos de batería

El estudio de las curvas de tensión en circuito abierto permite analizar el comportamiento de una batería en función de su estado de carga. La forma de esta curva muestra cómo varía la tensión a medida que la batería se carga o descarga y el grado de sensibilidad de la tensión frente a dichas variaciones. El análisis y la comparación de las curvas OCV de distintos tipos de baterías facilitan la comprensión de sus diferencias de funcionamiento y permiten evaluar si la tensión puede utilizarse como un indicador fiable del estado de carga. Este análisis resulta especialmente útil en el desarrollo de modelos y en el diseño de sistemas de gestión de baterías.

2.3.1 Factores que modifican la curva OCV de una batería

La forma y el valor de la tensión en circuito abierto dependen bastante de la química del sistema, entre otros factores. La OCV representa el potencial de equilibrio del par electroquímico formado por los materiales activos del ánodo y el cátodo por lo que cualquier variación en su composición modifica directamente la tensión en reposo. Esta es la razón por la que curvas como plomo ácido, Zn-C o Ion-litio presenten curvas OCV-SOC claramente diferenciadas [5].

En determinados sistemas, especialmente aquellos con electrolitos acuosos, la composición del medio también influye en el potencial de equilibrio. La variación de la concentración del electrolito modifica la actividad química de las especies involucradas en la reacción, lo que se traduce en cambios en la tensión en reposo [5].

La temperatura constituye otro factor relevante, ya que interviene directamente en los términos termodinámicos que determinan el potencial de equilibrio. Variaciones térmicas pueden producir ligeros desplazamientos en la curva OCV incluso en ausencia de corriente, al alterar las energías libres de reacción. No obstante, es importante diferenciar este efecto del asociado a la resistencia interna. La resistencia interna influye en la tensión cuando la batería está suministrando o absorbiendo corriente, debido a las caídas óhmicas y a la polarización; sin embargo, en condiciones de circuito abierto no existe flujo de corriente, y por tanto, la resistencia no modifica directamente la curva OCV [5, 6].

Para que la tensión medida represente el verdadero valor de equilibrio, la batería debe permanecer en reposo el tiempo suficiente tras un proceso de carga o descarga. De lo contrario, la medida estará afectada por fenómenos transitorios de polarización interna y se reflejará en la curva OCV real.

2.3.2 Baterías de litio ferrofosfato ($LiFePO_4$)

Las baterías de litio ferro fosfato ($LiFePO_4$) se caracterizan por presentar una curva OCV-SOC con una región central relativamente plana, lo que significa que el voltaje permanece prácticamente constante en un amplio rango del estado de carga. Este comportamiento se debe al mecanismo de intercalación del

litio en la estructura del material catódico, donde la reacción electroquímica ocurre mediante una transición de fase entre $LiFePO_4$ y $FePO_4$ [7].

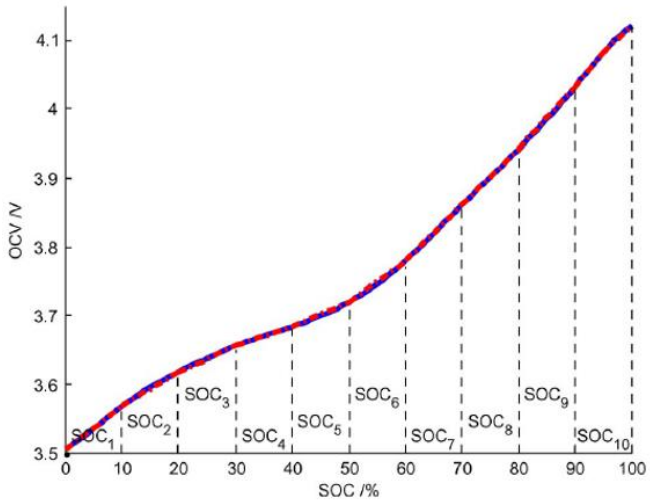


Figura 2-1 Curva SOC-OCV característica de una batería $LiFePO_4$ [8]

Como consecuencia de este fenómeno, pequeñas variaciones en el estado de carga producen cambios muy reducidos en la tensión de circuito abierto dentro de la zona media de la curva. Esta característica dificulta la estimación del SOC a partir de la medición directa del voltaje, especialmente entre aproximadamente el 20% y el 80% del estado de carga [7].

Sin embargo, en los extremos de la curva (SOC muy bajo o alto) la pendiente aumenta de forma significativa, permitiendo una mayor sensibilidad del voltaje frente a variaciones del estado de carga. Este comportamiento es ampliamente considerado en el diseño de algoritmos de estimación de SOC y en el desarrollo de modelos eléctricos equivalentes para baterías de litio [7, 8].

2.3.3 Baterías de óxido de litio y cobalto ($LiCoO_2$)

Las baterías basadas en óxido de litio y cobalto ($LiCoO_2$) presentan una curva OCV-SOC con una pendiente más pronunciada en comparación con otras químicas de ion-litio. A lo largo del proceso de descarga, el voltaje disminuye de manera relativamente continua a medida que disminuye el estado de carga, lo que proporciona una relación más directa entre el voltaje y el SOC.

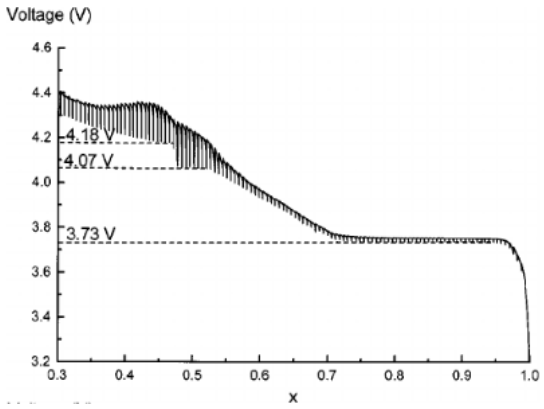


Figura 2-2 Curva SOC-OCV característica de una batería $LiCoO_2$ [9]

Este comportamiento se debe al proceso de intercalación de iones de litio en la estructura laminar del $LiCoO_2$, donde los cambios en la composición del electrodo producen variaciones progresivas en el potencial electroquímico [10]. Como resultado, la curva presenta una mayor sensibilidad del voltaje

frente a variaciones del estado de carga, lo que facilita la estimación del SOC mediante mediciones de tensión en circuito abierto.

Sin embargo, este tipo de material catódico presenta limitaciones relacionadas con la estabilidad térmica y la degradación estructural a altos niveles de carga, factores que han motivado el desarrollo de otras químicas de baterías de ion-litio para aplicaciones de alta potencia o seguridad [10].

2.3.4 Comportamiento general de las baterías de ion-litio

Las baterías de ion-litio engloban una familia de sistemas electroquímicos que comparten el mismo principio de funcionamiento basado en la intercalación reversible de iones de litio entre el ánodo y el cátodo durante los procesos de carga y descarga [7].

En este tipo de baterías, la curva OCV-SOC refleja el equilibrio electroquímico del sistema y depende directamente de los materiales activos utilizados en los electrodos [11]. Aunque las diferentes químicas presentan variaciones en la forma de la curva, en general en la Figura 2-3 se observa una relación no lineal entre la tensión en circuito abierto y el estado de carga, lo que requiere el uso de modelos matemáticos o algoritmos de estimación para determinar el SOC con precisión.

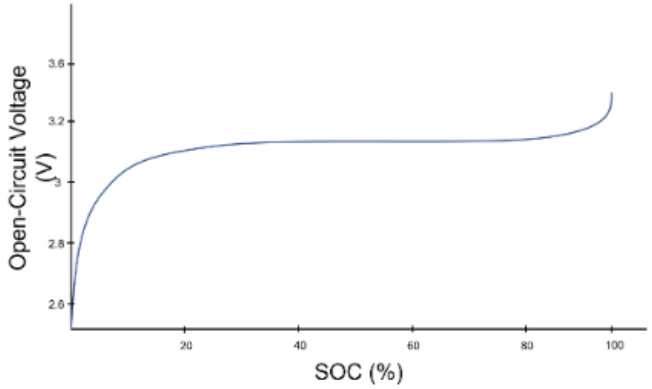


Figura 2-3 Curva SOC-OCV característica de una batería litio ion [12]

Este comportamiento no lineal es uno de los principales desafíos en el desarrollo de sistemas de gestión de baterías (BMS), ya que la relación entre voltaje y SOC puede verse afectada por factores adicionales como la temperatura, el envejecimiento y las condiciones de operación [13].

Con el objetivo de resumir las principales diferencias en el comportamiento de las curvas OCV-SOC según la química de la batería, en la Tabla 2-1 se presenta una comparación entre tres de las tecnologías más representativas: $LiFePO_4$, $LiCoO_2$ y baterías de ion-litio en general. En ella se destacan tanto la forma característica de la curva como las implicaciones que esta tiene en la estimación del estado de carga (SOC), mostrando cómo ciertas químicas, como el $LiFePO_4$, presentan mayores dificultades debido a la presencia de zonas de voltaje prácticamente constante.

Tipo de batería	Forma de la curva SOC-OCV	Característica principal	Dificultad estimación SOC
$LiFePO_4$	Curva con forma de meseta plana en la zona media	Voltaje casi constante	Alta
$LiCoO_2$	Pendiente más pronunciada	Voltaje cambia gradualmente con SOC	Baja
Ion-litio	Curva no lineal	Depende del material catódico	Media

Tabla 2-1 Comparación curvas SOC-OCV con diferentes químicas

Tal como se observa en la Tabla 2-1, la forma de la curva OCV-SOC depende directamente de la química de la batería empleada. Mientras que las baterías $LiFePO_4$ presentan una región central con pendiente muy reducida, lo que dificulta la estimación del SOC a partir del voltaje, otras químicas como $LiCoO_2$ muestran una variación más progresiva del voltaje con el estado de carga, facilitando su estimación.

2.4 Principios electroquímicos de una batería

El funcionamiento de una celda electroquímica se basa en procesos químicos que tienen lugar en las interfases entre los electrodos y el electrolito. En estas interfases se producen reacciones de oxidación-reducción, caracterizadas por la transferencia de electrones entre las especies químicas implicadas. De forma general, estas reacciones pueden descomponerse en dos semirreacciones complementarias: una de reducción, en la que una especie capta electrones, y otra de oxidación, en la que otra especie los libera. Ambas ocurren en electrodos distintos y, al desarrollarse simultáneamente, permiten el intercambio electrónico responsable del flujo de corriente eléctrica en el circuito externo [14]

Desde el punto de vista termodinámico, el progreso de estas reacciones implica una variación de la energía libre de Gibbs (ΔG), que en condiciones de equilibrio está directamente relacionada con el potencial eléctrico de la celda. Esta relación establece el vínculo entre la energía química almacenada en los materiales activos y la energía eléctrica que puede suministrar el sistema [14,15].

$$\Delta G = -nFE \qquad \textit{Ecuación 1}$$

Donde n es el número de electrones, F la constante de Faraday y E el potencial de la celda medido en voltios.

Cuando las especies químicas no se encuentran en condiciones estándar, el potencial electroquímico depende de la composición del sistema. Esta dependencia se describe mediante la ecuación de Nernst, que relaciona el potencial de equilibrio con las actividades o concentraciones de los reactivos y productos presentes en la reacción [14].

$$E = E^o - \frac{RT}{nF} \ln Q \qquad \textit{Ecuación 2}$$

Donde E es el potencial real de la celda, E^O es el potencial de la celda bajo condiciones estándar, R es la constante de los gases ideales, T la temperatura medida en Kelvin, n es el número de electrones, F es la constante de Faraday y Q es el cociente de reacción que en este ámbito estaría directamente relacionado con el estado de carga de la batería.

En las baterías de ion-litio, el avance de la reacción electroquímica está estrechamente asociado a los procesos de intercalación y desintercalación de iones de litio en los materiales activos de los electrodos. La intercalación consiste en la inserción reversible de iones de litio en la estructura cristalina del material del electrodo, mientras que la desintercalación corresponde al proceso inverso, en el que los iones se liberan hacia el electrolito. Este mecanismo permite almacenar y liberar energía durante los ciclos de carga y descarga manteniendo prácticamente inalterada la estructura del material del electrodo cuya estructura cristalina puede alojar iones de litio en su interior de forma reversible [16,17].

A medida que varía la cantidad de litio alojado en los electrodos, también cambian las actividades químicas de las especies implicadas y, en consecuencia, el potencial de equilibrio de la celda. Por esta razón, la relación entre el voltaje en circuito abierto (OCV) y el estado de carga (SOC) puede interpretarse como una representación macroscópica del estado termodinámico interno de la batería [17].

Conviene señalar que el valor de la curva OCV corresponde estrictamente a condiciones de equilibrio, es decir, cuando no circula corriente por la celda. En condiciones reales de funcionamiento intervienen fenómenos adicionales, como resistencias internas o limitaciones cinéticas asociadas a las reacciones electroquímicas, que provocan desviaciones respecto al comportamiento termodinámico ideal.

2.5 Modelos eléctricos equivalentes.

El modelado de baterías es un componente esencial de los sistemas de gestión de energía (BMS), ya que permite predecir el comportamiento dinámico, estudiar el estado de carga (SOC) y garantizar la seguridad operativa [18]. Debido a la complejidad de los fenómenos electroquímicos, eléctricos y térmicos que intervienen en su funcionamiento, existen diferentes enfoques para representar el comportamiento de una batería. Estas aproximaciones permiten describir el sistema con distintos niveles de detalle y complejidad según la aplicación. A continuación, se describen y comparan las tres categorías principales de modelos: eléctricos, térmicos y electrotérmicos.

2.5.1 Modelos eléctricos.

Estos modelos se centran en representar la respuesta de tensión y corriente de la batería. Se pueden dividir principalmente en tres subgrupos:

1) Modelos de mecanismo electroquímico

Utilizan ecuaciones diferenciales parciales basadas en la teoría del electrodo poroso y la cinética de Butler-Volmer para describir los procesos químicos internos [11]. Aunque son los más precisos, su alta complejidad computacional los hace difíciles de implementar en tiempo real en un BMS.

2) Modelos de circuito equivalente (ECM)

Representan la batería mediante componentes como resistencias, condensadores y fuentes de tensión [19]. Entre los más comunes están el modelo Thevenin (Figura 2-4), que añade una red RC para simular la polarización, y el modelo de Doble Polarización (DP), que separa la polarización electroquímica de la concentración para una mayor precisión dinámica [20].

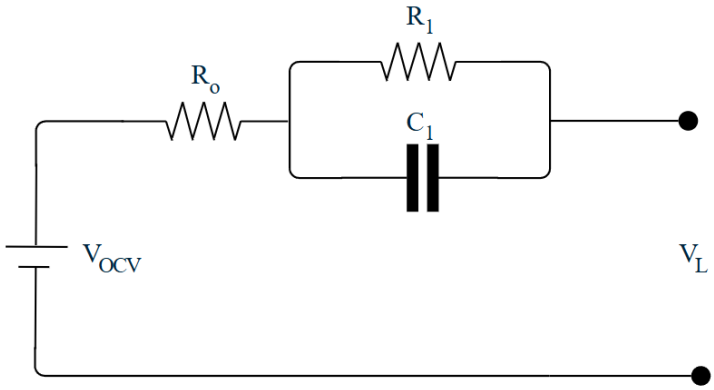


Figura 2-4 Circuito equivalente Thévenin para una batería [Fuente: elaboración propia con SmartDraw].

3) Modelos basados en datos

Utilizan técnicas de aprendizaje automático (como redes neuronales o máquinas de vectores de soporte) para aprender el comportamiento de la batería a partir de grandes volúmenes de datos experimentales. Son flexibles y no requieren conocimientos físicos profundos, pero su precisión depende totalmente de la calidad y cantidad de los datos de entrenamiento [11].

2.5.2 Modelos térmicos.

Los modelos térmicos analizan la generación y disipación de calor. La generación de calor se divide en calor irreversible (debido al efecto Joule y la resistencia interna) y calor reversible (debido a cambios entrópicos en las reacciones químicas) [21].

Los modelos nodales dividen la batería en nodos térmicos (similares a circuitos eléctricos) para calcular la distribución de temperatura de forma eficiente.

También existen los modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) que ofrecen un análisis detallado del flujo de refrigerante y la temperatura, pero con un coste computacional muy elevado. Se usa para simular el flujo de calor y fluidos dentro de los paquetes de baterías [22].

2.5.3 Modelos electrotérmicos.

Representan el enfoque más completo al considerar la interacción bidireccional entre los estados eléctricos y térmicos. En estos modelos, los parámetros eléctricos (como la resistencia interna y el voltaje de circuito abierto) se actualizan en función de la temperatura calculada por el submodelo térmico [21]. A su vez, el calor generado que alimenta al modelo térmico se calcula a partir de las variables del submodelo eléctrico. Este acoplamiento es fundamental para simulaciones precisas en condiciones de alta potencia o ciclos de conducción reales.

Mientras que los modelos eléctricos de circuito equivalente son preferidos por su simplicidad y facilidad de implementación en sistemas integrados, los modelos electrotérmicos son necesarios cuando se busca una predicción robusta bajo cargas variables donde el calor afecta significativamente al rendimiento.

La Figura 2-5 ilustra el funcionamiento general de un modelo electrotérmico aplicado a baterías, mostrando la interacción entre el modelo eléctrico y el modelo térmico. En primer lugar, las variables eléctricas de entrada, como la intensidad, el voltaje y la temperatura, se procesan en el modelo eléctrico, que puede basarse en circuitos equivalentes o en modelos físicos del comportamiento electroquímico de la batería. A partir de este modelo se estiman parámetros como el estado de carga (SOC) y el estado de salud (SOH), así como las pérdidas internas que dan lugar a generación de calor. Este calor generado se introduce en el modelo térmico, que describe los procesos de transferencia de calor dentro de la celda mediante diferentes enfoques, como modelos electroquímicos, mediciones de impedancia o técnicas de dinámica de fluidos computacional. De este modo, el modelo térmico calcula la evolución de la temperatura y retroalimenta al modelo eléctrico, estableciendo un acoplamiento bidireccional que permite representar de forma más realista el comportamiento de la batería bajo diferentes condiciones de operación.

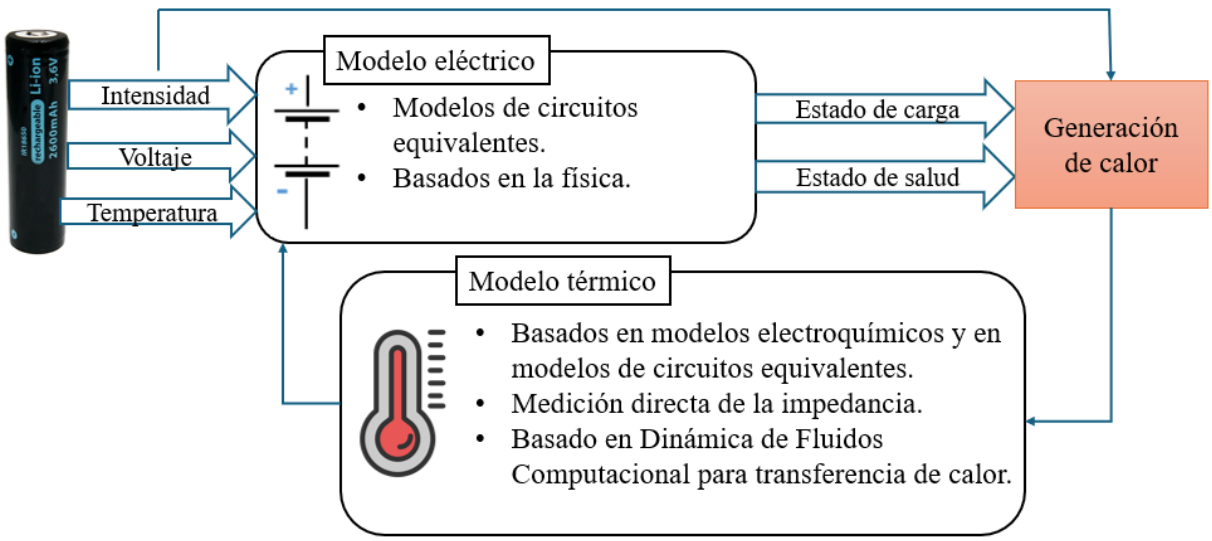


Figura 2-5 Modelo electrotérmico [Fuente: creación propia].

2.6 Generación de calor en baterías.

El calor generado en una celda será el resultado de ciertos procesos físicos y químicos que ocurren durante el proceso electroquímico. Esa generación de calor se puede calcular mediante un balance de energía basado en la primera ley de la termodinámica para sistemas isobáricos [23].

2.6.1 Fuentes de calor internas.

Se identifican cuatro categorías principales de fuentes de calor internas [23]:

1) **Reacciones electroquímicas**: estas incluyen los efectos reversibles e irreversibles. El calor irreversible siempre será positivo por lo que siempre generará calor mientras que el reversible se relaciona con el cambio de entropía de la reacción y puede absorber o generar calor dependiendo de la dirección del flujo de corriente.
2) **Efecto Joule**: también llamado calentamiento óhmico, se produce por la resistencia al paso de la corriente eléctrica.
3) **Entalpia de mezcla o calor de mezcla** representa el calor asociado con la relajación o generación de los gradientes de concentración dentro de la celda. Así se explica por qué la temperatura de una batería puede seguir cambiando incluso después de interrumpir el paso de corriente, mientras el sistema se encuentra buscando un equilibrio térmico y químico.
4) **Cambios de fase**, es decir, el calor liberado o absorbido durante los cambios de fase.

2.6.2 Acoplamiento electrotérmico.

El modelo electrotérmico de una batería se basa en el acoplamiento entre el comportamiento térmico y eléctrico de esta, donde las pérdidas eléctricas generan un calor que eleva la temperatura de la celda y esa temperatura modifica a la misma vez los parámetros eléctricos, es decir, el comportamiento eléctrico de una batería depende de la temperatura y viceversa [22].

Algunos parámetros fisicoquímicos como el coeficiente de difusión, la conductividad iónica o la densidad de corriente son funciones de la temperatura y suelen seguir la ecuación de Arrhenius que explica por qué la temperatura modifica esos parámetros eléctricos y el envejecimiento de la batería [14].

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \qquad \textit{Ecuación 3}$$

Donde k_2 y k_1 son la velocidad de un proceso dependiente de la temperatura, pueden ser la velocidad de envejecimiento o la velocidad de una reacción electroquímica. Si $k_2 > k_1$ el proceso es más rápido a T_2. E_a es la energía de activación, es decir, la energía mínima necesaria para que ocurra el proceso. R es la constante de los gases. T_1 y T_2 son temperaturas absolutas a las que se evalúa el proceso.

Con esta ecuación podemos cuantificar la variación de la velocidad de los procesos electroquímicos y de degradación de la batería entre dos temperaturas, relacionando el incremento térmico con una aceleración exponencial de dichos procesos [13].

Por todo ello la consideración del factor temperatura en sistemas de baterías es esencial ya que si no se controla la batería pierde rendimiento, sus componentes se degradan a una velocidad que no es la normal y, si en algún caso extremo se produce sobrecalentamiento el fallo del sistema podría llegar a ser irreversible.

2.7 Estrategias para la gestión térmica de una batería.

La gestión térmica en baterías se centra en controlar la temperatura del sistema para asegurar un funcionamiento seguro y eficiente en aplicaciones reales. Desde un punto de vista físico, consiste en regular la temperatura mediante mecanismos de transferencia de calor, con el objetivo de mantenerla dentro de un rango óptimo y reducir las diferencias térmicas entre celdas y módulos.

La disipación del calor generado en las baterías se produce mediante procesos de conducción, convección y radiación. Cuando este calor no se evacúa adecuadamente, la temperatura puede aumentar, provocando una reducción del rendimiento, una aceleración de la degradación o un mayor riesgo de fallo del sistema. Por ello, la gestión térmica se basa en la correcta utilización de estos mecanismos de transferencia de calor junto con estrategias adecuadas de refrigeración.

Desde el punto de vista de su funcionamiento, los sistemas de gestión térmica pueden clasificarse en activos y en pasivos [24].

2.7.1 Sistemas pasivos

Los sistemas de gestión térmica pasivos son aquellos dispositivos capaces de regular el calor de las celdas sin la necesidad de utilizar componentes auxiliares que consuman energía. Su funcionamiento se apoya exclusivamente en las cualidades físicas de los materiales empleados y en procesos naturales para evitar que la batería se degrade rápidamente por trabajar fuera de su rango ideal, que suele estar entre los 15 ºC y 35 ºC [3].

1) Convección natural

Es el método más elemental y económico para controlar la temperatura de un conjunto de baterías.

En este mecanismo el movimiento del aire ocurre de forma espontánea debido a las variaciones de densidad que provoca el calor generado por las celdas [21]. Se caracteriza por ser una solución muy ligera, con una estructura técnica sencilla y que prácticamente no requiere labores de mantenimiento.

Su efectividad es muy limitada en algunas aplicaciones ya que el aire tiene una conductividad térmica y capacidad calorífica muy bajas, no pudiendo enfriar la batería rápidamente o tener una temperatura equilibrada y constante [25].

2) Materiales de cambio de fase (PCM)

Estos materiales gestionan la energía térmica aprovechando el calor latente que se produce durante su cambio de estado, normalmente de sólido a líquido.

El proceso que siguen es que cuando las celdas se calientan, el material absorbe ese calor para fundirse, manteniendo una temperatura casi constante durante todo el proceso de fusión. Los materiales que más se suelen usar para este proceso son las parafinas, las sales hidratadas o los ácidos grasos, cuyos puntos de fusión se sitúan entre los 30 ºC y 50 ºC [26].

Un punto negativo de este método es que allí donde se implemente incrementa el peso de la plataforma y una vez que el material ha cambiado de fase totalmente, su capacidad para retener calor es bastante limitada.

3) Tubos de calor

Son unos conductos herméticos al vacío que contienen un fluido en su interior y trabajan en ciclos de evaporación y condensación.

El sistema consta de tres partes: el evaporador que está en contacto con la zona caliente, la sección por la que viaja el vapor y un condensador que la función que tiene es la de liberar calor al ambiente. Una de las ventajas que presentan los tubos de calor frente a otros mecanismos es que poseen una alta conductividad térmica además de ofrecer diferentes posibilidades de diseño geométrico [26].

2.7.2 Sistemas activos.

Son aquellos que requieren de dispositivos mecánicos que consumen energía para forzar la circulación de un fluido que lleve el calor al exterior de las celdas. Los sistemas activos son los que más se usan en la práctica dada su capacidad para manejar altas demandas térmicas.

1) **Enfriamiento por aire forzado**.

Usa ventiladores que impulsan la corriente de aire a través de la estructura de la batería. El sistema es sencillo, ligero con un coste relativamente bajo[26].

La desventaja que tiene es que la capacidad para absorber calor es muy inferior a la de los líquidos, por lo que hay que mover mucha cantidad de aire incrementando así el gasto energético. Por otro lado, la capacidad de este mecanismo para mantener una temperatura uniforme a lo largo de todas las celdas de la batería es bastante baja.

2) **Refrigeración líquida**.

Es el sistema más popularizado ya que los líquidos refrigerantes poseen una alta capacidad calorífica y conductividad térmica muy superiores a los del aire. Se pueden dar en sistemas directos o indirectos:

- Sistemas indirectos: el refrigerante fluye por el interior de tuberías o placas frías que envuelven las celdas sin tocarlas directamente [26].
- Sistemas directos: las celdas se sumergen en un fluido dieléctrico. Este sistema es mucho más eficiente que el indirecto ya que elimina resistencias térmicas. Una desventaja de los sistemas directos es que aún se está realizando investigación a la hora de la compatibilidad entre fluidos [26].

2.8 Problemas asociados de una inadecuada gestión térmicañ en las baterías de ion-litio

Como se ha mencionado anteriormente, la temperatura es uno de los factores que más condiciona el funcionamiento de las baterías de ion-litio. Una gestión térmica inadecuada, tanto por exceso como por defecto de temperatura, puede provocar distintos problemas que afectan al rendimiento, la vida útil y la seguridad del sistema.

Tres de los principales problemas que se pueden encontrar en una mala gestión térmica son el envejecimiento prematuro, la pérdida de rendimiento y la fuga térmica a parte de otros problemas asociados a su gestión a bajas temperaturas.

2.8.1 Envejecimiento prematuro de la batería.

En la degradación prematura de una batería, el calor juega un papel esencial. Se ha observado que las baterías que operan fuera de su rango óptimo, sufren un deterioro irreversible que ya no puede compensarse en su proceso de carga [27].

Se produce un aumento de la resistencia ya que una temperatura elevada hace que se incremente la resistividad de los materiales traduciéndose en una pérdida de eficiencia energética. Por otro lado, se reduce su vida útil, pues un sobrecalentamiento constante provoca una reducción de la vida útil y por ende a la de su autonomía por carga.

2.8.2 Riesgos a bajas temperaturas.

También hay que tener presente el comportamiento de las baterías a bajas temperaturas ya que a temperaturas inferiores a 0 ºC, las reacciones químicas internas se desaceleran reduciéndose enormemente la capacidad de generar potencia. Por otra parte, si se intenta cargar una celda a temperaturas extremadamente bajas, el litio puede solidificarse o cristalizarse en el ánodo en lugar de intercalarse. Esa deposición en forma metálica puede perforar el separador y provocar un cortocircuito interno [27].

2.8.3 Fuga térmica.

La fuga térmica es uno de los fenómenos de seguridad más críticos en las baterías de ion-litio. Se produce cuando el calor generado en el interior de la celda supera la capacidad del sistema para disiparlo,

dando lugar a un aumento rápido e incontrolado de la temperatura. Este proceso suele iniciarse bajo condiciones de abuso térmico, eléctrico o mecánico y se caracteriza por una secuencia de reacciones exotérmicas que provocan la descomposición progresiva de distintos componentes internos de la batería, como la capa de interfase sólido-electrolito (Figura 2-7), el electrolito y los materiales de los electrodos. Estas reacciones liberan grandes cantidades de calor y gases inflamables, lo que puede generar un incremento de presión en el interior de la celda y derivar, en casos extremos, en incendios o explosiones [28].

En muchos casos, el fenómeno se ve favorecido por la aparición de cortocircuitos internos, que incrementan la generación de calor y aceleran las reacciones de descomposición, creando un ciclo de retroalimentación entre aumento de temperatura y liberación de energía. Como consecuencia, la temperatura de la celda puede escalar rápidamente hasta alcanzar valores peligrosos, comprometiendo la integridad del sistema. Debido a esta dinámica auto acelerada y a las posibles consecuencias para la seguridad, la fuga térmica representa uno de los principales riesgos asociados al uso de baterías de ion-litio, especialmente en aplicaciones de alta densidad energética, lo que pone de manifiesto la importancia de una adecuada gestión térmica del sistema [29, 30].

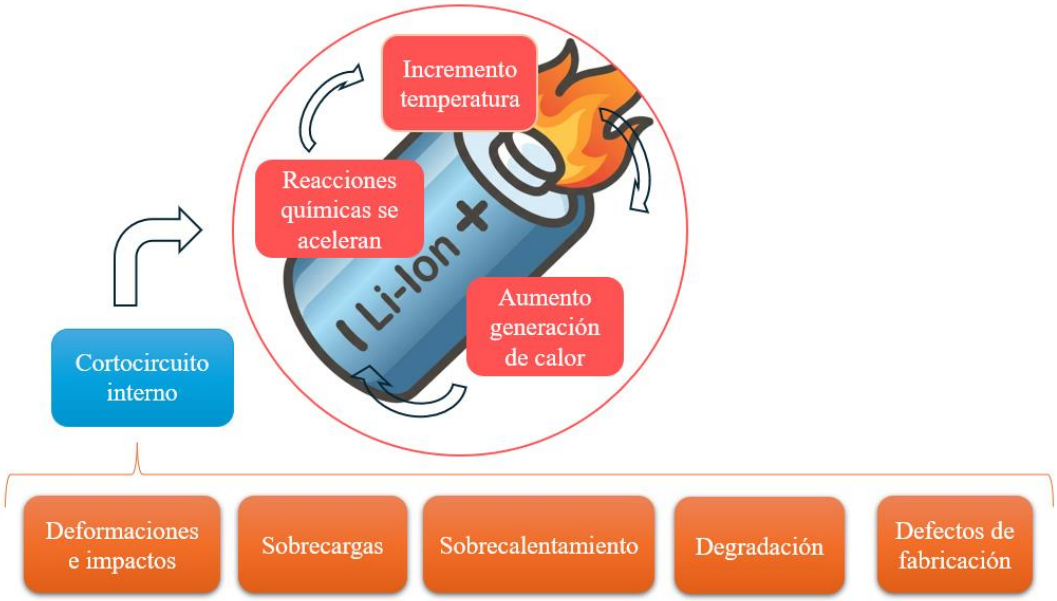


Figura 2-6. Bucle explicativo de fuga térmica [Fuente: creación propia]

La Figura 2-6 muestra el mecanismo que conduce a la fuga térmica en una batería de ion-litio. Diferentes factores como abusos mecánicos, eléctricos o térmicos, así como la degradación o defectos de fabricación, pueden provocar un cortocircuito interno en la celda. Este evento incrementa la generación de calor dentro de la batería, lo que provoca un aumento de la temperatura. A medida que la temperatura se eleva, las reacciones químicas internas se aceleran, liberando aún más calor. Cuando se supera una temperatura crítica de inicio, se establece un ciclo de retroalimentación positiva entre temperatura y generación de calor que produce un aumento rápido e incontrolado de la temperatura, pudiendo desembocar en incendios o explosiones.

2.9 Factores que afectan al rendimiento de una batería

El rendimiento de una batería de ion-litio no es un parámetro fijo, sino el resultado de la interacción de distintos factores físicos, electroquímicos y operativos que influyen tanto en su comportamiento inmediato como en su evolución a lo largo de la vida útil. Diversos estudios coinciden en que variables como la temperatura de operación, las condiciones de carga y descarga, el rango de estado de carga

(SOC) utilizado o los mecanismos internos de degradación determinan directamente la capacidad disponible, la potencia entregable y el estado de salud de la batería.

2.9.1 Influencia de la temperatura de operación

La temperatura es uno de los factores más determinantes en el rendimiento y la degradación de las baterías de ion-litio. Diversos estudios muestran que tanto temperaturas elevadas como temperaturas excesivamente bajas provocan una reducción del rendimiento.

A temperaturas altas, se acelera la cinética de las reacciones electroquímicas internas, lo que inicialmente puede traducirse en una menor resistencia interna y una mayor capacidad utilizable, sin embargo, este efecto positivo es temporal, ya que el aumento de temperatura favorece reacciones parasitarias no deseadas, como el crecimiento acelerado de la capa de interfase sólido-electrolito (SEI) y la degradación del electrolito, lo que conduce a una pérdida progresiva de capacidad y a un incremento irreversible de la impedancia interna [30].

Por el contrario, a bajas temperaturas, la movilidad iónica del electrolito se reduce de forma significativa, aumentando la resistencia interna de la batería y limitando la potencia disponible. Además, en condiciones de carga a baja temperatura, puede producirse deposición metálica de litio sobre el ánodo (proceso conocido como *plating*), fenómeno especialmente perjudicial para la vida útil y la seguridad de la celda [31,32].

2.9.2 Condiciones de carga y descarga

Las condiciones bajo las cuales se realizan los procesos de carga y descarga influyen de manera discreta en el rendimiento instantáneo de la batería y en su degradación a largo plazo. En particular, la tasa de carga o descarga de la batería, definida como la corriente aplicada en relación con su capacidad nominal (*C-rate)*, es un parámetro clave [32].

Corrientes elevadas permiten reducir los tiempos de carga y descarga, pero incrementan las pérdidas por efecto Joule y generar gradientes de concentración de litio en los electrodos. Estos gradientes provocan un uso no homogéneo del material activo, lo que favorece procesos de degradación localizados y acelera la pérdida de capacidad. Además, durante la carga rápida, el riesgo de *plating* de litio aumenta considerablemente, especialmente si se combina con temperaturas bajas o SOC elevados [32].

Diversas fuentes muestran que métodos de carga más conservadores, basados en estrategias de corriente constante seguida de tensión constante (CC-CV), el cual usaremos para los ciclos de carga y descarga de la batería, reducen el estrés electroquímico de la celda y permiten preservar el rendimiento durante un mayor número de ciclos, aunque a costa de mayores tiempos de carga. [32, 33]

2.9.3 Profundidad de descarga (DoD) y rango de SOC

El rango de SOC en el que opera una batería y la DoD asociada a cada ciclo tienen una influencia directa en su rendimiento y vida útil. Operar la batería entre valores extremos del SOC, especialmente cercanos al 0% o al 100%, incrementa el estrés electroquímico sobre los electrodos.

Diversas fuentes consultadas demuestran que ciclos profundos, que abarcan un amplio rango de SOC, provocan una degradación más rápida que ciclos parciales realizados en rangos intermedios. Esto se debe a que, en estados de carga elevados, el cátodo se encuentra sometido a mayores tensiones electroquímicas, mientras que en estados de carga bajos se intensifican ciertos mecanismos de degradación del ánodo. [35, 36]

2.9.4 Envejecimiento por ciclado y envejecimiento por calendario

El envejecimiento de las baterías de ion-litio puede clasificarse en dos grandes categorías: envejecimiento por ciclado y envejecimiento por calendario.

El envejecimiento por ciclado está asociado al uso activo de la batería y depende principalmente del número de ciclos, la profundidad de descarga, la corriente aplicada y la temperatura de operación. Este

tipo de envejecimiento se manifiesta principalmente como pérdida de capacidad y aumento progresivo de la resistencia interna [36].

Por otro lado, el envejecimiento por calendario se produce incluso cuando la batería no está en uso, y está fuertemente influenciado por el tiempo, la temperatura y el nivel de SOC durante el almacenamiento. En este caso, la degradación está relacionada con reacciones químicas lentas pero continuas, como el crecimiento de la SEI y la degradación del electrolito [37].

Ambos mecanismos de envejecimiento coexisten y se superponen, siendo necesario considerar ambos para evaluar correctamente el rendimiento a largo plazo de una batería.

2.9.5 Mecanismos internos de degradación electroquímica

A nivel microscópico, el deterioro del rendimiento de las baterías de ion-litio está relacionado por una serie de mecanismos internos de degradación electroquímica. Entre los más relevantes destacan el crecimiento de la capa SEI, la pérdida de inventario de litio y la degradación estructural de los materiales activos [5, 37].

La capa SEI, necesaria para el funcionamiento estable del ánodo, crece progresivamente con el uso y el tiempo, consumiendo litio activo y aumentando la resistencia interna. De la misma manera, fenómenos como el *plating* de litio o la fractura de partículas del material activo reducen la cantidad de material electroquímicamente disponible, lo que se traduce en una pérdida irreversible de capacidad [37,39].

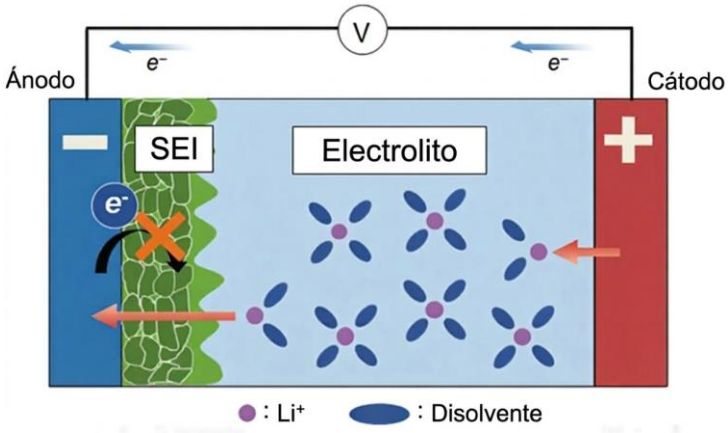


Figura 2-7. Capa SEI [39]

La Figura 2-7 muestra un esquema simplificado del funcionamiento de una batería de ion-litio durante el proceso de descarga, destacando la presencia y el papel de la interfase sólido-electrolito (SEI) en el ánodo [38]. En el circuito externo los electrones generados en el ánodo circulan hacia el cátodo a través del conductor, produciendo la diferencia de potencial eléctrica. Paralelamente, en el interior de la celda, los iones de litio se mueven a través del electrolito desde ánodo hacia el cátodo, cerrando el balance de carga del sistema.

El elemento más relevante representado es la capa SEI, situada entre el ánodo y el electrolito. Esta película se forma durante los primeros ciclos debido a la reducción parcial del electrolito cuando el potencial del ánodo es suficientemente bajo [5]. Su principal característica es que actúa como barrera electrónica, impidiendo el paso de electrones hacia el electrolito, pero permite la conducción iónica del litio. Esta propiedad selectiva es esencial para estabilizar la interfase electroquímica y evitar la descomposición continua del electrolito.

Aunque la capa SEI es necesaria para el funcionamiento reversible de la batería, su crecimiento progresivo con el uso conlleva efectos negativos. El aumento de su espesor implica un incremento de la resistencia interna y el consumo irreversible de litio activo, lo que contribuye a la pérdida de capacidad

y al deterioro del rendimiento a largo plazo [37, 38]. Por ello, la evolución de esta capa constituye uno de los principales mecanismos asociados al envejecimiento de las baterías de ion-litio.

2.9.6 Incremento de la resistencia interna y pérdida de potencia

El incremento de la resistencia interna constituye uno de los efectos más representativos del envejecimiento de las baterías de ion-litio y tienen un impacto directo sobre su rendimiento, especialmente en aplicaciones donde se demandan elevados niveles de potencia [28, 36]. A diferencia de la pérdida de capacidad, que afecta principalmente a la energía total almacenada, el aumento de la resistencia interna limita la capacidad de la batería para entregar o absorber corriente de forma eficiente.

Desde un punto de vista físico, la resistencia interna agrupa la contribución de múltiples procesos internos, como la resistencia óhmica de los colectores y contactos, la resistencia asociada al transporte iónico en el electrolito, la resistencia de transferencia de carga de los electrodos y los fenómenos difusivos [5]. A medida que la batería envejece, estos términos aumentan progresivamente como consecuencia del crecimiento de la capa SEI, la degradación del electrolito y la pérdida de contacto eléctrico entre las partículas del material activo [36].

Diversos estudios experimentales muestran que el incremento relativo de la resistencia interna puede ser comparable, e incluso superior, al porcentaje de pérdida de capacidad a lo largo de la vida útil. En ensayos de ciclado prolongado realizados en condiciones controladas de temperatura, se observa que, tras varios cientos de ciclos, la resistencia interna puede incrementarse del orden de un 20% a un 60%, dependiendo del estado de carga en el que se realice la medición y del historial de uso de la batería [36], [37]. Este aumento no es uniforme en todo el rango de SOC, siendo más acusado en estados de carga bajos, donde los procesos difusivos y de transferencia de carga adquieren mayor importancia.

El efecto más inmediato del aumento de la resistencia interna es la reducción de la potencia útil disponible [5]. Para una corriente determinada, una resistencia interna mayor provoca una caída de tensión más pronunciada, lo que puede hacer que se alcancen prematuramente los límites de tensión impuestos por el sistema de gestión de la batería. Como consecuencia, la batería puede verse obligada a operar con corrientes menores, reduciendo su capacidad para satisfacer demanda de potencias elevadas.

Además, el incremento de la resistencia interna implica un aumento de las pérdidas energéticas por efecto Joule, lo que se traduce en una mayor generación de calor durante los procesos de carga y descarga. Aunque en muchos casos el aumento absoluto de temperatura no es elevado, la mayor disipación térmica por unidad de energía entregada acelera indirectamente otros mecanismos de degradación, cerrando un ciclo de retroalimentación negativa entre envejecimiento térmico y envejecimiento eléctrico [24].

2.9.7 Influencia del diseño y la química de la celda

El rendimiento real de una batería no solo depende del sistema electroquímico empleado, sino también del diseño constructivo de la celda y de su integración dentro del conjunto de la batería. Las características geométricas y estructurales influyen directamente en parámetros como la capacidad efectiva, la resistencia interna y el comportamiento térmico [5].

En relación con el diseño interno, la configuración de los electrodos determina el compromiso entre energía y potencia. Celdas orientadas a maximizar la capacidad incorporan una mayor cantidad de material activo, mientras que aquellas destinadas a aplicaciones de alta potencia priorizan una mayor superficie de reacción y una menor resistencia interna, aun a costa de reducir la capacidad total [5]. Esta diferencia se observa, por ejemplo, entre diseños tipo bobina compacta (*bobbin)* (Figura 2-8), que optimizan el volumen ocupado por material activo, y diseños espiralados (Figura 2-8), que incrementan el área electroquímica disponible para mejorar el comportamiento a altas intensidades [5].



Figura 2-8. Diseños de celda: celda azul tipo *bobbin*, celda negra diseño espiralado. [Fuente: imagen creada con Google Gemini]

Además, el tamaño y la geometría influyen en la densidad de corriente y en la disipación térmica. Una misma intensidad aplicada a una celda pequeña genera una mayor densidad de corriente que en una celda de mayor tamaño, provocando mayores caídas de tensión y un comportamiento más exigente durante la descarga [5]. Este aspecto se relaciona directamente con el aumento de la resistencia interna y la generación de calor, fenómenos que han sido identificados como indicadores relevantes del deterioro del estado de salud en estudios experimentales basados en caracterización eléctrica [31].

Cuando se analizan baterías multi celda, el diseño del paquete cobra aún mayor importancia. El rendimiento de un conjunto puede diferir significativamente del de una celda individual debido a desequilibrios entre celdas, conexiones serie/paralelo, materiales de encapsulado y condiciones térmicas internas. Además, la incorporación de sistemas de protección, estructuras mecánicas y elementos electrónicos incrementa el peso y volumen totales, reduciendo la energía específica respecto a la de la celda aislada [5].

Desde el punto de vista químico, la elección de los materiales de ánodo y cátodo condiciona la estabilidad frente a fenómenos de degradación. Diferentes químicas presentan distinta sensibilidad al aumento de temperatura, al crecimiento de la capa SEI o al incremento de impedancia con el ciclado, lo que afecta de manera directa al rendimiento a largo plazo [31, 35]. Por tanto, la química determina el potencial y la capacidad teórica, mientras que el diseño físico de la celda y del conjunto de la batería define cómo esas prestaciones se traducen en comportamiento eléctrico real.

La interacción entre la química y el diseño constructivo establece el compromiso fundamental entre energía, potencia, estabilidad térmica y vida útil, siendo un aspecto clave importante en la optimización del rendimiento de baterías.

2.10 Métodos de carga y descarga en sistemas de almacenamiento de energía

La gestión de los procesos de carga y descarga desempeña un papel clave en la operatividad y la longevidad de las baterías modernas. Una selección inadecuada de la técnica de carga no solo compromete la eficiencia del sistema, sino que puede derivar en daños estructurales irreversibles debido al incremento de la resistencia interna y la temperatura de las celdas [5, 25].

En el ámbito técnico, se distinguen diversos métodos de carga cuya aplicación depende de la química de la batería y los requisitos de la aplicación:

- **Carga de voltaje constante (CV)**. Este método emplea una fuente de tensión fija. Se caracteriza por una estructura de control simplificada [5]. Durante el proceso, la corriente disminuye progresivamente a medida que la batería alcanza su estado de carga plena. No obstante, presenta el riesgo de corrientes iniciales excesivamente elevadas que pueden degradar las celdas de la batería.

- **Carga de corriente constante (CC)**. A diferencia del método CV, aquí se suministra una corriente uniforme hasta que la batería llega a su capacidad máxima. Es una técnica significativamente más rápida, pero requiere sistemas de monitorización procesos para conmutar a un modo de mantenimiento y evitar la sobrecarga, lo que podría acortar la vida útil del dispositivo [5, 25].

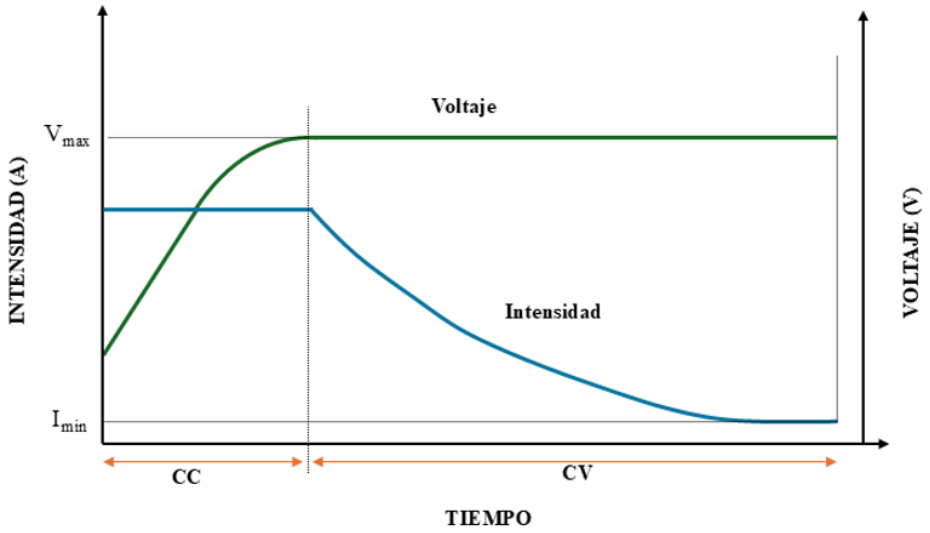


Figura 2-9. Carga CC-CV [Fuente: creación propia].

La Figura 2-9 muestra el método CC-CV, el más utilizado en la carga de baterías de ion-litio, que se divide en dos etapas. En la primera fase, denominada corriente constante (CC), el cargador suministra una corriente fija mientras el voltaje de la batería aumenta progresivamente con el estado de carga. Esta etapa finaliza cuando la tensión alcanza el valor máximo permitido por la química de la celda y en ella se transfiere la mayor parte de la energía, aproximadamente entre el 60 y el 80% de la capacidad total, por lo que constituye la parte más rápida del proceso.

Una vez alcanzado el voltaje límite comienza la fase de voltaje constante (CV), en la que el cargador mantiene fija la tensión máxima y la corriente disminuye progresivamente debido al aumento de la resistencia interna y a la reducción del gradiente electroquímico conforme la batería se aproxima al 100% de carga. El proceso finaliza cuando la corriente alcanza un valor mínimo predefinido. Este método evita mantener una corriente constante por encima del voltaje máximo, lo que podría superar el límite seguro de la celda y provocar fenómenos como *plating*, degradación acelerada o riesgos térmicos. Por ello, la estrategia CC-CV permite equilibrar rapidez y seguridad durante la carga.

- **Carga de corriente cónica**. Utilizada sobre todo en baterías de plomo-ácido. Consiste en una reducción gradual de la corriente conforme aumenta la fuerza electromotriz inversa de la celda [38]. Al emplear fuentes no reguladas, conlleva riesgos de sobrecalentamiento y gasificación si no se supervisa estrictamente.

Para optimizar la eficiencia y tratar problemas específicos como la polarización o la autodescarga, se han desarrollado métodos más complejos:

- **Carga pulsada**. La carga pulsada utiliza periodos de descanso para permitir una difusión homogénea del electrolito, mejorando la conversión de energía química [18].
- **Carga lenta y flotante**. La carga lenta se aplica para compensar la autodescarga natural de la batería cuando no está en uso [5]. Es ideal para sistemas en modo espera, aunque se advierte que no es apta ni segura para químicas de iones de litio, como es el caso de este trabajo. La carga flotante mantiene el dispositivo en paralelo con el cargador y la carga, actuando como respaldo inmediato ante fallos de red.

- **Carga aleatoria**. Frecuentemente en aplicaciones de energías renovables y en vehículos híbrido con frenado de tipo regenerativo. En estos casos, la entrada de energía es incontrolada y depende de factores externos, lo que exige técnicas de limitación de voltaje para proteger la integridad de la batería [18, 25].

Las baterías de ion-litio requieren protocolos de carga específicos, generalmente basados en un sistema limitador de voltaje similar al de plomo-ácido, pero con tolerancias mucho más estrictas. Un aspecto crítico es que estas baterías no toleran la sobrecarga; alcanzar voltajes superiores a los especificados puede provocar inestabilidad térmica, producción de CO_2 y, en casos extremos, la combustión [5, 38].

A la vista de lo expuesto, los modelos electrotérmicos basados en circuitos equivalentes constituyen una solución adecuada para representar el comportamiento de baterías de ion-litio cuando se busca un equilibrio entre fidelidad física, coste computacional e integración en entornos de simulación y control. En este contexto, el presente trabajo se orienta al desarrollo y validación experimental de un modelo de estas características.

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

Para abordar la parte experimental de este trabajo, centrada en el estudio de los procesos de carga y descarga de baterías, es necesario describir previamente los equipos y elementos utilizados en la realización de los ensayos. La identificación y caracterización de estos componentes resulta fundamental para garantizar la repetibilidad de las pruebas y la fiabilidad de las medidas obtenidas durante el proceso experimental.

En este sentido, se presenta el banco de ensayos desarrollado, diseñado para llevar a cabo experimentos de carga y descarga sobre una batería de ion-litio bajo condiciones térmicas controladas. Este sistema experimental permite monitorizar las principales magnitudes eléctricas de la batería durante su funcionamiento, facilitando posteriormente el análisis de su comportamiento en diferentes condiciones de operación.

Una vez descrita la configuración del sistema experimental, se procederá a la realización de los ensayos de carga y descarga a distintas temperaturas preestablecidas, cuyo procedimiento y condiciones de ejecución se detallan en los capítulos siguientes.

3.2 Elementos para el ensayo

En este apartado se describen los elementos y equipos empleados para la realización de los ensayos experimentales. Se presentarán las características de la batería objeto de estudio, así como las especificaciones técnicas del cargador/descargador necesario para llevar a cabo los ensayos a diferentes temperaturas.

Para garantizar que los ensayos se desarrollen en condiciones controladas, se ha implementado un sistema de regulación de temperatura en el interior de una cámara isoterma. Dicho sistema emplea una manta térmica como elemento actuador y permite mantener la temperatura del entorno de la batería en valores preestablecidos durante los procesos de carga y descarga.

La temperatura en el interior de la cámara se mide mediante una sonda RTD conectada a un conversor MAX31865 [40], cuya señal es procesada en tiempo real por un microcontrolador Arduino. A partir de esta medida se implementa un controlador PID (Proporcional–Integral–Derivativo), encargado de regular la potencia suministrada a la manta térmica. Para ello, el controlador ajusta de forma continua una señal PWM aplicada a un módulo MOSFET, en función del error existente entre la temperatura medida y la temperatura de consigna.

La señal PWM (Modulación por ancho de pulso) usada en el módulo MOSFET de potencia consiste en una señal digital periódica en la que se varía la relación entre el tiempo en estado activo y el tiempo

total del periodo, es decir, el ciclo de trabajo lo que permite controlar la potencia media suministrada a la carga sin necesidad de modificar la tensión de alimentación.

El controlador PID es un algoritmo de control en lazo cerrado, es decir, una estrategia de control ampliamente utilizada en sistemas dinámicos para regular una variable en torno un valor de referencia. Este controlador proporcional-integral-derivativo combina tres acciones de control: una acción proporcional, que corrige el error de forma inmediata; una acción integral, que compensa el error acumulado en régimen permanente; y una acción derivativa, que anticipa la evolución del sistema y contribuye a mejorar la estabilidad. La correcta sintonización de estos tres términos permite obtener una regulación precisa de la temperatura.

Los parámetros del controlador se han ajustado experimentalmente con el objetivo de minimizar el sobre impulso y asegurar una respuesta estable, teniendo en cuenta la elevada inercia térmica asociada al volumen de la cámara. El comportamiento del sistema se ha monitorizado mediante la herramienta Serial Plotter de Arduino, lo que ha permitido analizar la dinámica térmica del sistema y verificar el correcto funcionamiento del control implementado.

3.2.1 Batería de ion-litio de 2000 mAh.

Se trata de una batería recargable de ion-litio de la marca AMEWI® (Figura 3-1), configurado en dos celdas en serie. Incorpora un conector principal de potencia y un conector de equilibrado de 3 pines que permite una carga segura y controlada de las celdas. Su formato compacto facilita su integración en montajes experimentales y bancos de ensayo.



Figura 3-1. Batería AMEWI® Ion-litio [Fuente propia].

En la Tabla 3-1. Especificaciones técnicas de la batería se presentan las características de la batería empleada en los ensayos. Se trata de una batería de ion-litio de la marca AMEWI® configurada en dos celdas en serie (2S), lo que proporciona un voltaje nominal de 7,4 V y un voltaje máximo de carga de 8,4 V. Presenta una capacidad nominal de 2000 mAh, equivalente a una energía aproximada de 14,8 Wh, valores que determinan la cantidad de energía que puede intercambiar durante los ciclos experimentales.

Para los ensayos se ha considerado una corriente de carga recomendada de 1C (2 A), ya que este régimen permite realizar ciclos de carga y descarga representativos sin comprometer la estabilidad electroquímica ni la vida útil de la batería. Asimismo, la batería admite una corriente máxima de descarga continua cercana a 10 A, lo que garantiza que los ensayos realizados a 2 A se encuentran dentro de un rango de operación seguro. Estas características resultan especialmente relevantes para definir las condiciones de los ciclos de carga y descarga utilizados en la caracterización experimental.

Parámetro	Valor/descripción
Tipo de batería	Ion-litio
Marca	AMEWI®
Configuración	2 S
Voltaje nominal	7,4 V
Voltaje máximo de carga	8,4 V
Capacidad nominal	2000 mAh
Energía nominal	14,8 Wh
Corriente de carga recomendada	1C (2A)
Corriente máxima de descarga continua	≈10 A
Tecnología de celdas	Ion-litio cilíndricas

Tabla 3-1. Especificaciones técnicas de la batería

3.2.2 Cargador y descargador SkyRC T1000 Maestro

El equipo empleado para la realización de los ensayos experimentales es un cargador-descargador programable SkyRC T1000 Maestro como el de la Figura 3-2. Este dispositivo permite realizar procesos de carga y descarga a corriente y voltaje constantes, así como el registro de magnitudes eléctricas relevantes como voltaje, corriente, capacidad y energía intercambiada.

El cargador dispone de dos canales independientes, lo que facilita la realización de ensayos controlados en diferentes condiciones de operación. Mediante su interfaz con ordenador es posible monitorizar y almacenar los datos experimentales, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para la obtención de curvas Voltaje-Tiempo.



Figura 3-2. Cargador-descargador SkyRC T1000 Maestro [Fuente propia].

En la Tabla 3-2 se recogen las principales especificaciones técnicas del cargador-descargador empleado. El equipo es compatible con diferentes tecnologías de baterías, incluyendo ion-litio, litio polímero y litio ferrofosfato, y permite trabajar con configuraciones de entre 1 y 6 celdas en serie, rango que cubre la batería utilizada en los ensayos. Además, el dispositivo admite corrientes de carga y descarga de hasta 20 A, con una potencia máxima de carga de 450 W y una potencia de descarga de 30

W por canal, lo que proporciona un margen de operación amplio para los ensayos realizados. Estas características garantizan que el equipo pueda controlar de forma precisa los ciclos experimentales de carga y descarga utilizados en la caracterización de la batería.

Parámetro	Valor/descripción
Modelo	SkyRc T1000 Maestro
Tipo de equipo	Cargador y descargador programable
Canales	Dos canales independientes (A y B)
Tipos de baterías soportadas	Ion-litio, LiPo, LiFe, NiMH, NiCd, Pb
Numero de celdas Ion-litio	1S-6S
Corriente de carga máxima	Hasta 20 A (según canal y configuración)
Corriente de descarga máxima	Hasta 20 A
Potencia máxima de carga	Hasta 450W
Potencia máxima de descarga	Hasta 30W por canal
Modos de funcionamiento	Carga, Descarga, Balance de carga, Almacenamiento
Medidas registradas	Voltaje, Corriente, capacidad (mAh), energía (Wh), tiempo (min)

Tabla 3-2. Características técnicas cargador-descargador [41].

3.2.3 Banco de pruebas.

Para la realización de los ensayos de caracterización de la batería a diferentes temperaturas ha sido necesario disponer de un entorno térmico controlado que permita reproducir de forma estable las condiciones experimentales. Con este objetivo se ha diseñado, construido y desarrollado una cámara térmica controlada, que constituye el banco de pruebas empleado en este trabajo. Este sistema permite mantener la batería en un rango de temperatura determinado durante los procesos de carga y descarga, garantizando que las variaciones observadas en las curvas experimentales se deban principalmente a la influencia térmica y no a perturbaciones externas.

En este apartado se tratará de describir los principales elementos que componen el banco de pruebas, incluyendo la estructura de la cámara térmicamente controlada, el sistema de generación de calor, los sensores de temperatura y el sistema de control implementado para la regulación térmica.

3.2.3.1 Cámara térmica controlada

La cámara térmica controlada empleada (Figura 3-3) constituye el banco de pruebas experimental sobre el que se ha desarrollado y validado el sistema de control térmico. Desde el punto de vista constructivo, la estructura de la cámara se ha realizado mediante perfiles de aluminio, formando un bastidor rígido sobre el que se han fijado los distintos paneles aislantes cubiertos con placas de metacrilato. Se trata de un recinto cerrado con un volumen aproximado de 0,125 m^3, diseñado para permitir la realización de ensayos de control de temperatura en condiciones controladas, minimizando la influencia de perturbaciones externas y facilitando la instrumentación en su interior.

Para garantizar un comportamiento térmico lo más cercano posible a un entorno isotermo y reducir las pérdidas de calor hacia el exterior, los paneles aislantes se han fijado sobre la estructura de perfiles de aluminio previamente descrita, empleando poliestireno extruido (XPS), material seleccionado por su bajo coeficiente de conductividad térmica. Además, se aseguró la estanquidad del habitáculo sellando

las juntas y puntos críticos de unión con tiras de neopreno de alta densidad, lo que permite evitar puentes térmicos y mantener una atmósfera interior estable frente a gradientes de temperatura externos.

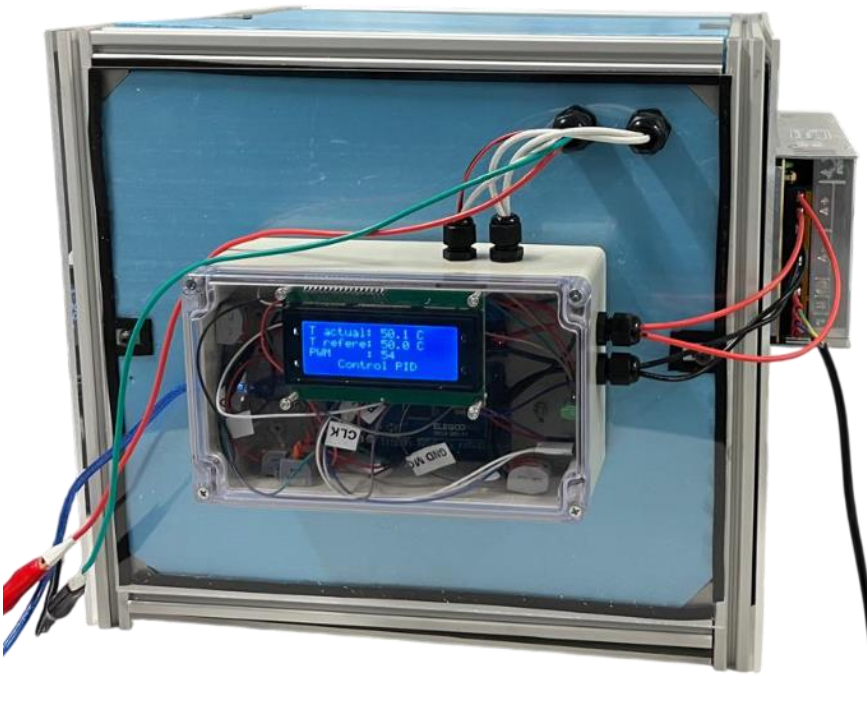


Figura 3-3. Exterior de la cámara térmicamente controlada para control de temperatura [Fuente propia]

El elemento calefactor empleado para la generación de calor en el interior de la cámara, mostrado en la Figura 3-4, es una manta térmica de potencia nominal de 300 W, alimentada mediante una fuente de tensión continua externa de 24 V. Este elemento actúa como el actuador del sistema térmico, siendo el encargado de aportar la energía necesaria para elevar la temperatura del aire contenido en el interior de la cámara hasta el valor de consigna establecido.

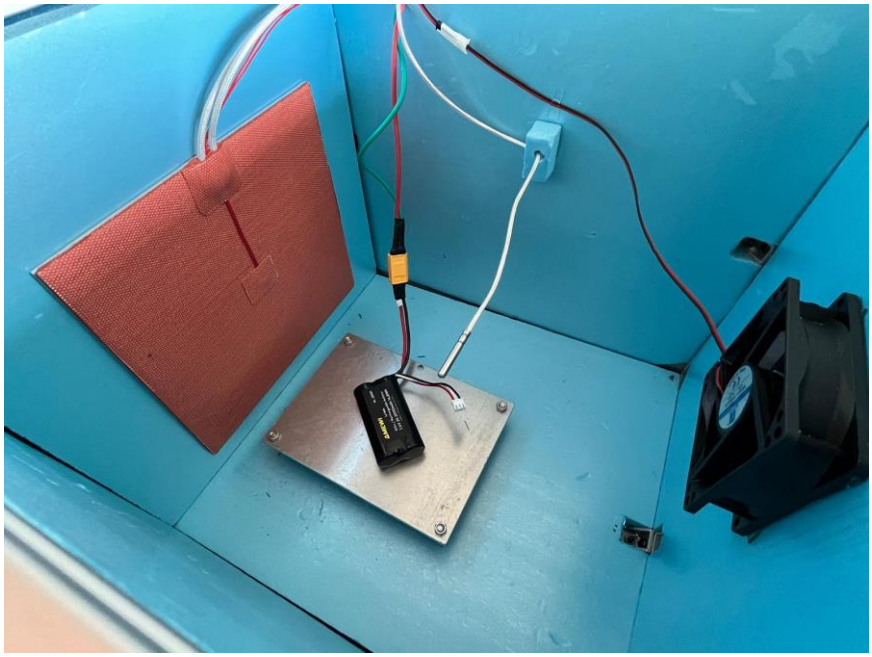


Figura 3-4. Interior de la cámara térmicamente controlada [Fuente propia]

Debido a la elevada potencia de la manta térmica, resulta necesario realizar un control preciso de la energía suministrada. Un aporte excesivo de calor podría provocar sobre impulsos térmicos, comprometiendo la estabilidad del sistema e incluso pudiendo afectar a los materiales de la estructura de la cámara, especialmente al poliestireno extruido (XPS) utilizado como aislante, que presenta limitaciones térmicas no muy altas. Por este motivo, la potencia aplicada al elemento calefactor debe regularse cuidadosamente para garantizar un funcionamiento seguro y estable del banco de pruebas.

En este contexto, se implementa un sistema de control basado en un regulador PID, que permite ajustar de forma continua la potencia suministrada en función del error entre la temperatura medida y la temperatura que se le pone como objetivo, evitando sobre impulsos y mejorando la estabilidad térmica del sistema.

Con el objetivo de mejorar la distribución del calor dentro del volumen de la cámara isoterma, se ha incorporado un ventilador de 12 V lo que permite favorecer la homogeneización de la temperatura en el interior del recinto.

3.2.3.2 Componentes electrónicos de la cámara isoterma

Para la implementación del sistema de control térmico se ha desarrollado un conjunto de componentes electrónicos integrados en una caja de control, donde se han dispuesto de forma ordenada todos los elementos necesarios para la gestión y regulación de la temperatura del sistema. Esta disposición permite centralizar el control del banco de pruebas, facilitando tanto la conexión entre los distintos dispositivos como el mantenimiento y la supervisión del sistema durante los ensayos experimentales.

El sistema electrónico está compuesto principalmente por un módulo de conmutación de potencia basado en MOSFET, encargado de regular la energía suministrada al elemento calefactor, un sensor de temperatura de tipo RTD con su convertidor MAX31865, responsables de la adquisición de la temperatura del sistema, y un microcontrolador Arduino, que actúa como unidad central de control ejecutando el algoritmo PID encargado de regular la temperatura.

A continuación, se describen más en detalle todos y cada uno de los componentes electrónicos utilizados para la construcción de la cámara isoterma y su posterior implementación:

1) Módulo MOSFET

La regulación de potencia aplicada a la manta térmica se realiza mediante un módulo mosfet (Figura 3-5) de potencia, que actúa como elemento de conmutación entre la fuente de alimentación y la carga térmica. El MOSFET es dirigido por una señal PWM generada por el microcontrolador Arduino, lo que permite controlar de forma indirecta la potencia media suministrada a la manta térmica. De este modo, se consigue una regulación continua de la energía aportada al sistema sin necesidad de modificar la tensión de alimentación.



Figura 3-5. MOSFET [Fuente propia].

2) Sonda de temperatura y conversor MAC31865

Para la gestión de temperaturas se han empleado sondas de tipo *Resistante Temperature Detector* (RTD), conectadas a un conversor digital MAX31865 (Figura 3-6), el cual permite la lectura precisa de la resistencia del sensor y su conversión a temperatura.

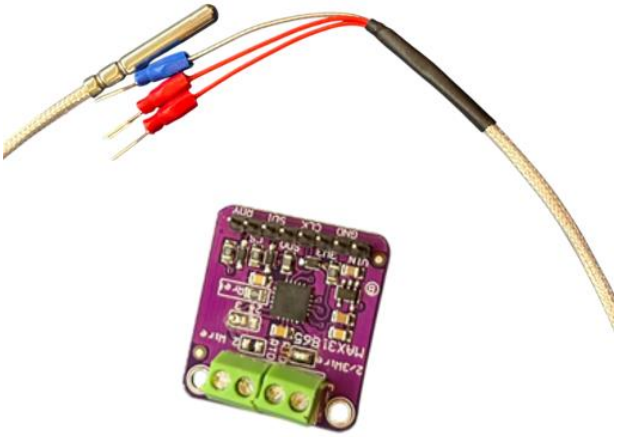


Figura 3-6. Conjunto MAX31865 y sonda PT100 [Fuente propia].

En este caso, la sonda utilizada es de tipo PT100 con configuración de tres hilos, lo que permite compensar parcialmente la resistencia de los conductores de conexión. Esta configuración mejora la precisión de la medida frente a soluciones de dos hilos, al reducir el error introducido por los cables, sin alcanzar la complejidad de una conexión de cuatro hilos.

3) Microcontrolador Arduino

El microcontrolador empleado es el Arduino ELEGOO MEGA 2560 R3 (Figura 3-7) que actúa como unidad central de control del sistema. En él se ejecuta el algoritmo de control PID, encargado de comparar la temperatura medida con la temperatura objetivo introducida por el usuario y de calcular la señal de control correspondiente. Esta señal se traduce en un valor PWM (0-255) que conduce el MOSFET, cerrando así el lazo de control térmico.



Figura 3-7. Microcontrolador Arduino empleado para el control [Fuente propia].

4) Módulo reductor de tensión

Para la alimentación del ventilador se ha empleado un módulo reductor DC-DC, como el de la Figura 3-8, basado en el regulador LM2596, capaz de convertir tensiones de entrada en el rango de 25 a 40 V a una salida ajustable entre 1,25 V y 37 V [42].



Figura 3-8. Módulo reductor de tensión [42].

En este caso, la tensión de entrada de 25 V procedente de la fuente de alimentación se ha reducido a 12 V, valor nominal del ventilador.

5) Pantalla de cristal líquido

Para la visualización de las variables del sistema se ha empleado una pantalla LCD 20x4 (Figura 3-9), capaz de mostrar hasta 20 caracteres en cada una de sus cuatro líneas. Este dispositivo permite representar en tiempo real magnitudes relevantes del proceso, como la temperatura medida, la temperatura de consigna y la señal de control aplicada (PWM).

La pantalla incorpora un módulo adaptador I2C basado en el controlador PCF8574, lo que permite reducir significativamente el número de pines necesarios para su conexión con el microcontrolador, utilizando únicamente dos líneas de comunicación (SDA y SCL), además de la alimentación. Este tipo de interfaz simplifica el cableado del sistema y facilita su integración en el conjunto electrónico.

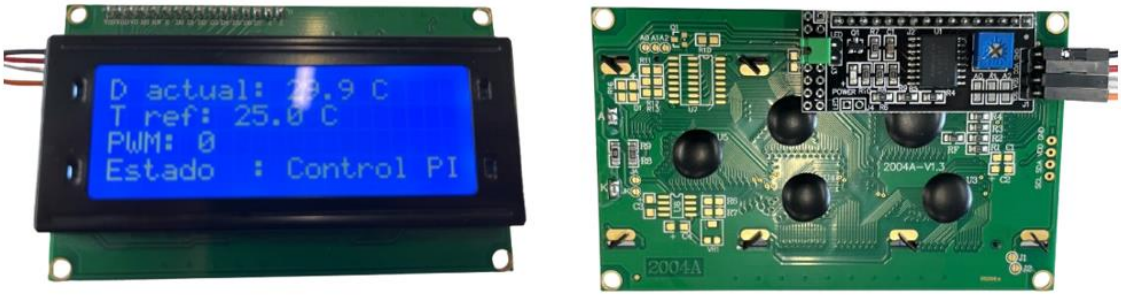


Figura 3-9. Parte delantera y trasera del LCD [Fuente propia]

Desde el punto de vista del montaje físico, todos los elementos eléctricos se han dispuesto externamente a la cámara, quedando únicamente la sonda de temperatura, la manta térmica y el ventilador de 12 V en el interior de esta. Esta disposición facilita el acceso a los componentes electrónicos, mejora la seguridad del sistema y permite realizar modificaciones y ajustes sin necesidad de intervenir en el interior de la cámara.

En conjunto, el montaje descrito constituye un banco de pruebas flexible y modular, adecuado para el estudio experimental del control PID aplicado a sistemas térmicos de elevada inercia. La configuración electrónica adoptada permite analizar el comportamiento dinámico del sistema, ajustar los parámetros del controlador y evaluar la respuesta a diferentes temperaturas.

3.2.3.3 Montaje de los componentes electrónicos para el control térmico

Una vez descritos los principales componentes del sistema de control, se presenta a continuación el esquema general (Figura 3-10) de conexión entre ellos, donde se muestra la arquitectura electrónica del sistema y las conexiones entre los distintos elementos que componen el control térmico.

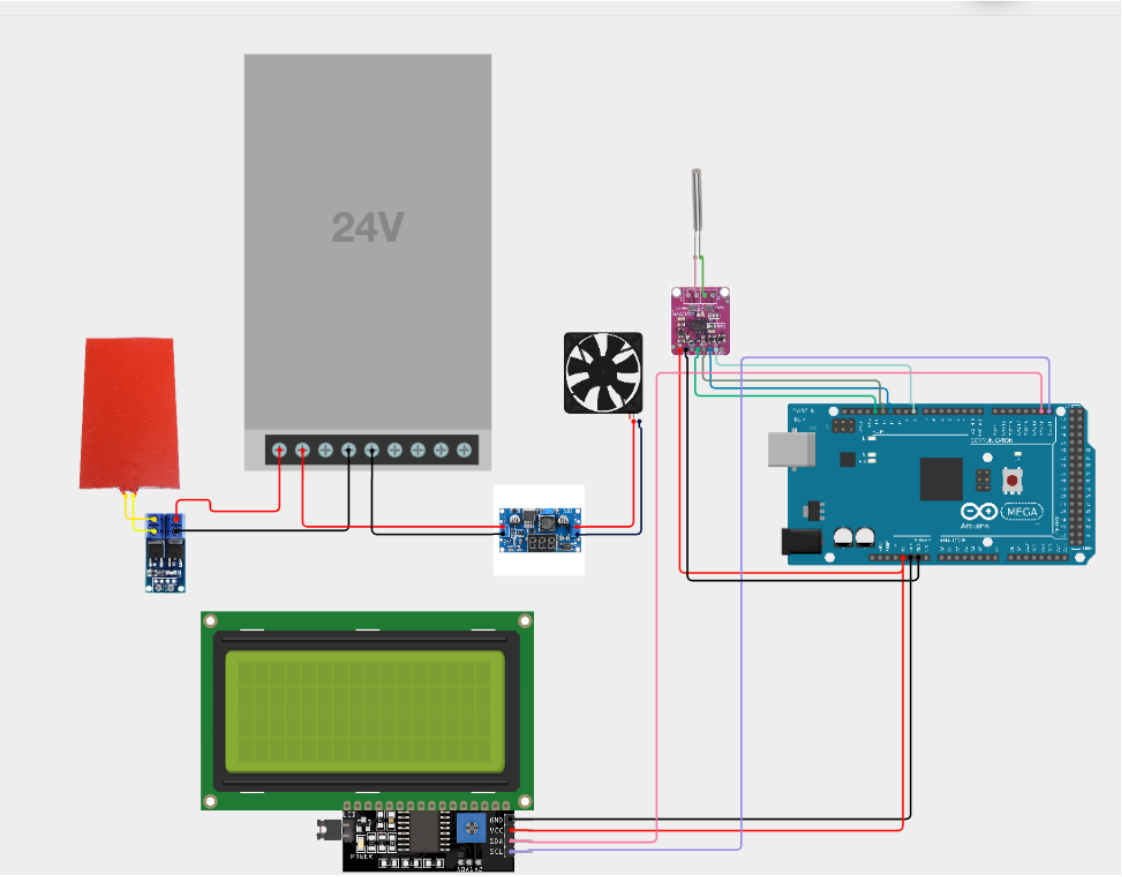


Figura 3-10. Diseño electrónico para el control PID de gestión de temperatura [Fuente: elaboración propia mediante Cirkit Designer IDE].

Para el control de todos estos elementos electrónicos se ha creado un sistema de gestión de temperatura, con Arduino IDE, en lazo cerrado mediante un algoritmo PID (Proporcional-Integral-Derivativo).

La función principal del control PID en el interior de la cámara térmica consiste en alcanzar y mantener una temperatura de referencia introducida por el usuario a través de una interfaz serie. Para ello, el código realiza un ciclo continuo de tres etapas: adquisición de datos, procesamiento y actuación. En la primera fase se obtiene la temperatura real mediante una sonda RTD conectada a un convertidor de precisión MAX31865; posteriormente, el algoritmo PID calcula el error (diferencia entre la temperatura actual y la deseada) y determina la potencia necesaria para corregirlo basándose en constantes de ajuste (K_p, K_i y K_d) optimizadas experimentalmente para la inercia térmica del sistema.

La respuesta del controlador se traduce en una señal de modulación por ancho de pulsos que regula la conmutación de un transistor MOSFET, el cual administra la energía suministrada al elemento calefactor.

Finalmente, el código incluye una rutina de transmisión de datos por puerto serie para permitir el diagnóstico externo o el volcado de gráficas de comportamiento térmico, garantizando así un seguimiento detallado de la estabilidad del proceso, esto se consigue mediante el graficador serie del entorno Arduino (*Serial Plotter de Arduino IDE*).

Una vez definido el esquema de conexión entre los distintos elementos del sistema de control térmico, se procedió a la implementación física del montaje electrónico. Para ello, todos los componentes se integraron en una caja de control donde se dispusieron de forma ordenada los módulos necesarios para la regulación de temperatura.

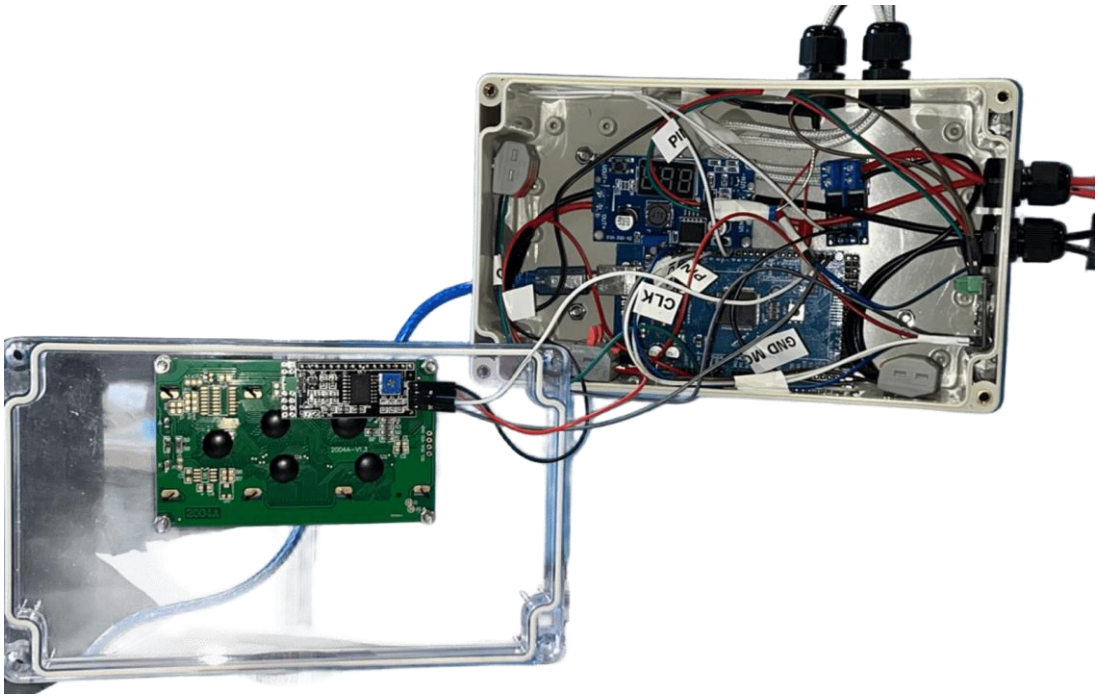


Figura 3-11. Disposición de los componentes electrónicos necesarios para el control PID [Fuente propia]

En la Figura 3-11 se muestra el montaje físico de los componentes electrónicos necesarios para la implementación del sistema de control PID de la cámara isoterma, utilizado para la realización de los ensayos a temperatura controlada. Para ello se empleó una caja con tapa transparente, que permite la correcta visualización y acceso a los elementos electrónicos alojados en su interior.

Sobre la tapa se instaló la pantalla LCD mencionada anteriormente en este apartado, donde se muestran en tiempo real los principales parámetros del control PID. Asimismo, los pasacables incorporados en la caja permiten realizar la conexión eléctrica entre los componentes del sistema de control y los elementos situados en el interior de la cámara.

3.3 Procedimiento experimental

Una vez construido el banco de pruebas y el sistema de control térmico desarrollado, se establece el procedimiento seguido para la realización de los ensayos experimentales a diferentes temperaturas sobre la batería de ion-litio. Para ello, se detallan las condiciones de operación empleadas durante los ciclos de carga y descarga, así como la metodología utilizada para la adquisición y posterior procesamiento de los datos experimentales.

A partir de estos ensayos se obtendrán las curvas características de la batería, permitiendo analizar la influencia de la temperatura sobre su comportamiento eléctrico.

3.3.1 Ensayos de carga y descarga

Una vez descrito el banco de pruebas y el sistema de control térmico desarrollado, se procede a la realización de los ensayos experimentales de carga y descarga de la batería bajo diferentes condiciones de temperatura. Estos ensayos tienen como objetivo caracterizar el comportamiento eléctrico de la batería y analizar la influencia que tiene la temperatura sobre sus principales variables eléctricas.

Para ello, se llevarán a cabo distintos ciclos controlados de carga y descarga utilizando el cargador programable descrito en el apartado 3.2.2 Cargador y descargador SkyRC T1000 Maestro, manteniendo la batería en el interior de la cámara termostatada para garantizar condiciones térmicas estables durante todo el proceso. A partir de los datos registrados de tensión y corriente se obtendrán las curvas características de la batería en función del estado de carga (SOC), lo que permitirá estudiar su evolución a diferentes temperaturas.

Antes de iniciar cada ensayo, la batería se mantuvo durante un tiempo previo en el interior de la cámara térmica con el objetivo de permitir su estabilización a la temperatura de ensayo. Este periodo de acondicionamiento garantiza que la batería alcance una temperatura lo más próxima posible a la temperatura objetivo, reduciendo así posibles errores de medida asociados a diferencias térmicas entre la batería y el entorno de la cámara. De este modo, las mediciones realizadas durante los ciclos de carga y descarga reflejan de forma más fiable el efecto de la temperatura sobre el comportamiento de la batería.

En los siguientes apartados se describe en primer lugar el procedimiento experimental de carga y descarga, así como el método empleado para la adquisición de datos. Posteriormente se presentan y analizan las curvas OCV obtenidas experimentalmente para las distintas condiciones térmicas, lo que permitirá evaluar el efecto de la temperatura sobre el comportamiento electroquímico de la batería.

3.3.2 Carga y descarga de la batería

En este apartado se recogen los ciclos en diferentes condiciones llevados a cabo para estudiar el comportamiento de la batería durante procesos de carga y descarga a diferentes temperaturas. A través de ciclos controlados se obtienen las curvas de voltaje en función del estado de carga, que permiten analizar la evolución electroquímica del sistema en diferentes condiciones de funcionamiento. Los ensayos se realizan aplicando corrientes constantes y registrando de forma continua las magnitudes eléctricas relevantes, generándose los datos necesarios para su posterior procesado y análisis.

Los ciclos de carga y descarga realizados en este trabajo se basan en el método de corriente constante-voltaje constante (CC-CV), ampliamente utilizado en la gestión de baterías de ion-litio por su fiabilidad y seguridad. Este procedimiento permite controlar de forma precisa la energía intercambiada con la batería y obtener información representativa de su comportamiento eléctrico durante el funcionamiento.

Durante la fase de carga, la batería se somete inicialmente a una corriente constante, provocando un aumento progresivo del voltaje a medida que el estado de carga se incrementa. Una vez alcanzado el voltaje máximo establecido por celda, el proceso pasa a una etapa de voltaje constante, en la cual la corriente disminuye gradualmente hasta valores cercanos a cero, indicando que la batería ha alcanzado un estado próximo a la carga completa. Este método evita sobretensiones y reduce el estrés electroquímico del acumulador.

En el caso de la descarga, el ensayo se realiza aplicando una corriente constante desde un estado de carga elevado hasta alcanzar el voltaje mínimo de seguridad. Durante este proceso, el voltaje disminuye de forma progresiva, reflejando la pérdida de energía almacenada en la batería. El uso de corriente constante facilita el cálculo del estado de carga mediante conteo de carga y permite obtener las curvas voltaje-SOC.

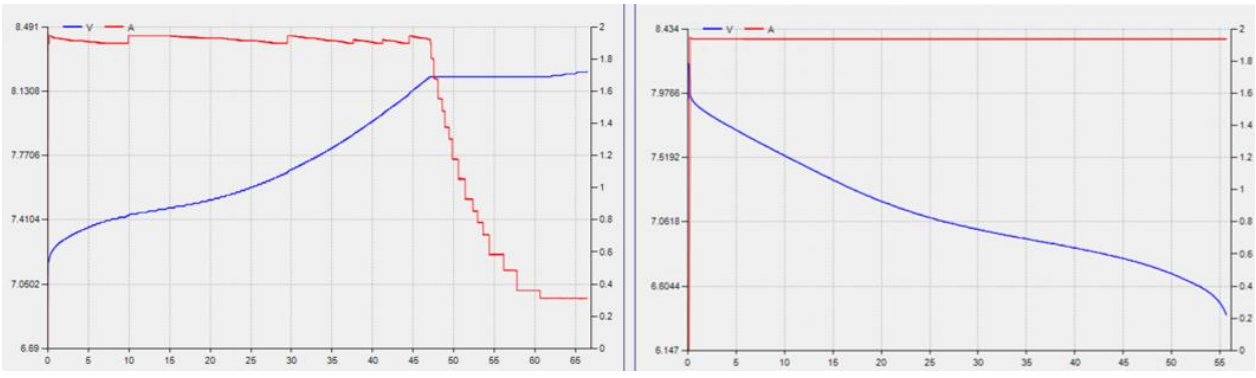


Figura 3-12. Vista completa de una carga (izquierda) y descarga (derecha) a 2A de la batería. [Fuente: elaboración propia con software Charger Master]

La Figura 3-12 muestra un ciclo completo de carga y de descarga. En el caso del ciclo de carga se puede apreciar como la intensidad de carga se mantiene constante hasta que la batería llega a su

capacidad máxima de carga y la intensidad empieza a disminuir hasta que cae a valores cercanos a cero lo que indica que ya se ha cargado por completo. En el caso de la descarga se observa el proceso opuesto, un incremento de corriente hasta que la batería se descarga siempre un poco por debajo de su valor nominal de tensión.

3.3.3 Ciclos con tiempo de relajación.

Con el objetivo de obtener el comportamiento experimental de la batería, en la Tabla 3-3. Planificación ensayos experimentales) de carga y descarga a distintas temperaturas, manteniendo en todos los casos una corriente constante de 2 Amperios. Esto permite analizar de forma comparativa el efecto de la temperatura sobre el comportamiento eléctrico de la batería bajo una misma condición de solicitación.

Al mantener fija la corriente aplicada, cualquier variación observada en la tensión podrá atribuirse fundamentalmente a la influencia térmica y no a diferencias en el régimen de carga. De este modo, se garantiza que las comparaciones entre ensayos se realicen bajo condiciones eléctricas equivalentes.

Durante cada ensayo se introducirán periodos de relajación de diez minutos tras cada incremento de estado de carga, en el que la intensidad caerá a cero. Estos intervalos sin circulación de corriente permiten que la batería reduzca los efectos de polarización instantánea, tales como la caída óhmica y la polarización por transferencia de carga y difusión.

Como consecuencia, el potencial electroquímico de la batería tiende a estabilizarse hacia un estado cercano al equilibrio termodinámico. La tensión medida al final de cada periodo de reposo se empleará para construir la curva OCV-SOC correspondiente a cada temperatura, proporcionando una estimación más representativa de la tensión en circuito abierto y una caracterización más precisa de la influencia térmica en el sistema.

Ensayo	Temperatura de ensayo	Corriente de carga/descarga	Método de ensayo	Periodos de relajación
1	20 ºC	2 A (≈1 C)	CC-CV	10 minutos
2	35 ºC	2 A (≈1 C)	CC-CV	10 minutos
3	45 ºC	2 A (≈1 C)	CC-CV	10 minutos
4	55 ºC	2 A (≈1 C)	CC-CV	10 minutos

Tabla 3-3. Planificación ensayos experimentales.

3.3.4 Construcción de gráficas mediante script MATLAB

Para la construcción de las curvas de estado de carga frente a la tensión de circuito abierto se ha empleado un código desarrollado en MATLAB, mediante el cual se realiza la caracterización de la batería a diferentes temperaturas. Para ello, se han procesado los datos de tensión obtenidos experimentalmente, los cuales han sido previamente importados desde archivos en formato CSV utilizando la función *readmatrix*, la cual es de especial interés ya que permite importar los datos numéricos desde archivos CSV a MATLAB para su posterior procesado. A partir de estos datos, se ha calculado el estado de carga (SOC) mediante el método de conteo de culombios, permitiendo establecer la relación entre la tensión en circuito abierto y el estado de carga para cada condición térmica analizada.

Una vez identificados los puntos de relajación, donde la tensión se estabiliza tras cesar la corriente, el código emplea una interpolación cúbica de Hermite (PCHIP) para reconstruir las envolventes de carga y descarga. Se utiliza la función *pchip* para asegurar la monotonicidad y evitar oscilaciones irreales, respetando la física de la química de la celda.

Finalmente, el programa proyecta estas tendencias hacia los límites de 0% y 100% de SOC y calcula la OCV del sistema como el promedio aritmético de ambas trayectorias, tal y como se verá a partir del apartado Ensayo de carga y descarga a 20 ºC en el capítulo de Resultados Experimentales.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos durante los ensayos de carga y descarga de la batería de ion-litio genérica Amewi® realizados a diferentes temperaturas. A partir de los datos registrados en el banco de pruebas descrito en el capítulo 3, se han construido las curvas características SOC-OCV para distintas condiciones térmicas, con el objetivo de estudiar la influencia de la temperatura sobre el comportamiento electroquímico de la batería.

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos para cada una de las temperaturas ensayadas, analizando la evolución de la tensión en circuito abierto en función del estado de carga. Posteriormente, se realiza una comparación conjunta de las curvas SOC-OCV obtenidas a las diferentes temperaturas, lo que permite identificar las principales variaciones introducidas por el efecto térmico.

Finalmente, se lleva a cabo un ajuste polinómico de las curvas experimentales con el doble objetivo de obtener una expresión analítica de la relación SOC-OCV, que facilite su posterior utilización en el modelo electrotérmico desarrollado en el siguiente capítulo, y de evaluar la calidad de los datos experimentales mediante el análisis del error del ajuste, permitiendo identificar posibles irregularidades o desviaciones en las curvas obtenidas.

4.2 Ensayo de carga y descarga a 20 ºC

La Figura 3-9 muestra la relación entre la tensión en circuito abierto y el estado de carga de la batería de ion-litio caracterizado para la temperatura experimental de 20 ºC en el banco de pruebas anteriormente explicado. La obtención de la OCV se ha realizado mediante el procedimiento descrito en el apartado 3.3.3 (Ciclos con tiempo de relajación.) con el objetivo de permitir la relajación de los fenómenos de polarización. La tensión medida al final de cada periodo de reposo (cuando I=0) se ha considerado como aproximación de la tensión en circuito abierto correspondiente a ese nivel de carga.

Los resultados muestran una relación monótona creciente entre la OCV y el SOC, comportamiento característico de las baterías de ion-litio. En la zona de bajo SOC, la pendiente es moderada debido a la limitada disponibilidad de litio intercalado en el electrodo, lo que reduce la variación del potencial electroquímico ante cambios en la carga. En la región intermedia, la curva presenta un comportamiento aproximadamente lineal, asociado a una zona de operación más estable en la que pequeños cambios en la concentración de litio producen variaciones casi proporcionales en la tensión. Finalmente, a altos valores de SOC, se observa un incremento más acusado de la pendiente, debido a la saturación progresiva del material activo del electrodo, lo que provoca un aumento más significativo del potencial.

Para valores iguales de estado de carga se aprecia una diferencia sistemática entre la curva obtenida durante el proceso de carga y el de descarga, verificándose que la tensión durante la carga es superior a la de descarga. Esto corresponde al fenómeno de histéresis electroquímica propia de las baterías de ion-litio y se debe principalmente a efectos de polarización, gradientes de concentración y limitaciones cinéticas en los procesos de transferencia de carga. Aunque los periodos de relajación estén también enfocados a reducir la influencia de la polarización dinámica, la histéresis no desaparece completamente debido a la propia naturaleza de los materiales de las celdas de la batería.

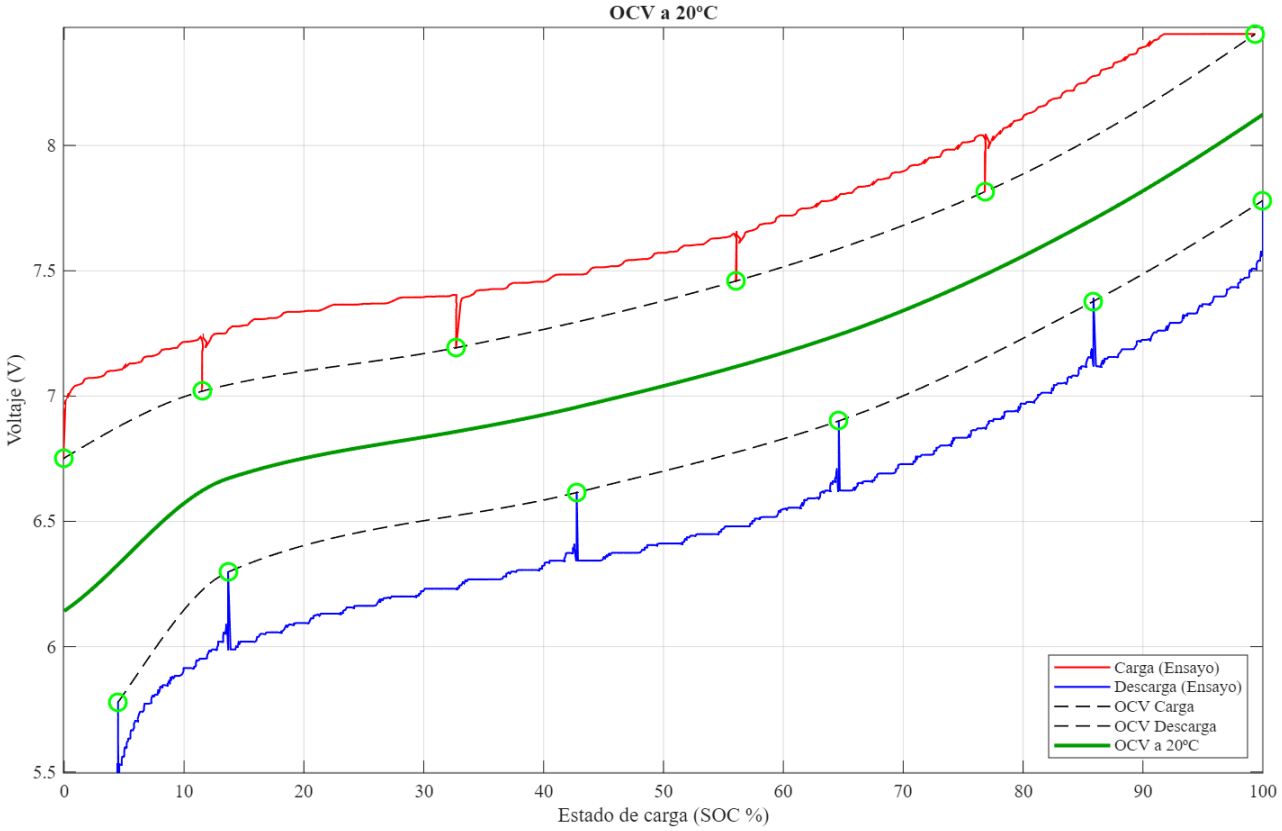


Figura 4-1. Curva OCV del sistema a 20 ºC [Fuente: elaboración propia con MATLAB].

Con el fin de profundizar en el análisis del comportamiento eléctrico de la batería, se analiza la estimación de su resistencia interna a partir de los datos experimentales obtenidos.

Desde el punto de vista del modelado eléctrico, la batería se puede representar mediante un modelo equivalente tipo Thévenin como ya se ha visto en apartados anteriores, el que la tensión en bornes viene dada por [43]

$$V = V_{OCV} - I * R_{int} \qquad \textit{Ecuación 4}$$

Donde V_{OCV} es la tensión en circuito abierto, I la corriente aplicada y R_{int} la resistencia interna de la batería. Esta expresión refleja la caída de tensión asociada a los efectos óhmicos internos.

En condiciones experimentales, la resistencia interna puede estimarse a partir de la respuesta de la batería frente a variaciones de corriente. En particular, ante un escalón de corriente ΔI, se produce un cambio inmediato en la tensión ΔV, cumpliéndose

$$R_{int} = \frac{\Delta \mathrm{V}}{\Delta \mathrm{I}} \qquad \textit{Ecuación 5}$$

Adicionalmente, aprovechando las curvas de tensión en circuito abierto obtenidas experimentalmente, es posible estimar la resistencia interna en función del estado de carga mediante la expresión

$$R_{int} = \frac{V_{OCV} - \mathrm{V}}{I} \qquad \textit{Ecuación 6}$$

Este procedimiento permite analizar la evolución de la resistencia interna con el estado de carga, proporcionando información relevante sobre el comportamiento electroquímico de la batería y su influencia en el rendimiento del sistema.

A partir de la expresión anterior, se ha llevado a cabo la estimación de la resistencia interna para diferentes estados de carga, utilizando los datos experimentales correspondientes a los ensayos de descarga realizados a una corriente constante de 2 A. Para cada nivel de SOC, se ha calculado la diferencia entre la tensión en circuito abierto y la tensión en descarga, permitiendo obtener el valor de R_{int} como función del estado de carga. Los resultados obtenidos se recogen a continuación, facilitando el análisis de la variación de la resistencia interna a lo largo del rango operativo de la batería.

SOC (%)	V_{OCV} (V)	$V_{descarga}$ (V)	ΔV (V)	I (A)	R_{int} (Ω)
10	6,13	5,91	0,22	2	0,110
30	6,50	6,22	0,28	2	0,140
50	6,70	6,41	0,29	2	0,145
70	6,99	6,72	0,27	2	0,135
90	7,48	7,20	0,28	2	0,140

Tabla 4-1. Datos de R_{int} calculados para el ensayo a 20 ºC.

A partir de los valores recogidos en la Tabla 4-1, se observa que la resistencia interna presenta una ligera variación con el estado de carga. En particular, los valores más elevados se registran a bajos niveles de SOC, disminuyendo progresivamente conforme aumenta la carga de la batería. En la zona media, la resistencia tiende a estabilizarse, mientras que a altos niveles de SOC se mantienen valores relativamente bajos. Este comportamiento es coherente con la dinámica electroquímica de las baterías de ion-litio, donde la disponibilidad de portadores de carga y las condiciones internas favorecen una menor resistencia en estados de carga más elevados.

4.3 Ensayo de carga y descarga a 35 ºC

La curva de la Figura 4-2 obtenida experimentalmente a 35 ºC presenta un comportamiento monótonamente creciente del voltaje con el estado de carga, con una clara diferenciación entre las curvas de carga y descarga. En el rango bajo de SOC, aproximadamente entre el 0% y el 20%, se observa una separación notable entre ambas curvas, siendo la tensión en carga significativamente superior a la de descarga para un mismo SOC. este fenómeno es indicativo de la presencia de histéresis electroquímica, asociada a procesos de polarización y a diferencias estructurales en la inserción y extracción de litio en los electrodos.

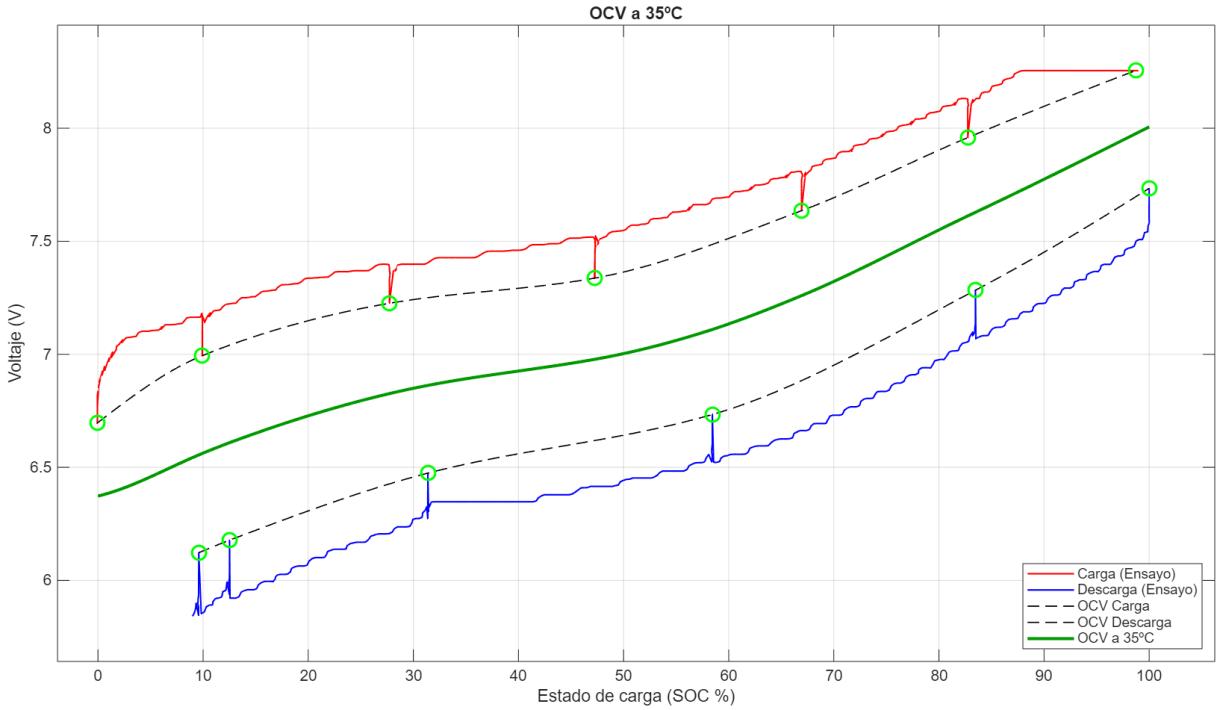


Figura 4-2. Curva OCV del sistema a 35 ºC [Fuente: elaboración propia con MATLAB].

En la región intermedia, aproximadamente del 30% al 70%, se muestra una pendiente relativamente constante, lo que refleja una evolución estable del potencial con el estado de carga. Sin embargo, en los extremos del SOC la curva presenta mayor curvatura: en bajo estado de carga la pendiente en más pronunciad, indicando mayor sensibilidad del voltaje ante pequeñas variaciones de carga, mientras que en valores mayores al 80% de estado de carga se aprecia una ligera desviación antes del voltaje máximo, asociada a que el electrodo se aproxima a su grado máximo de licitación, es decir, que el electrodo está completamente cargado de litio.

En general, a 35 ºC la curva OCV es regular en la zona central, mientras que las mayores desviaciones respecto a una tendencia lineal se localizan en los extremos del SOC.

4.4 Ensayo de carga y descarga a 45 ºC

En la Figura 4-3, correspondiente al ensayo a 45 ºC, se aprecia una ligera reducción de la separación entre carga y descarga en la zona media del SOC, lo que sugiere una disminución parcial de los efectos de polarización debido al incremento de la temperatura. La mejora de la cinética electroquímica y la reducción de la resistencia interna por el aumento de temperatura favorecen que el voltaje medido tras los reposos se aproxime más al valor de equilibrio.

La curva OCV promedio mantiene la tendencia creciente observada a 35 ºC, aunque presenta una transición más uniforme entre las distintas regiones del SOC. En la zona intermedia se observa una mayor linealidad, mientras que en el rango bajo de SOC continúa existiendo una pendiente elevada, confirmando que esta región sigue siendo la más sensible a las variaciones térmicas. En el extremo superior del SOC, la curvatura es ligeramente más suave que a 35 ºC, indicando que el aumento de temperatura reduce parcialmente las limitaciones cinéticas en estados en los que el electrodo está casi cargado de litio.

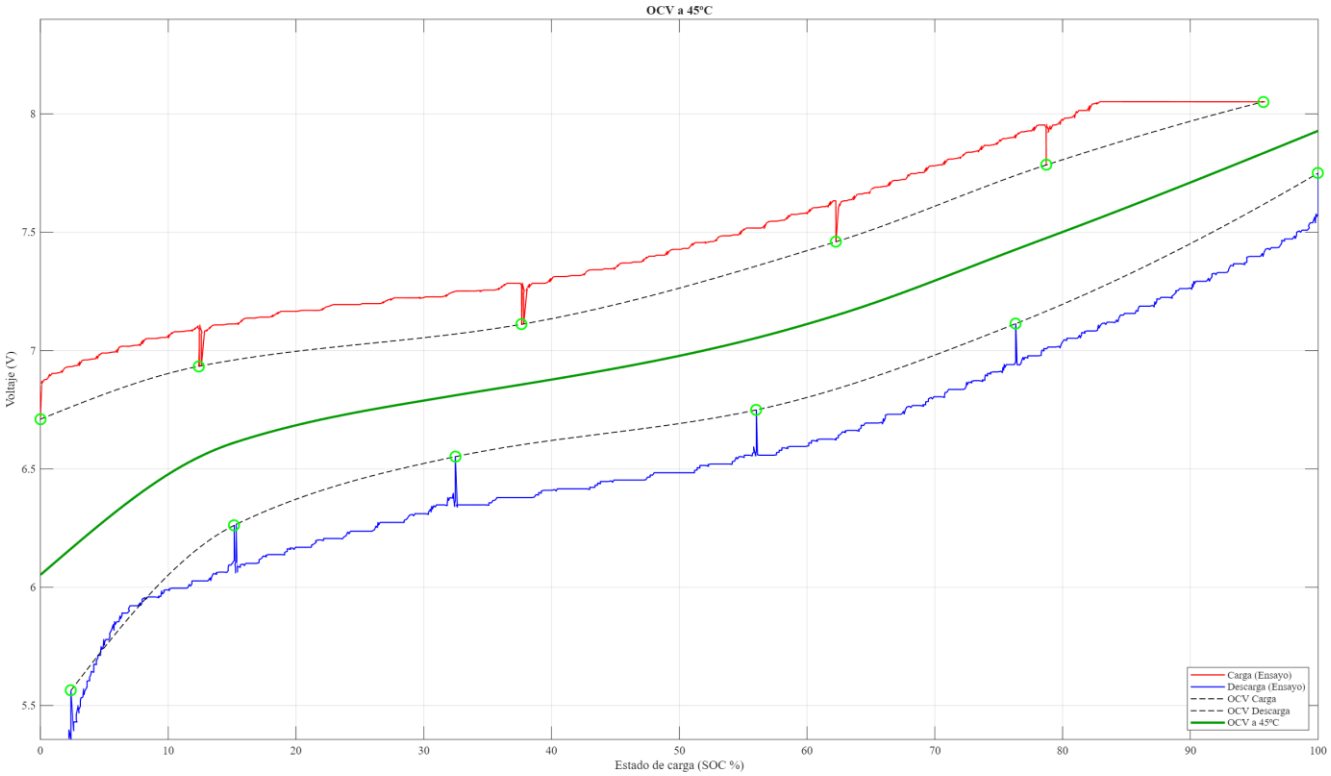


Figura 4-3. Curva OCV del sistema a 45 ºC [Fuente: elaboración propia con MATLAB]

En términos generales, a 45 ºC la curva muestra una mayor linealidad en la zona media y una ligera reducción de la histéresis respecto al ensayo a 35 ºC, aunque sin eliminar completamente las diferencias entre carga y descarga.

4.5 Ensayo de carga y descarga a 55 ºC

La Figura 4-4 corresponde al ensayo realizado a 55 ºC. En este ensayo se presenta un comportamiento más suavizado en la región intermedia del SOC, con una separación menor entre las curvas de carga y descarga en comparación con temperaturas menores. Este resultado es coherente con la reducción de la resistencia interna y la mejora de los procesos difusivos y cinéticos ya que se trabaja a temperaturas más elevadas, lo que permite que la tensión medida tras los periodos de reposo se aproxime en mayor media al potencial de equilibrio.

La curva OCV resultante del ensayo a 55 ºC muestra un perfil más suavizado en la zona media del SOC, con una evolución continua y sin cambios bruscos de pendiente. Asimismo, sigue apreciándose una mayor dispersión entre temperaturas y una pendiente elevada de la curva OCV, lo que confirma que esta región continúa siendo la más afectada por condiciones térmicas. En la región alta de SOC se observa una ligera curvatura antes del voltaje máximo, relacionada con el hecho de que el material activo se encuentra próximo a su límite de licitación.

En conjunto, la gráfica a 55 ºC evidencia una mejora en la estabilidad en la zona media de SOC, pero manteniendo inestabilidad en los extremos, sobre todo en bajos estados de SOC.

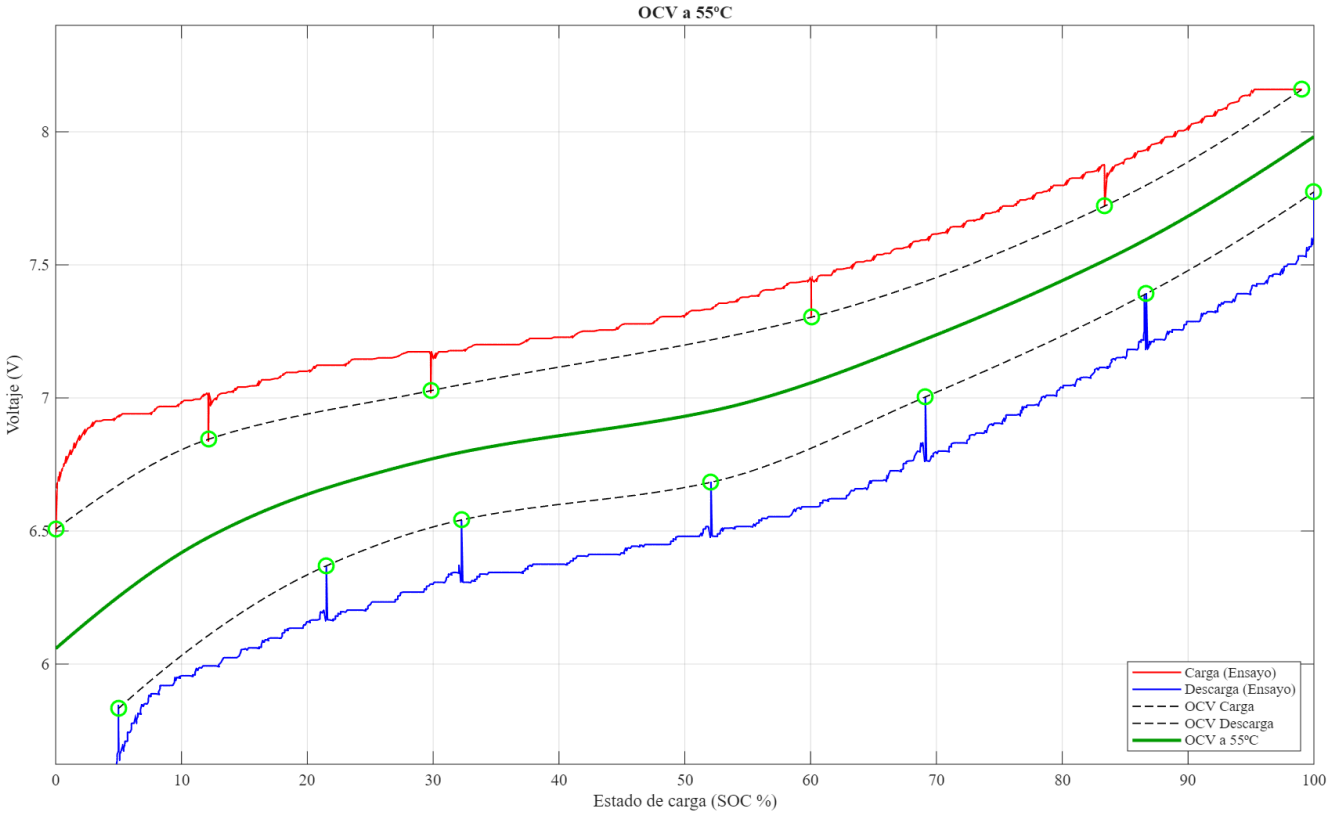


Figura 4-4. Curva OCV del sistema a 55 ºC [Fuente: elaboración propia con MATLAB]

Siguiendo el mismo procedimiento para el cálculo de la resistencia interna que en el apartado Ensayo de carga y descarga a 20 ºC se obtienen los siguientes valores de resistencia interna a lo largo de diferentes valores de estado de carga

SOC (%)	V_{OCV} (V)	$V_{descarga}$ (V)	ΔV (V)	I (A)	R_{int} (Ω)
10	6,02	5,95	0,07	2	0,035
30	6,51	6,30	0,21	2	0,105
50	6,66	6,47	0,19	2	0,095
70	7,01	6,80	0,21	2	0,105
90	7,47	7,27	0,20	2	0,100

Tabla 4-2 Datos de R_{int} calculados para el ensayo a 55 ºC

A partir de los valores calculados en la Tabla 4-2, se observa que la resistencia interna a 55 °C es significativamente menor que la obtenida a 20 °C, manteniéndose prácticamente constante en la mayor parte del rango de SOC. En la zona de bajos y medios estados de carga, los valores se sitúan en torno a 0,075 Ω de media aproximada, mientras que a altos niveles de SOC se aprecia un ligero incremento hasta llegar a los 0,105 Ω. Este comportamiento es característico de las baterías de ion-litio a temperaturas elevadas, donde el aumento de la temperatura favorece la movilidad iónica y reduce las pérdidas internas, dando lugar a una menor resistencia interna global.

4.6 Comparación de las curvas SOC-OCV a diferentes temperaturas

En este apartado se muestran los resultados experimentales obtenidos a partir de los ensayos de carga y descarga realizados a diferentes temperaturas. A partir de estos datos se comparan las curvas OCV-SOC con el fin de analizar la influencia de la temperatura sobre la tensión en circuito abierto de la batería.

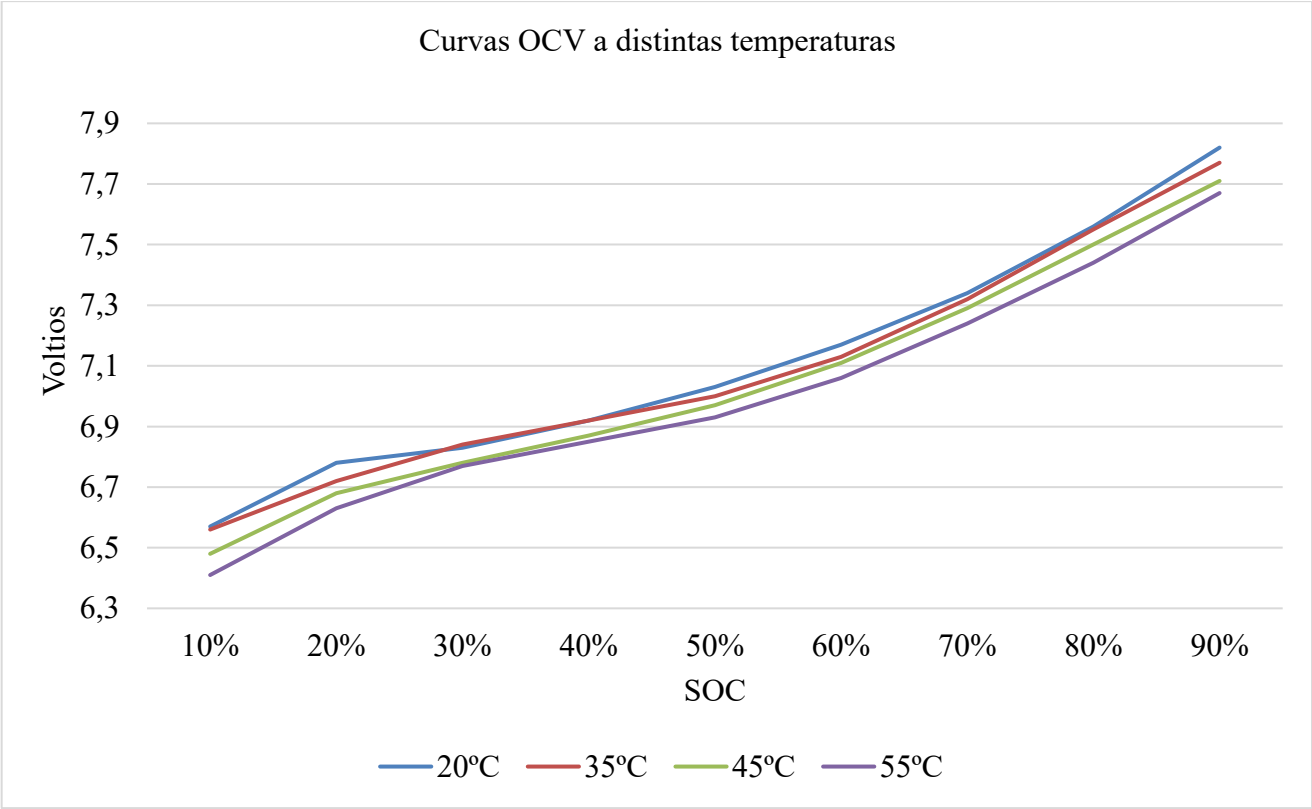


Figura 4-5. Comparación de las curvas OCV a diferentes temperaturas [Fuente: elaboración propia]

La Figura 26 muestra la comparación directa de las curvas OCV-SOC obtenidas experimentalmente a 20 ºC, 35 ºC, 45 ºC y 55 ºC, y la Tabla 5 recoge los valores numéricos asociados. En todas las temperaturas analizadas la relación entre el voltaje en circuito abierto y el estado de carga presenta una tendencia monótonamente creciente y una forma similar, dependiendo de la temperatura a la que se le someta. Además, se observa un desplazamiento sistemático del nivel de tensión a medida que aumenta la temperatura. Se han eliminado los extremos inicial y final de las curvas debido a la posible presencia de errores experimentales en dichas regiones.

OCV	**10%**	**20%**	**30%**	**40%**	**50%**	**60%**	**70%**	**80%**	**90%**
20 ºC	6,57	6,78	6,83	6,92	7,03	7,17	7,34	7,56	7,82
35 ºC	6,56	6,72	6,84	6,92	7,00	7,13	7,32	7,55	7,77
45 ºC	6,48	6,68	6,78	6,87	6,97	7,11	7,29	7,5	7,71
55 ºC	6,41	6,63	6,77	6,85	6,93	7,06	7,24	7,44	7,67

Tabla 4-3. Datos OCV, en voltios, obtenidos experimentalmente

Con el objetivo de cuantificar con mayor precisión la influencia de la temperatura sobre la tensión en circuito abierto, se ha analizado el decremento porcentual medido de la OCV para cada nivel de estado de carga a partir de los valores experimentales obtenidos. Para ello, se ha calculado la variación porcentual de la tensión entre las diferentes temperaturas consideradas y posteriormente se ha obtenido el valor medio de dicha variación para cada SOC.

Los resultados obtenidos muestran que el decremento medio de la OCV debido al aumento de temperatura se sitúa aproximadamente entre el 0,29% y el 0,82%, dependiendo del estado de carga considerado. En particular, para un SOC del 10% se obtiene una disminución media de aproximadamente un 0,82%, mientras que para 20% de SOC la variación media es cercana al 0,74%. En valores

intermedios de estado de carga, como 30% y 40%, el efecto térmico es menor, con decrementos medios de 0,29% y 0,34%, respectivamente.

En la zona media de estado de carga, comprendida aproximadamente entre el 50% y el 70% de SOC, la variación térmica de la OCV presenta valores relativamente estables. En este rango se obtienen decrementos medios de aproximadamente 0,48% para 50% de SOC, 0,51% para 60% y 0,46% para 70%, lo que indica que la influencia de la temperatura sobre la tensión es moderada y relativamente uniforme en esta región de funcionamiento de la batería.

Por otro lado, al aproximarse a altos estados de carga, el efecto térmico vuelve a intensificarse ligeramente. Para el 80% de SOC se obtiene un decremento medio de un 0,53%, mientras que en el 90% de SOC la variación alcanza aproximadamente un 0,64%. Este comportamiento confirma que la sensibilidad de la tensión en circuito abierto frente a variaciones térmicas tiende a aumentar nuevamente en los extremos del rango de estado de carga.

Además del efecto termodinámico, debe considerarse la influencia de la resistencia interna de las celdas. El incremento de temperatura provoca una disminución de la resistencia óhmica, tal y como se observa en la Figura 4-6 a partir de los datos experimentales, y una mejora de los procesos difusivos y de transferencia de carga entre los electrodos. Esto favorece una relajación más rápida tras cada escalón de corriente durante el ensayo experimental, reduciendo los efectos de polarización residual, es decir, permitiendo que la tensión medida tras el reposo se aproxime más al verdadero valor de tensión en circuito abierto. Esta disminución de resistencia interna provocado por ese aumento de temperatura para acarrear mejoras como la conductividad iónica o la velocidad de descarga, aunque estas mejoras se pueden transformar en beneficios contraproducentes ya que se puede dar lugar a una aceleración de la degradación de la batería.

Sin embargo, el desplazamiento descendente sistemático observado en la OCV con el aumento de temperatura no puede atribuirse únicamente a esta reducción de resistencia interna, ya que la OCV se define en condiciones de corriente nula. Por tanto, los resultados indican que coexisten tanto un efecto resistivo como una variación del propio potencial de equilibrio con la temperatura, es decir, que la OCV real cambia con la temperatura, aunque no circule corriente.

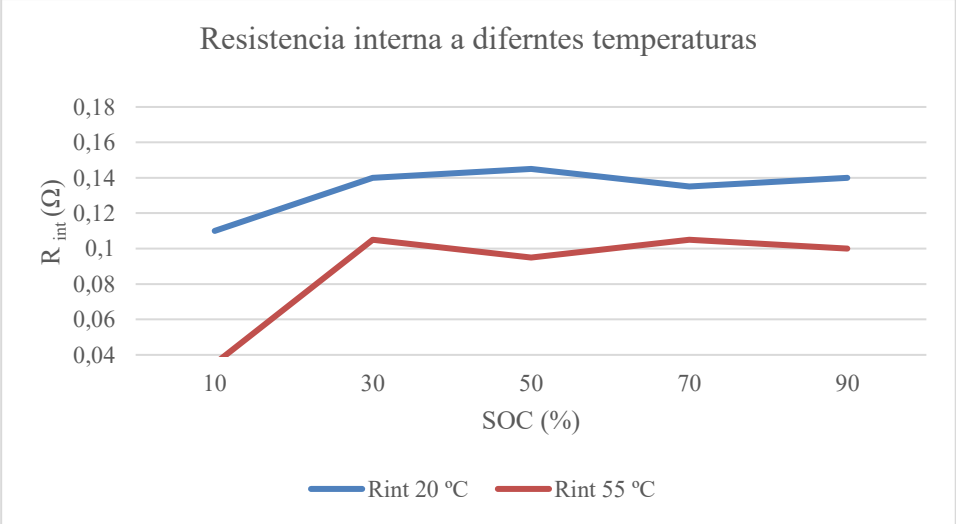


Figura 4-6. Comparación de resistencia interna a lo largo del SOC a 20 ºC y 55 ºC

También se observa que la influencia térmica no es completamente uniforme en todo el rango de estado de carga. Las mayores diferencias entre temperaturas se registran en los extremos, en torno al 10% y al 90% de SOC, mientras que, en la región intermedia, entre el 30% y el 70% de SOC, las curvas tienen a aproximarse con variaciones inferiores a 0,1 V. Esta mayor sensibilidad en los extremos puede asociarse a que, en esas regiones, el material activo de los electrodos se encuentra próximo a sus límites de licitación, es decir, cuando el electrodo ya está casi cargado de esos iones de litio. En esas condiciones,

pequeñas variaciones en la concentración de litio o en la temperatura producen cambios más acusados en el potencial electroquímico. Es importante señalar que los extremos de los estados de carga se han obviado por poder presentar errores en su medición ya sea por errores experimentales o por tomar periodos de adaptación a la temperatura inadecuados, así que se toman los valores de entre el 10% y el 90% de SOC que es cuando la batería se encuentra totalmente adaptada a la temperatura a la que se le somete.

En términos relativos, la variación total observada entre los 20 ºC y 55 ºC a los que se somete la batería se sitúa entre 0,10 V y 0,16 V según el estado de carga considerado, lo que representa aproximadamente un 2-3% del valor absoluto de la tensión. Aunque pueda parecer una variación moderada es una variación suficientemente significativa y más adelante mediante el modelo simulado se podrá ver la diferencia entre lo experimental y lo teórico. Es importante señalar que durante los ensayos experimentales se pueden haber producido errores durante la medición dando lugar a un comportamiento no totalmente ideal de la batería, dando esa diferencia entre los valores teóricos.

Por tanto, aunque la reducción de la resistencia interna a mayor temperatura contribuye a disminuir los efectos de polarización y a estabilizar la respuesta en la zona intermedia del SOC, no es suficiente para explicar por sí sola la variación observada en la OCV. La dependencia térmica afecta tanto al comportamiento resistivo como al potencial electroquímico de equilibrio, siendo necesario considerar ambos efectos de forma conjunta.

En términos generales, los resultados experimentales muestran que la temperatura no altera la forma general de la curva OCV-SOC, pero sí introduce un desplazamiento descendente sistemático y una mayor sensibilidad en los extremos del rango de carga. Por tanto, la relación OCV-SOC presenta una clara dependencia térmica, por lo que cualquier modelo orientando a la estimación precisa del estado de carga debe incluir esta dependencia térmica, tal y como se hace en el modelado electrotérmico simulado más adelante explicado.

4.7 Ajuste polinómico de las curvas SOC-OCV

Con el objetivo de obtener una expresión analítica continua de la relación entre la tensión en circuito abierto y el estado de carga, en este apartado se pretende realizar un ajuste polinómico sobre los resultados experimentales correspondientes a las temperaturas extremas del estudio: 20 ºC y 55 ºC. Estas temperaturas representan los límites inferior y superior del rango térmico analizado, permitiendo evaluar la influencia de la temperatura en el comportamiento electroquímico de la celda.

El procedimiento consiste en aproximar la curva experimental OCV(SOC) mediante un polinomio de grado n:

$$V_{OCV} = a_0 SOC^n + a_1 SOC^{n-1} + \cdots + a_n SOC + a_{n+1} \qquad \textit{Ecuación 7}$$

En este caso, el polinomio será de grado 6 quedando la ecuación como

$$V_{OCV} = \sum_{i=0}^{6} a_i SOC^i \qquad \textit{Ecuación 8}$$

Dado que las curvas SOC-OCV obtenidas a distintas temperaturas presentan una forma similar y difieren principalmente en un desplazamiento de nivel de tensión, se ha considerado suficiente realizar el ajuste polinómico sobre una única curva representativa. En este caso, se ha seleccionado la curva correspondiente a 35 ºC por situarse en un rango intermedio de las condiciones de ensayo. Esta aproximación permite simplificar el proceso de modelado, asumiendo que el error asociado al ajuste será similar para el resto de las temperaturas, al mantenerse la misma tendencia en la relación SOC-OCV.

Con el objetivo de validar la precisión del modelo polinómico obtenido, se evaluará calidad del ajuste mediante el cálculo del error cuadrático medio (RMSE). Este parámetro cuantifica la desviación media entre los valores experimentales de la tensión en circuito abierto (OCV) y los valores estimados

por el polinomio ajustado. El RMSE se calcula como la raíz cuadrada del promedio de los errores al cuadrado, proporcionando una medida directa del error en las mismas unidades que la variable analizada.

El RMSE se ha elegido como método de evaluación porque permite cuantificar la desviación entre los valores experimentales y los estimados por el modelo en las mismas unidades de la variable analizada. Además, al considerar el cuadrado del error, penaliza con mayor peso las desviaciones de mayor magnitud, lo que resulta adecuado en problemas de ajuste de curvas. Por este motivo, el RMSE es una de las métricas más empleadas en procesos de regresión y validación de modelos.

Valores reducidos de RMSE indican una alta concordancia entre el modelo matemático y los datos experimentales, lo que confirma la validez del ajuste para sus posterior implementación y análisis. La expresión para calcular el error cuadrático medio queda como

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(OCV_{exp,i} - OCV_{estimado,i})^2} \qquad \textit{Ecuación 9}$$

Valores bajos de RMSE indican una elevada concordancia entre los datos experimentales y la aproximación polinómica, mientras que valores elevados reflejan una mayor desviación y, por tanto, una menor calidad del ajuste.

Para obtener los datos para su validación se ha empleado un script desarrollado en MATLAB, en particular se ha empleado la función *polyfit*, que determina los coeficientes del polinomio de sexto grado minimizando el error cuadrático entre los valores medidos de tensión en circuito abierto y los valores estimados por el modelo.

Una vez obtenidos los coeficientes, se ha utilizado la función *polyval* para evaluar el polinomio ajustado y generar una representación continua de la curva en todo el rango de SOC. Asimismo, el mismo script permite calcular indicadores estadísticos de calidad del ajuste, como el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación R^2, lo que proporciona una medida cuantitativa de la precisión del modelo. Este procedimiento garantiza un tratamiento sistemático y reproducible de los datos experimentales antes de proceder a su representación gráfica y análisis comparativo.

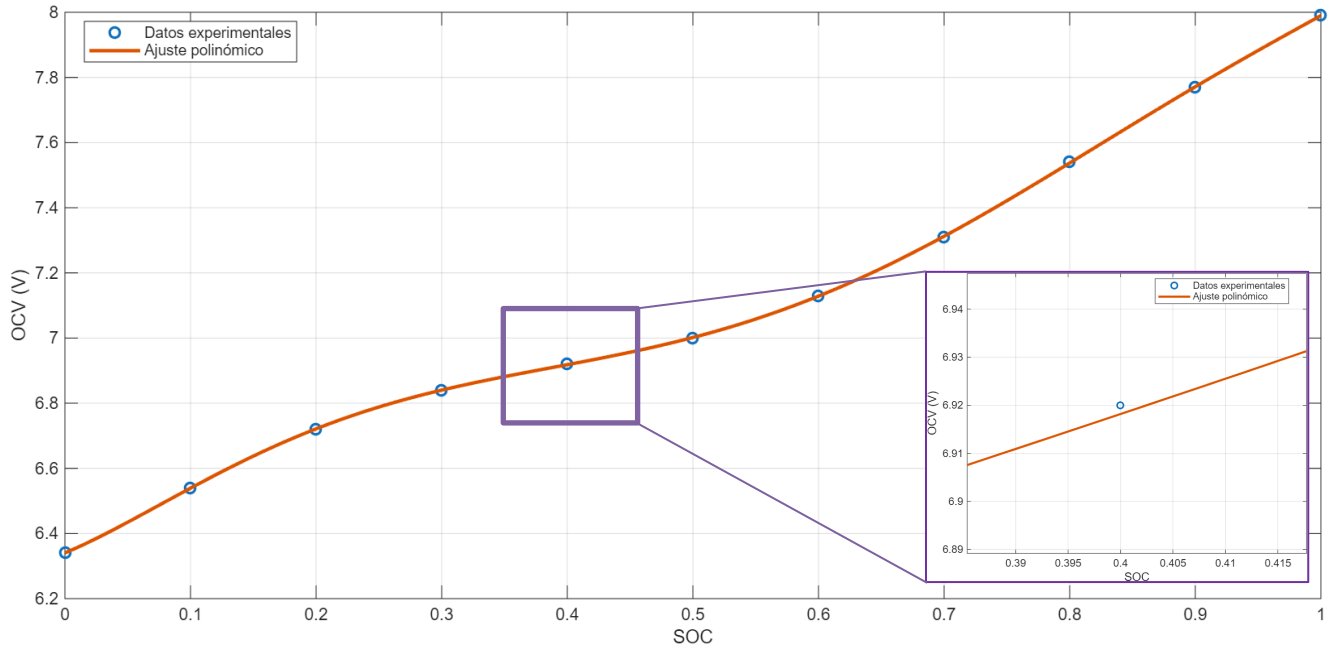


Figura 4-7. Ajuste polinómico de sexto grado para curva experimental de 35 ºC.

El ajuste polinómico de sexto grado aplicado a la curva SOC-OCV ha proporcionado los coeficientes a_0 a a_6 mostrados en la Tabla 4-4, los cuales se han obtenido mediante un ajuste por mínimos cuadrados utilizando la función *polyfit* de Matlab. Este procedimiento determina los coeficientes del polinomio que mejor aproximan los datos experimentales, minimizando el error cuadrático entre los valores medidos y los estimados por el modelo. De este modo, se define una expresión analítica continua de la tensión en circuito abierto en función del SOC. El valor del término independiente a_0 representa la tensión estimada para un SOC del 0%, coherente con el valor experimental correspondiente.

a6	a5	a4	a3	a2	a1	a0
19,6895	-67,5622	83,5913	-42,8047	7,1062	1,6294	6,3402

Tabla 4-4 Coeficientes obtenidos del ajuste de sexto grado

La calidad del ajuste se evalúa mediante un error cuadrático medio de 0,001488V, lo que indica una desviación media del orden de milivoltios entre los datos experimentales y la aproximación polinómica. Asimismo, el coeficiente de determinación R^2=0,999 confirma que la regresión reproduce prácticamente la totalidad de la variabilidad observaba en los datos experimentales. Estos resultados evidencian que el polinomio de sexto grado constituye una representación matemática precisa de la curva OCV-SOC obtenida experimentalmente.

En general, el ajuste polinómico realizado permite obtener una representación analítica precisa y continua de la curva SOC-OCV, reproduciendo fielmente los datos experimentales. Esta formulación resulta esencial para su integración en el modelo electrotérmico, ya que facilita la simulación del comportamiento de la batería bajo distintas condiciones de operación.

5 MODELADO Y SIMULACIÓN

5.1 Entorno Simscape

Este apartado describe el entorno de simulación empleado en la implementación del modelo electrotérmico de la batería. En primer lugar, se introduce la herramienta Simulink®, utilizada para el modelado y la simulación del sistema. A continuación, se presenta la biblioteca Simscape, empleada para la representación física integrada de los dominios eléctrico y térmico.

La elección de este entorno de simulación se justifica por su capacidad para representar de forma integrada los fenómenos eléctricos y térmicos presentes en la batería. A diferencia de otros enfoques basados en modelos puramente matemáticos, el uso de Simscape permite trabajar con modelos basados en componentes físicos, lo que proporciona una mayor interpretabilidad y coherencia con el comportamiento real del sistema.

Además, este entorno facilita la incorporación de variables dependientes de la temperatura y del estado de carga, lo que resulta especialmente relevante en el modelado electrotérmico de baterías de ion-litio, donde existe una fuerte interacción entre ambos dominios.

5.1.1 Introducción

Simulink® es un entorno de programación gráfica integrado en MATLAB que permite modelar, simular y analizar sistemas dinámicos mediante diagramas de bloques. En este entorno, cada bloque representa una operación, función o componente, mientras que las conexiones entre ellos definen el flujo de señales dentro del sistema.

En el contexto de este trabajo, Simulink® se utiliza como plataforma para la implementación del modelo electrotérmico de la batería, permitiendo definir perfiles de corriente, simular la respuesta del sistema y analizar variables como la tensión, el estado de carga o la temperatura. Su integración con MATLAB facilita además el postprocesado de resultados y la comparación con datos experimentales.

Esta herramienta resulta especialmente adecuada para el estudio de sistemas energéticos, ya que permite combinar el modelado estructurado con la simulación temporal en un entorno único.

5.1.2 Librería Simscape Electrical

El desarrollo del modelo se ha realizado mediante el uso de la biblioteca Simscape, una extensión de Simulink® orientada al modelado físico de sistemas multidominio. A diferencia de los bloques convencionales basados en señales, Simscape permite representar directamente componentes físicos reales, como resistencias, fuentes o elementos térmicos, conectados a través de puertos conservativos que reproducen el intercambio de energía.

Este enfoque permite construir modelos a partir de una descripción física del sistema, en lugar de definir explícitamente las ecuaciones que lo gobiernan. El entorno traduce automáticamente la red de componentes en un sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas, que se resuelve durante la simulación.

Dentro de Simscape existen bibliotecas especializadas, como Simscape Electrical, que facilitan el modelado de sistemas eléctricos y térmicos manteniendo una estructura coherente. Esta aproximación resulta especialmente adecuada en aplicaciones como el modelado de baterías, donde es necesario representar de forma conjunta fenómenos eléctricos y térmicos.

De este modo, Simscape permite desarrollar modelos con un enfoque físico intuitivo, manteniendo al mismo tiempo la capacidad de análisis y simulación propia de Simulink

5.2 Esquema general del modelado electrotérmico

A lo largo de este apartado se va a presentar la estructura general del modelo electrotérmico desarrollado, junto con los elementos principales que lo componen. Asimismo, se describe su implementación en el entorno de simulación y la configuración empleada para reproducir el comportamiento acoplado eléctrico y térmico de la batería.

5.2.1 Introducción al modelado

Con el fin de analizar el comportamiento eléctrico y térmico de la batería bajo diferentes condiciones de operación, se ha implementado (Figura 5-1) un modelo electrotérmico del sistema en el entorno de simulación Simulink® con la librería de Simscape Electrical, tal y como se mencionó en el apartado 5.1.2. Este entorno permite representar de forma conjunta los fenómenos eléctricos y térmicos presentes en baterías de ion-litio mediante modelos parametrizados basados en datos tabulados de fabricantes y compararlos con los datos experimentales para así validar el modelo electrotérmico diseñado y desarrollado.

En este contexto, el modelo se plantea con el objetivo de reproducir las tendencias principales del comportamiento electrotérmico de la batería, más que de predecir con precisión absoluta una celda específica.

Para la modelización electrotérmica del sistema se ha empleado el bloque *Battery (Table-based)* de Simscape Electrical, el cual permite representar el comportamiento de una celda de ion-litio mediante tablas dependientes del estado de carga (SOC) y de la temperatura. Este tipo de modelo es especialmente adecuado cuando se desea reproducir con mayor realismo la variación de la tensión en circuito abierto (OCV), la resistencia interna y los efectos térmicos asociados al funcionamiento de la batería.

5.2.2 Batería empleada para modelado y esquema del modelado

La batería empleada en los ensayos corresponde a un pack comercial de ion-litio de 7,4 V y 2000 mAh, compuesto por dos celdas en serie. Dado que el fabricante no proporciona información detallada sobre las curvas características necesarias para la modelización (OCV–SOC, resistencia interna y dependencia térmica), se ha seleccionado una celda comercial equivalente cuyas prestaciones nominales son representativas de este tipo de baterías.

En particular, se ha utilizado como referencia la celda Panasonic® NCR18500A, disponible en la librería Simscape Electrical, cuyas características eléctricas y de capacidad (Tabla 5-1) son comparables a las del sistema estudiado, permitiendo reproducir de forma coherente el comportamiento general de la batería dentro del contexto del modelo.

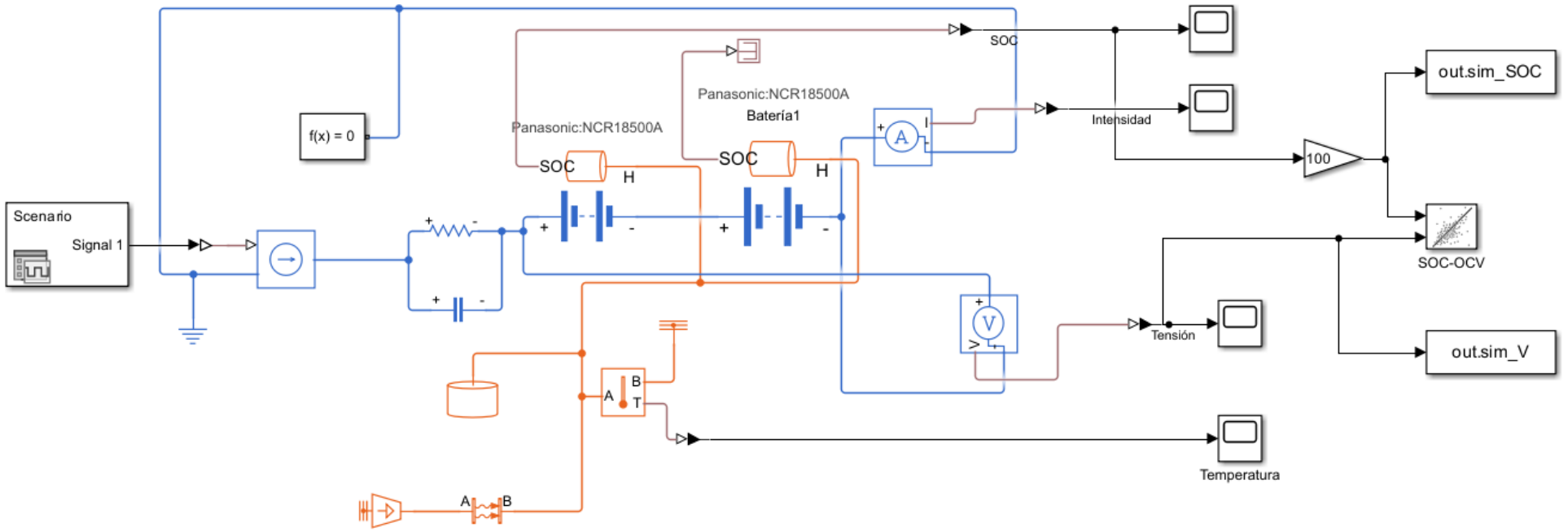


Figura 5-1. Modelo electrotérmico desarrollado con Simulink® [Fuente: elaboración propia].

Parámetro	Valor/descripción
Tipo de batería	Ion-litio
Marca y modelo	Panasonic® NCR18500A
Formato de celda	Cilíndrica 18500
Voltaje nominal	3,6 V
Voltaje máximo de carga	4,2 V
Capacidad nominal	2040 mAh
Energía específica gravimétrica	204 Wh/kg
Corriente de carga recomendada	0,7C
Temperatura de carga	0 ºC a 40 ºC
Temperatura de descarga	-20 ºC a 60 ºC

Tabla 5-1. Especificaciones técnicas batería Panasonic® NCR18500A.

Dado que la batería real es un pack 2S, el modelo se ha adaptado para reproducir dicha configuración. Desde el punto de vista eléctrico, la conexión se serie implica que la tensión total del pack es el doble de la tensión de una celda individual, mientras que la capacidad nominal permanece invariable. En consecuencia, el modelo reproduce una tensión máxima aproximada de 8,4V (4,2V por celda), una tensión nominal cercana a 7,4V y una capacidad nominal de 2000mAh, coherentes con las especificaciones del fabricante.

5.2.3 Influencia de la temperatura en el modelado

Con el objetivo de aumentar el realismo del modelo, se ha activado la opción de tabulación de parámetros en función de la temperatura, permitiendo definir la tensión en circuito abierto y la resistencia interna como funciones simultáneas del estado de carga y de la temperatura. Se han considerado distintos niveles térmicos representativos del entorno de operación, lo que permite analizar la influencia de la temperatura en el comportamiento eléctrico del pack. Este fenómeno reproduce el fenómeno físico observado en baterías de ion lito reales, donde la resistencia interna aumenta a bajas temperaturas y disminuye a temperaturas elevadas, afectando directamente a la caída de tensión bajo carga. En la Tabla 5-2 se muestra a modo resumen la configuración del pack de batería usado para la implementación del modelo electrotérmico.

Parámetro	Descripción	Valor/descripción
Tipo de modelo	Modelo equivalente eléctrico basado en tablas	Simscape Electrical
Configuración del pack	Conexión en serie de celdas	2 S
Capacidad nominal	Capacidad eléctrica de la batería	2 Ah
Vector de SOC	Estado de carga utilizado para tabular parámetros	De 0 a 1 en incrementos de 0,01
Vector de Tª	Temperaturas consideradas en el modelo	-10, 0, 25, 45 y 60 ºC

Voltaje en circuito abierto	Curva V_0(SOC, Tª)	Derivada de hoja del fabricante
Resistencia interna	Resistencia R_0(SOC, Tª)	Derivada de hoja del fabricante
Modelo dinámico adicional	Rama RC en paralelo para modelar polarización	Incluido
Puerto de medición SOC	Salida del estado de carga para monitorización	Activado

Tabla 5-2. Parámetros eléctricos del modelo de batería implementado para la simulación.

5.3 Modelo eléctrico

El modelo eléctrico (Figura 5-2) tiene como objetivo representar el comportamiento dinámico de la batería frente a distintos perfiles de carga y descarga, permitiendo analizar la evolución de variables fundamentales como la tensión en bornes, la corriente y el estado de carga (SOC). Asimismo, este modelo permite estimar las pérdidas internas del sistema, las cuales se utilizan posteriormente en el acoplamiento con el modelo térmico.

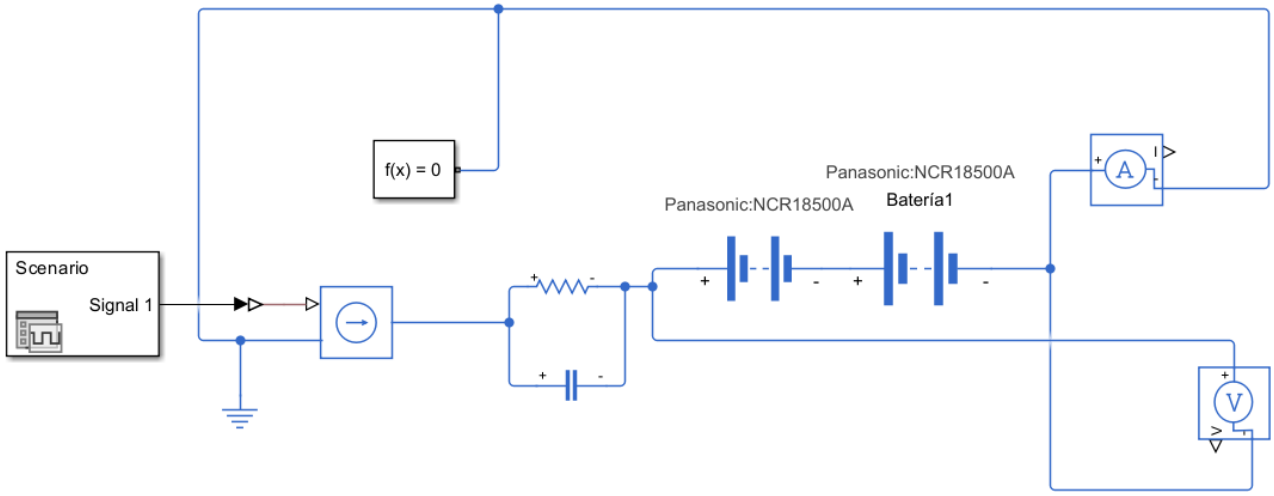


Figura 5-2 Parte eléctrica del modelo electrotérmico [Fuente propia]

5.3.1 Componentes del modelado eléctrico

El modelo eléctrico se construye mediante la interconexión de varios bloques de Simscape Electrical, cada uno encargado de representar un elemento del sistema o de permitir la medida de variables eléctricas. A continuación, se describen los componentes del modelo.

1. **Editor de señal.** Se utiliza para definir el perfil de corriente aplicado a la batería durante la simulación. Este bloque permite generar secuencias de carga y descarga mediante pulsos de corriente dependientes del tiempo, incluyendo intervalos de reposo necesarios para la relajación del sistema y la estimación de la tensión en circuito abierto.

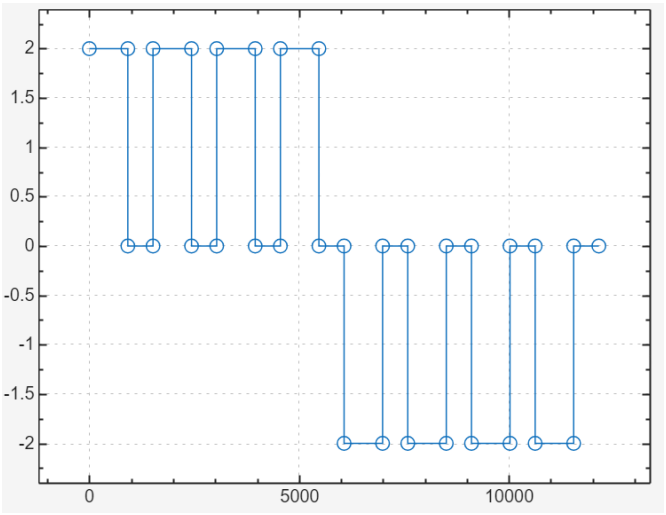


Figura 5-3. Configuración del bloque *Signal Editor*.

La Figura 5-3 muestra el escenario de simulación de este bloque y los 12144 segundos que dura el escenario resultan de la suma de: la duración total de todos los pulsos de corriente necesarios para recorrer el rango de estado de carga, los tiempos de relajación asociados a cada escalón y el intervalo final necesario para asegurar la estabilización completa del sistema.

2. **Fuente de corriente controlada**. Es el elemento encargado de imponer la corriente que circula por la batería. Se trata de una fuente ideal cuya magnitud viene determinada por una señal externa, este caso la generada por el generador de pulso. Este bloque permite aplicar diferentes perfiles dinámicos de carga y descarga además de controlar con precisión el calor de intensidad en cada instante.
   Desde el punto de vista físico, este elemento representa el equipo de ensayo que fuerza la corriente en una prueba experimental real, en este caso el cargador-descargador SkyRC T1000 Maestro como el de la Figura 3-2.
3. **Batería (*Table-Based*).** Constituye el núcleo del modelo eléctrico. Este bloque permite representar el comportamiento de la batería a partir de datos tabulados, incluyendo la relación entre el estado de carga y la tensión en circuito abierto, así como la resistencia interna del sistema
4. **Sensor de corriente**. Mide la corriente que circula por el circuito eléctrico. Se trata de un sensor ideal. Se utiliza para su visualización mediante visualizadores gráficos (*Scopes*), registro de datos o para el posterior análisis de resultados.
5. **Sensor de voltaje**. Mide la tensión en bornes de la batería, magnitud fundamental para analizar la respuesta del sistema y evaluar los efectos de la resistencia interna.
6. ***Solver configuration***. Este bloque es obligatorio en cualquier modelo de Simscape. Su función es definir las condiciones numéricas necesarias para la resolución del sistema de ecuaciones físicas. Este bloque establece el método de resolución, define las condiciones iniciales y garantiza la convergencia numérica del sistema.

5.3.2 Consideraciones del modelo eléctrico

El bloque *Battery (Table Based)* empleado a la hora del modelado de este sistema implementa una representación estática de la celda basada en la tensión en circuito abierto V_0(SOC, T) y de la resistencia interna R_0(SOC, T) y como se ven ambas son dependientes del estado de carga y de la temperatura. Este enfoque permite reproducir correctamente la caída óhmica instantánea asociada a la resistencia interna, pero no contempla fenómenos dinámicos transitorios propios de las baterías de ion-litio.

Sin embargo, las celdas de ion-litio reales, como la utilizada en este trabajo, presentan efectos de polarización electroquímica y procesos de relajación tras variaciones de corriente. Cuando se aplica un escalón de corriente, además de la caída inmediata debida a la resistencia interna, se observa una variación progresiva de la tensión asociada a fenómenos de doble capa y de transferencia de carga y difusión iónica. De igual forma, al cesar la corriente, la tensión no recupera instantáneamente su valor de equilibrio, sino que evoluciona de forma exponencial hacia la OCV.

Para reproducir este comportamiento físico, se incorporó una rama RC en paralelo al modelo base. El condensador representa la capacitancia asociada a la doble capa electroquímica en la interfaz electrodo-electrolito, mientras que la resistencia modela los procesos cinéticos y limitaciones de transporte de masa. Esta estructura introduce una constante de tiempo que permite simular adecuadamente la respuesta transitoria y la relajación observadas experimentalmente. La inclusión de esta rama convierte el modelo estático inicial en un modelo dinámico de primer orden, mejorando significativamente la fidelidad de la simulación frente al comportamiento real de la batería, especialmente en ensayos con pulsos de corriente empleados para la reconstrucción de la curva OCV.

5.3.3 Funcionamiento del modelo eléctrico

El funcionamiento global del modelo puede describirse como una secuencia encadenada de generación, aplicación y medida de señales eléctricas. En primer lugar, el bloque generador de pulsos produce una señal periódica que define los intervalos de carga y descarga de la batería. Esta señal actúa como referencia de control para la fuente de corriente controlada, que es el elemento encargado de imponer la corriente en el circuito, reproduciendo así el comportamiento de un equipo de ensayo que fuerza un determinado perfil de intensidad.

La corriente impuesta circula a través del bloque Batería (*Table-Based*), que modela el comportamiento eléctrico de la celda a partir de datos tabulados del fabricante. Durante la simulación, este bloque calcula de manera interna la evolución del estado de carga, la tensión en bornes y las pérdidas asociadas a la resistencia interna, reproduciendo tanto el comportamiento estático como el dinámico de la batería. De este modo, la respuesta en tensión no depende únicamente del valor instantáneo de corriente, sino también del estado interno de acumulador.

Los bloques de sensor de corriente y sensor de voltaje registran, respectivamente, la corriente y la tensión del sistema sin alterar su funcionamiento, permitiendo obtener las variables eléctricas de interés. Estas señales se envían posteriormente a los bloques de visualización y almacenamiento, donde pueden analizarse y exportarse para su tratamiento posterior.

En conjunto, el modelo actúa como un banco de ensayos virtual en el que la batería se somete a perfiles de corriente controlados y se estudia su respuesta eléctrica. Esto permite analizar el comportamiento dinámico de la celda, validar el modelo frente a datos experimentales y obtener curvas OCV-SOC bajo diferentes condiciones de operación.

5.4 Modelo térmico

La parte térmica del modelo, representada en Figura 5-1 y más en detalle en Figura 5-4 en color naranja, reproduce tanto la generación interna de calor en la batería como su interacción con el entorno. Además, incorpora un subsistema específico destinado a imponer una temperatura controlada, simulando los ensayos realizados en la cámara isotérmica con control PID.

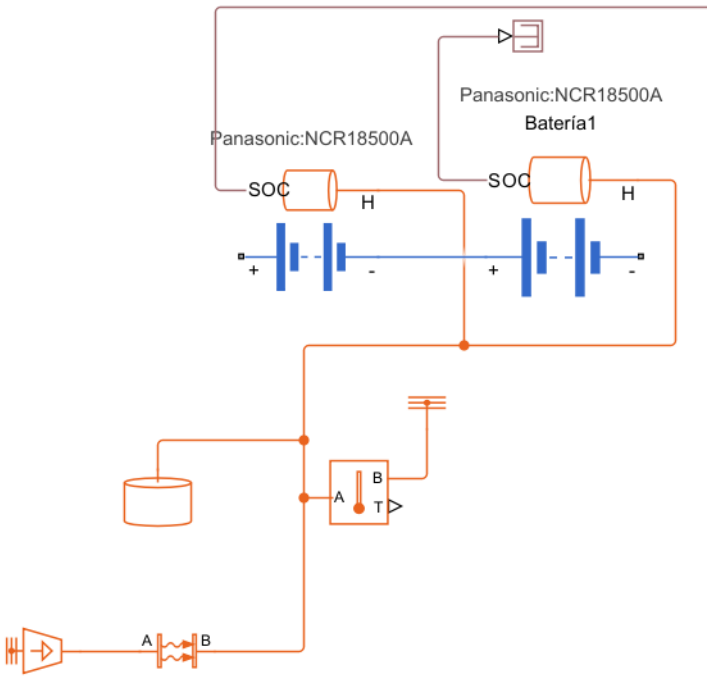


Figura 5-4. Parte térmica del modelo electrotérmico.

5.4.1 Componentes del modelado térmico

El modelo térmico se construye mediante la interconexión de varios bloques de Simscape, cada uno encargado de representar los fenómenos térmicos asociados al funcionamiento de la batería, así como el intercambio de calor con el entorno y el control de la temperatura del sistema. A continuación, se describen los componentes del modelo térmico.

1. **Puerto térmico H del bloque *Battery***. El bloque *Battery (Table-Based)* dispone de un puerto térmico (H) que permite acoplar el dominio eléctrico con el térmico. A través de este puerto se introduce en la red térmica la potencia generada por las pérdidas internas de la batería, principalmente debidas al efecto Joule. Este puerto es fundamental para garantizar el acoplamiento electrotérmico del modelo.
2. **Bloque *Thermal Mass***. Este bloque representa la capacidad térmica equivalente de la batería, modelando la inercia térmica del sistema frente a variaciones de temperatura. Su comportamiento depende de la masa térmica y del calor específico del sistema, determinando la velocidad de respuesta térmica ante la generación de calor.
3. **Sensor de temperatura**. Mide la temperatura del nodo térmico asociado a la batería. Es un sensor ideal que no altera el comportamiento del sistema y permite exportar la señal de temperatura hacia el entorno Simulink para su visualización y análisis.
4. **Bloque de intercambio térmico con el entorno**. En condiciones naturales, la batería intercambiaría calor con el ambiente mediante una resistencia térmica. Este mecanismo está representado mediante el bloque de transferencia térmica, que determina la disipación de calor hacia el exterior.
   Este elemento modela la evacuación de calor generada por la diferencia de temperatura batería-ambiente y la conductancia térmica definida.
5. **Fuente térmica controlada (control de temperatura).** Este bloque permite imponer una temperatura determinada al sistema mediante la introducción o extracción de calor en el nodo térmico. Su función es reproducir condiciones térmicas controladas, equivalentes a las de la cámara isoterma experimentalmente desarrollada.

5.4.2 Funcionamiento del modelado térmico

El modelo térmico implementado reproduce el balance energético de la batería, considerando tanto la generación interna de calor como los mecanismos de transferencia térmica con el entorno.

Cuando circula corriente por la celda, las pérdidas internas asociadas principalmente al efecto Joule generan una potencia térmica. Esta potencia se transfiere al dominio térmico a través del puerto H del bloque *Battery*, introduciéndose en el nodo térmico del sistema. Como consecuencia, se produce un incremento de temperatura en la masa térmica, cuya evolución depende de la capacidad térmica equivalente del sistema.

De forma simultánea, el modelo contempla la disipación de calor hacia el entorno mediante el bloque de transferencia térmica, que representa los mecanismos de intercambio térmico en función de la diferencia de temperatura entre la batería y el ambiente.

No obstante, a diferencia de un modelo térmico puramente pasivo, en este caso se incorpora un sistema activo de control térmico que permite imponer una temperatura de funcionamiento determinada. Para ello, en primer lugar, se define una temperatura objetivo o de consigna. A partir de esta referencia, la fuente térmica controlada actúa introduciendo o extrayendo calor del nodo térmico en función del estado del sistema. De este modo, el sistema compensa automáticamente tanto la generación interna de calor debida a las pérdidas eléctricas como las pérdidas térmicas hacia el entorno.

Como resultado, aunque la batería genere calor durante los procesos de carga o descarga, el modelo permite mantener la temperatura aproximadamente constante en torno al valor de consigna. Este comportamiento reproduce las condiciones experimentales de una cámara isoterma, en la que la temperatura se controla activamente.

Este planteamiento resulta especialmente útil para analizar la influencia de la temperatura sobre el comportamiento eléctrico de la batería, como su efecto en las curvas OCV-SOC o en la resistencia interna, garantizando la coherencia entre el entorno de simulación y los ensayos experimentales realizados.

5.5 Interacción modelo eléctrico y modelo térmico

El modelo implementado constituye un sistema electrotérmico acoplado, en el que ambos dominios físicos interactúan de manera bidireccional. Por un lado, el comportamiento eléctrico de la batería da lugar a la generación de pérdidas internas, principalmente asociadas a la resistencia interna y al paso de corriente. Estas pérdidas se traducen en una potencia térmica que se transfiere al dominio térmico a través del puerto H del bloque *Battery*, alimentando así el modelo térmico.

Como consecuencia, la evolución de la temperatura no es impuesta arbitrariamente, a no ser que se le quiera imponer, sino que responde al balance entre la potencia generada eléctricamente y la capacidad de disipación del sistema. Este incremento de temperatura puede modificar, a su vez, el comportamiento eléctrico de la batería si el modelo incorpora dependencias térmicas en sus parámetros característicos, como la resistencia interna, la capacidad efectiva o la curva OCV-SOC. De este modo, la temperatura deja de ser una variable secundaria y a pasa a formar parte activa de la dinámica del sistema.

En los ensayos desarrollados a lo largo de este trabajo, el subsistema térmico se utiliza principalmente para reproducir condiciones ambientales controladas, equivalentes a las de una cámara isoterma como el expuesto en Figura 3-3. Esto permite fijar una temperatura concreta y analizar la respuesta eléctrica de la batería bajo distintos escenarios térmicos, manteniendo constate el perfil de corriente aplicado. De esta forma, cualquier variación observada en la tensión, en la evolución del SOC o en la respuesta dinámica puede atribuirse exclusivamente al efecto de la temperatura, evitando que otros factores operativos influyan en el análisis.

Con el objetivo de ilustrar el funcionamiento interno del modelo electrotérmico desarrollado, en la Figura 5-5 se presentan las principales variables del sistema durante una simulación completa. En dicha

figura se muestran la intensidad aplicada, la tensión en bornes de la batería, la evolución del estado de carga y la temperatura del sistema a lo largo del tiempo.

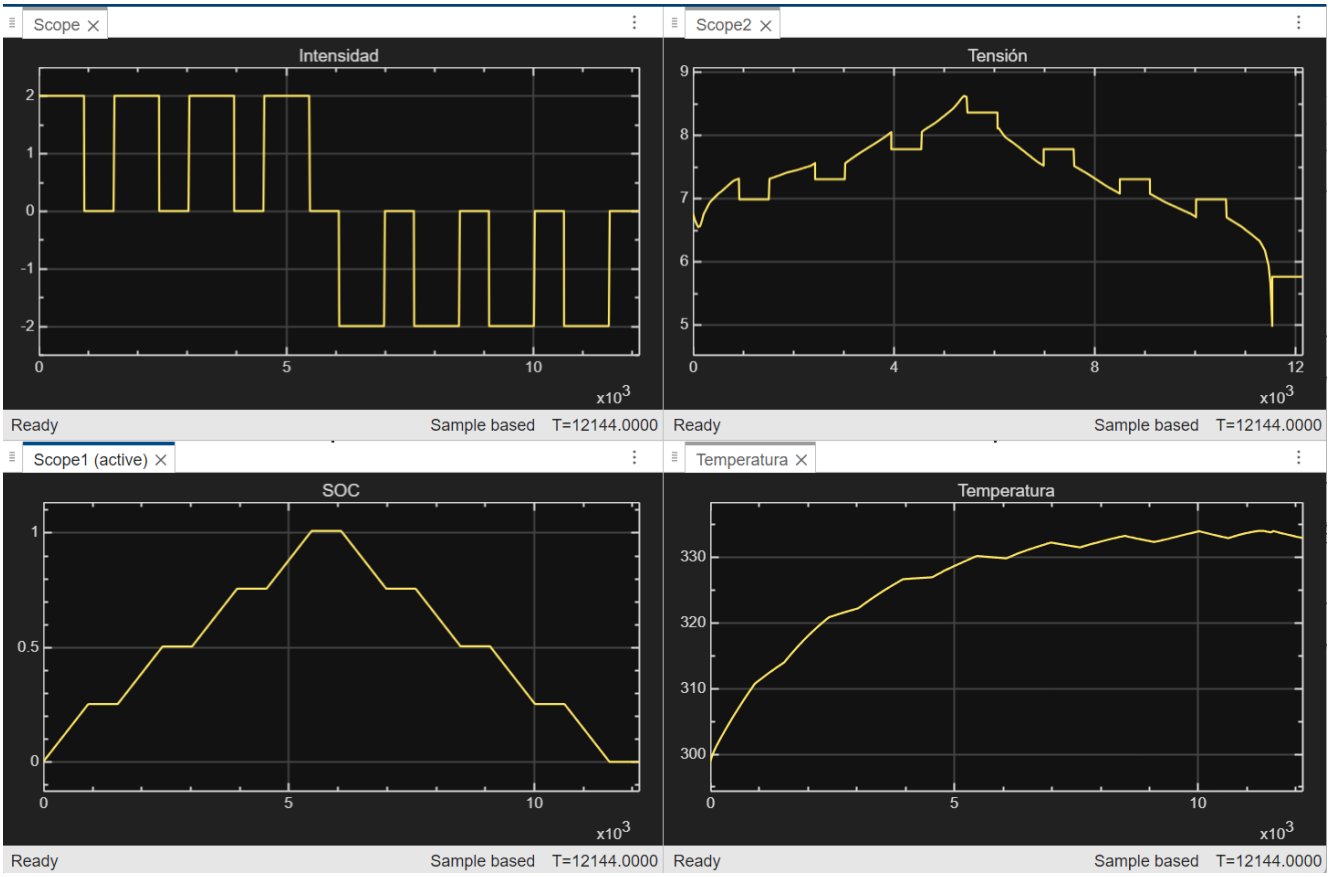


Figura 5-5. Graficas que representan el funcionamiento interno del modelo electrotérmico [Fuente propia].

Para comprobar la funcionalidad del modelo se grafican los principales valores y se ve como la señal de corriente aplicada reproduce el perfil de carga y descarga definido mediante el Signal Editor, compuesto por pulsos de corriente positivos y negativos separados por intervalos de reposo. Estos periodos de corriente nula permiten que la batería alcance condiciones próximas al equilibrio electroquímico, lo que resulta fundamental para la obtención posterior de los puntos de la curva OCV–SOC.

Como consecuencia de este perfil de corriente, la tensión en bornes de la batería evoluciona siguiendo una tendencia creciente durante los procesos de carga y decreciente durante las fases de descarga. Además, se observan variaciones instantáneas asociadas a la resistencia interna de la batería y a la dinámica representada mediante la rama RC del modelo.

Por su parte, el estado de carga muestra una evolución coherente con el perfil de corriente aplicado, aumentando progresivamente durante las fases de carga y disminuyendo durante las fases de descarga. Esta variable es calculada internamente por el modelo a partir de la integración de la corriente, permitiendo conocer en cada instante el nivel de energía almacenada en la batería.

Finalmente, la gráfica de temperatura refleja el comportamiento térmico del sistema. A medida que circula corriente por la batería, se generan pérdidas internas que se transforman en calor, produciendo un incremento gradual de la temperatura. Este fenómeno evidencia el acoplamiento entre el modelo eléctrico y el modelo térmico, ya que las pérdidas eléctricas se traducen directamente en generación de calor dentro del sistema. La parte térmica del modelo compensará la temperatura interior de la batería representada en la Figura 5-5 con la temperatura del sistema, como si de la cámara isoterma de la Figura 3-4 se tratase.

En conjunto, estas variables permiten visualizar de forma clara la interacción entre los fenómenos eléctricos y térmicos que gobiernan el funcionamiento de la batería dentro del modelo desarrollado.

5.6 Curvas SOC-OCV obtenidas de la simulación

En este apartado se analizan las curvas SOC–OCV obtenidas mediante el modelo electrotérmico desarrollado para dos condiciones de temperatura diferentes. Con el objetivo de evaluar la influencia térmica en el comportamiento eléctrico de la batería, los ensayos se han realizado a 20 °C y 55 °C, correspondientes a valores representativos dentro del rango de operación del modelo.

La elección de estas temperaturas permite estudiar el sistema en condiciones claramente diferenciadas, donde es posible observar variaciones en parámetros eléctricos como la resistencia interna y los fenómenos de polarización. A partir de estas simulaciones se obtienen las curvas SOC–OCV, que posteriormente se comparan con los resultados experimentales para validar el modelo.

Las gráficas se han generado mediante un script de postprocesado en MATLAB que extrae las señales de estado de carga (sim_SOC) y tensión (sim_V) a partir de la variable de salida de Simulink®, garantizando la coherencia entre los datos simulados y su representación.

5.6.1 Ensayo de carga y descarga simulado a 20 ºC

La gráfica obtenida en la Figura 5-6 representa la curva característica de carga de las dos celdas de la batería de 7,4V frente a su estado de carga. En el tramo inicial, comprendido entre el 0% y el 5% del SOC, se observa una caída pronunciada de la tensión que alcanza valores cercanos a 7V. Este fenómeno no responde a una descarga real del dispositivo, sino al inicio de activación del modelo electrotérmico ya que se refleja la estabilización de los gradientes iónicos y la caída óhmica inmediata al aplicar un pulso de corriente de carga desde un estado previo de reposo.

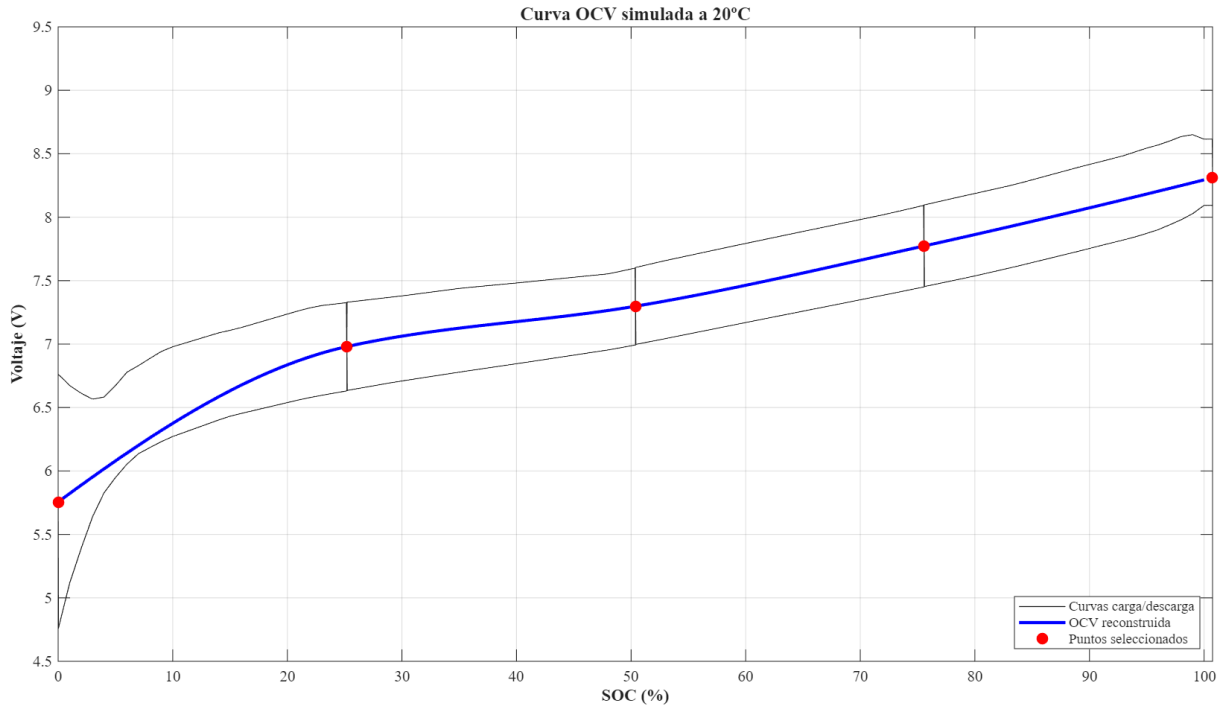


Figura 5-6. Curva SOC-OCV a 20 ºC obtenida con modelo Simscape.

A lo largo de la zona central de la simulación, la tensión muestra un crecimiento sostenido y proporcional al incremento del SOC, situándose mayoritariamente por encima del valor nominal del pack de dos celdas en serie. Las líneas verticales representan los periodos de relajación programados en el generador de pulsos; cuando la corriente de carga cesa momentáneamente, la tensión de la batería

tiene a estabilizarse en su valor de circuito abierto, recuperando el nivel de carga en cuanto se reanuda el pulso.

Finalmente, al aproximarse al 100% de SOC la curva alcanza su valor máximo, momento en el cual la tensión se estabiliza de forma constante. Esta meseta indica que el modelo ha alcanzado su límite de saturación de carga definido en los parámetros de las celdas.

5.6.2 Ensayo de carga y descarga simulado a 55 ºC

La Figura 5-7 muestra la curva SOC-OCV obtenida a una temperatura de 55 °C mediante el modelo implementado en Simulink®. Al igual que en el caso de 20 °C, la tensión se reconstruye a partir de los puntos seleccionados entre las curvas de carga y descarga generadas durante el ensayo con pulsos de corriente. Estos puntos intermedios permiten aproximar el valor de la tensión en circuito abierto para cada nivel de estado de carga.

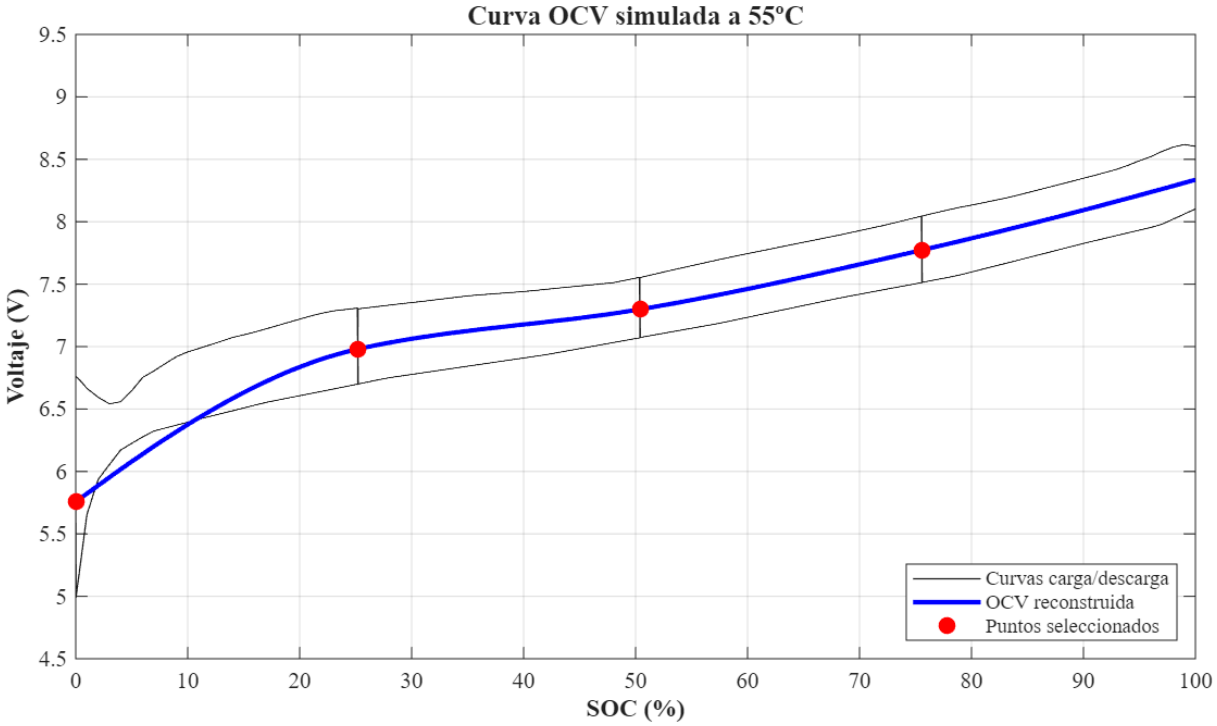


Figura 5-7. Curva SOC-OCV a 55 ºC obtenida con modelo Simscape.

El comportamiento general de la curva mantiene la misma tendencia observada a 20 °C: un aumento progresivo de la tensión a medida que crece el SOC, con una pendiente más pronunciada en la zona de bajo estado de carga y una evolución más suave en la región central de la curva. En el tramo inicial, aproximadamente para valores de estados de carga menores del 10%, se aprecia nuevamente una transición rápida desde los valores mínimos de tensión hacia la zona de funcionamiento estable, fenómeno asociado a la dinámica inicial del modelo electrotérmico y a los efectos de polarización presentes tras la aplicación de los pulsos de corriente.

Al comparar esta curva con la obtenida a 20 °C (Figura 5-6), se observa que ambas presentan prácticamente la misma forma y evolución a lo largo de todo el rango de SOC. Las diferencias de tensión son reducidas y se concentran principalmente en la región de bajo estado de carga, donde la curva a 55 °C muestra valores ligeramente superiores. Este comportamiento se debe a la disminución de la resistencia interna de la batería a temperaturas más elevadas, lo que reduce las pérdidas óhmicas durante los pulsos de corriente y desplaza ligeramente el punto medio entre las curvas de carga y descarga.

En la zona media y alta de SOC, aproximadamente entre el 20% y el 100%, las curvas de 20 °C y 55 °C prácticamente coinciden, lo que indica que la dependencia térmica del modelo afecta

principalmente a los fenómenos resistivos y dinámicos, mientras que la forma global de la relación SOC-OCV permanece prácticamente inalterada.

5.7 Comparación de las curvas experimentales y simuladas

En este apartado se presenta la comparación entre las curvas SOC-OCV obtenidas experimentalmente y las generadas mediante el modelo electrotérmico desarrollado. El objetivo es evaluar el grado de concordancia entre ambos resultados y analizar las posibles diferencias observadas. Esta comparación permite validar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento eléctrico de la batería bajo distintas condiciones de carga.

5.7.1 Análisis de las curvas SOC-OCV simulada y experimental a 20 ºC

La Figura 5-7 muestra la comparación entre la curva SOC-OCV obtenida experimentalmente y la generada mediante el modelo electrotérmico a 20 °C. En términos generales, el modelo reproduce adecuadamente la tendencia global de la relación entre el estado de carga y la tensión en circuito abierto, observándose un incremento progresivo de la tensión a medida que aumenta el SOC.

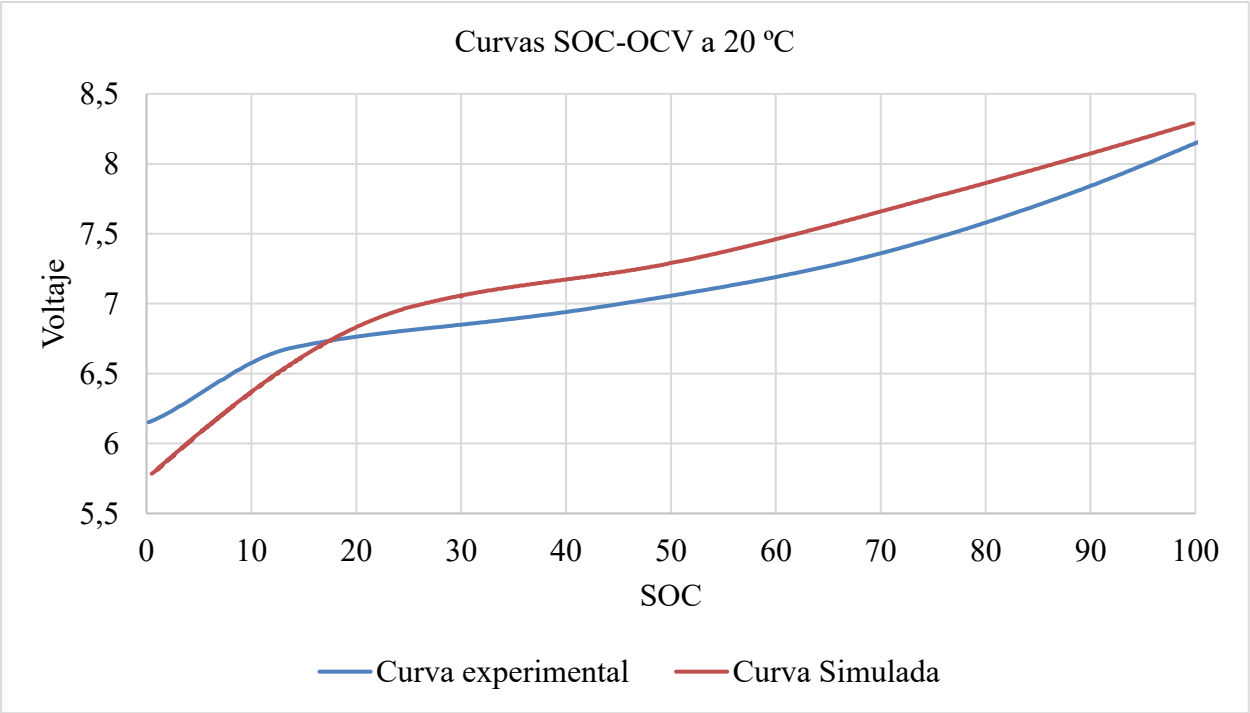


Figura 5-8. Comparación de las curvas SOC-OCV a 20 ºC.

En la zona de bajo estado de carga (SOC inferior al 15%) se aprecian las mayores diferencias entre ambas curvas. En este intervalo, la curva experimental presenta valores de tensión ligeramente superiores a los obtenidos mediante simulación. Este comportamiento puede estar asociado a fenómenos dinámicos presentes en la batería real que no quedan completamente representados en el modelo equivalente utilizado.

A medida que el SOC aumenta, ambas curvas tienden a aproximarse, llegando incluso a cruzarse en torno al 20% de SOC. A partir de este punto, la curva simulada pasa a situarse ligeramente por encima de la experimental.

En la zona media del rango de operación (aproximadamente entre el 30% y el 80% de SOC) se mantiene una pequeña desviación entre ambas curvas. No obstante, la pendiente de las dos representaciones es muy similar, lo que indica que el modelo reproduce correctamente la tendencia general del comportamiento eléctrico de la batería.

Finalmente, en la región de alto estado de carga, las curvas vuelven a aproximarse progresivamente, mostrando una buena concordancia en la zona cercana al 100% de SOC.

A partir de la comparación entre los valores de tensión obtenidos experimentalmente y los generados por el modelo, se ha calculado el error cuadrático medio (RMSE), obteniéndose un valor aproximado de 0,27 V. Este resultado indica la existencia de una desviación moderada entre ambas curvas. No obstante, considerando el rango de tensión de la batería analizada, el error puede considerarse aceptable, ya que el modelo reproduce correctamente la tendencia global de la relación entre el estado de carga y la tensión en circuito abierto.

Las diferencias observadas pueden atribuirse a varios factores. En primer lugar, la batería empleada en los ensayos experimentales no corresponde exactamente al mismo modelo de celda utilizado para parametrizar el modelo, aunque ambas pertenezcan a la tecnología Ion-litio con configuración 2S y capacidad nominal cercana a 2000 mAh. Las características electroquímicas pueden variar entre fabricantes o incluso entre diferentes lotes de fabricación.

En segundo lugar, el modelo equivalente implementado corresponde a un modelo eléctrico simplificado de primer orden, que reproduce adecuadamente el comportamiento global de la batería, pero no contempla todos los fenómenos electroquímicos presentes en una celda real, como procesos de difusión más complejos o efectos de histéresis entre carga y descarga.

Por último, también pueden influir incertidumbres propias del ensayo experimental, como pequeñas desviaciones en la medición de tensión, errores en la estimación del estado de carga o ligeras variaciones en las condiciones térmicas durante la realización de la prueba.

5.7.1 Análisis de las curvas SOC-OCV simulada y experimental a 20 ºC

La Figura 5-9 muestra la comparación entre la curva SOC-OCV obtenida experimentalmente y la generada mediante el modelo electrotérmico a 55 °C. En términos generales, ambas curvas presentan una evolución creciente de la tensión a medida que aumenta el estado de carga, lo que indica que el modelo reproduce adecuadamente la tendencia global del comportamiento de la batería.

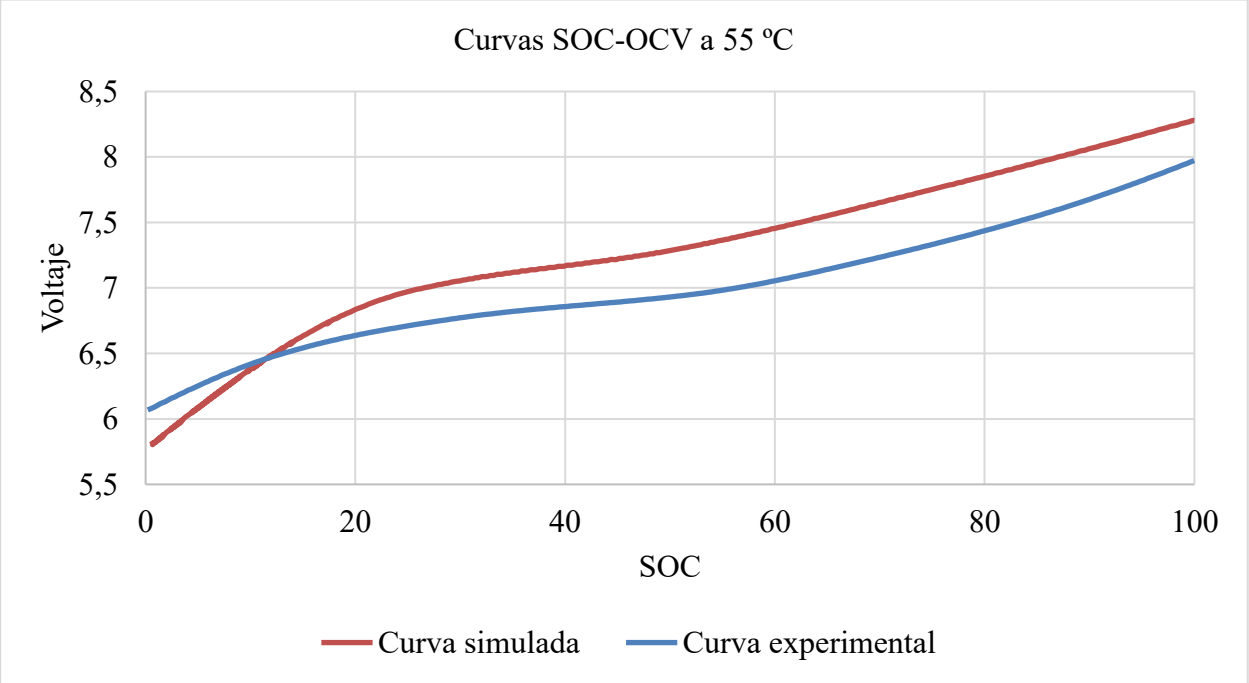


Figura 5-9 Comparación de las curvas SOC-OCV a 55 ºC

En la zona de bajo estado de carga, entre el 10 y 15% de SOC, se observa una diferencia notable entre ambas curvas. En este intervalo, la tensión obtenida mediante simulación presenta valores

ligeramente inferiores a los experimentales en los primeros puntos, aunque ambas curvas tienden rápidamente a aproximarse. Este comportamiento está asociado a la dinámica inicial del sistema y a los efectos transitorios presentes al comienzo del proceso de carga o descarga.

A partir de aproximadamente el 15–20% de SOC, ambas curvas se cruzan y la curva simulada comienza a situarse por encima de la experimental. En esta región inicial-media del estado de carga se aprecia un aumento más pronunciado de la tensión en la simulación, mientras que la curva experimental presenta una evolución más suave.

En la zona media del rango de SOC, entre el 30 y el 70% de SOC, se mantiene una diferencia relativamente constante entre ambas curvas. No obstante, ambas siguen una pendiente similar, lo que indica que el modelo es capaz de capturar correctamente la tendencia general del comportamiento eléctrico de la batería.

Finalmente, en la región de alto estado de carga, superior al 70% de SOC, ambas curvas continúan aumentando de forma progresiva hasta alcanzar los valores máximos de tensión. Aunque la curva simulada mantiene valores ligeramente superiores, la forma general de ambas curvas permanece consistente, reflejando adecuadamente la relación entre el estado de carga y la tensión en circuito abierto a esta temperatura.

Analizando los datos obtenidos a partir de las curvas experimental y simulada se obtiene un valor de RMSE aproximadamente de 0,34 V. Este resultado indica la existencia de una desviación moderada entre ambos conjuntos de datos. Aunque el ajuste no puede considerarse extremadamente preciso, el modelo reproduce adecuadamente la tendencia global del comportamiento de la batería a lo largo de todo el rango de estado de carga.

Las diferencias observadas pueden atribuirse principalmente a la simplificación del modelo equivalente utilizado, así como a las variaciones existentes entre la batería empleada en los ensayos experimentales y la celda utilizada para la parametrización del modelo. Asimismo, la curva OCV empleada en el modelo procede de los datos del fabricante, lo que puede introducir pequeñas discrepancias respecto al comportamiento real de la batería analizada.

5.7.2 Comparación de las curvas SOC-OCV simuladas/experimentales a 20 ºC y 55 ºC

A partir del análisis de las curvas SOC-OCV obtenidas a 20 °C y 55 °C, se observa que ambas presentan una evolución muy similar a lo largo de todo el rango de estado de carga. En los dos casos, la tensión aumenta progresivamente a medida que aumenta el SOC, manteniendo una forma de curva prácticamente equivalente. Esto indica que el modelo es capaz de reproducir adecuadamente la relación general entre el estado de carga y la tensión en circuito abierto de la batería.

No obstante, se aprecian ligeras diferencias entre ambas condiciones térmicas. En general, la curva correspondiente a 55 °C presenta valores de tensión ligeramente superiores para un mismo estado de carga. Este comportamiento es coherente con el funcionamiento de las baterías de ion-litio, ya que el aumento de temperatura tiende a reducir la resistencia interna de la celda, lo que disminuye las pérdidas internas y puede traducirse en valores de tensión ligeramente más elevados.

Además, al comparar las curvas experimentales y simuladas también se observa una diferencia en la separación entre las curvas de carga y descarga. En los resultados experimentales, la distancia entre ambas curvas es mayor, lo que refleja la presencia del fenómeno de histéresis característico de las baterías de ion-litio. Este efecto provoca que, para un mismo estado de carga, la tensión durante el proceso de carga sea ligeramente superior a la registrada durante la descarga. En el modelo simulado esta separación es menor, ya que el modelo equivalente implementado no incluye explícitamente un término específico que represente el comportamiento de histéresis de la celda. En su lugar, el modelo se basa en una representación simplificada mediante una resistencia interna y una rama RC que reproduce parcialmente los efectos dinámicos de polarización, pero no captura completamente las diferencias entre

los procesos de carga y descarga. Como consecuencia, la histéresis observada en la simulación resulta inferior a la registrada experimentalmente.

Para cuantificar la precisión del modelo, se ha calculado el error cuadrático medio (RMSE), tal y como se ha hecho en el apartado 4.7, entre las curvas experimentales y simuladas en cada condición térmica. En el caso del ensayo a 20 °C, el valor obtenido es RMSE≈0,27 V, mientras que para 55 °C se obtiene RMSE≈0,34 V. Estos resultados indican que el modelo reproduce con mayor precisión el comportamiento de la batería a 20 °C, mientras que a temperaturas más elevadas la desviación entre el modelo y los datos experimentales aumenta ligeramente. Con estos resultados se puede decir que a temperaturas menores el error entre las curvas experimental y simuladas disminuye.

A pesar de estas diferencias, los valores obtenidos pueden considerarse aceptables dentro del contexto de un modelo equivalente simplificado, ya que permiten reproducir correctamente la tendencia global del comportamiento de la batería en diferentes condiciones de temperatura. Las discrepancias observadas pueden atribuirse principalmente a la simplificación del modelo eléctrico utilizado, a las posibles diferencias entre la batería empleada en los ensayos experimentales y la celda utilizada para la parametrización del modelo, así como a las incertidumbres inherentes a cualquier procedimiento de medida experimental.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que el modelo electrotérmico reproduce de forma coherente la evolución de la tensión con el estado de carga bajo diferentes condiciones de temperatura. La capacidad del modelo para estimar la relación SOC-OCV y su variación térmica resulta especialmente relevante en aplicaciones de gestión de baterías, ya que estos parámetros constituyen una de las principales fuentes de información utilizadas por los sistemas de gestión de baterías (BMS) para estimar el estado de carga y supervisar el funcionamiento de la batería. En este contexto, el modelo desarrollado puede emplearse como base para la implementación y validación de algoritmos de estimación y control dentro de un BMS, aspecto que se aborda en el siguiente apartado.

5.8 Aplicación del modelo electrotérmico en el desarrollo de sistemas de gestión de baterías (BMS)

Con el objetivo de explorar posibles aplicaciones del modelo electrotérmico desarrollado, en este apartado se plantea su utilización como herramienta de apoyo en el desarrollo de sistemas de gestión de baterías (BMS). Este tipo de modelos permite reproducir de forma coherente el comportamiento eléctrico y térmico de la batería a partir de variables como la corriente, la tensión, el estado de carga (SOC) y la temperatura.

El uso de modelos electrotérmicos resulta especialmente interesante en este contexto, ya que permite analizar en un entorno de simulación cómo evolucionan estas variables bajo distintas condiciones de operación. De este modo, el modelo puede emplearse como base para estudiar de forma conceptual la integración de la batería dentro de un sistema de gestión y analizar el papel de magnitudes como el SOC, la tensión o la temperatura en la supervisión y control del sistema.

5.8.1 Introducción a los sistemas de gestión de baterías

Un Sistema de Gestión de Baterías es un conjunto entre hardware y software diseñado para controlar la carga y descarga de una baterías, asegurando que opere de manera confiable, eficiente y segura [4]. Con la proliferación de los vehículos eléctricos y los sistemas de almacenamiento de energía renovable, el BMS se ha vuelto esencial para optimizar la vida útil del sistema y protegerlo contra fallos catastróficos.

Las baterías modernas, especialmente las de ion-litio, ofrecen altas prestaciones pero son muy inestables si operan fuera de sus límites de seguridad [44]. Un abuso mecánico, eléctrico o térmico puede desencadenar una reacción en cadena conocida como fuga térmica que no es más que una reacción en cadena que puede derivar en incendios o explosiones. Es por ello que el BMS actúa como una especie

de vigilante constante que mantiene a cada celda de la batería dentro de su zona de operación segura (SOA), delimitada por parámetros críticos como el voltaje, la intensidad o la temperatura [44] [45].

Las tareas de un sistema de gestión de baterías se dividen en cuatro pilares fundamentales:

1. Monitorización de parámetros. Es la función básica para la toma de medidas de tensión tanto de cada celda individual como del pack completo, de la intensidad y de temperatura [45]. Sin la toma precisa de estos datos, el sistema no podría tomar decisiones con suficiente seguridad.
2. Gestión y protección. Un BMS implementa algoritmos para evitar sobrecargas, descargas profundas y cortocircuitos. El BMS deberá corregir los desequilibrios naturales de voltaje entre celdas mediante métodos pasivos, disipando energía o mediante resistencias, o activos, es decir, redistribuyendo la carga entre ellas [45]
3. Evaluación de estados. El sistema BMS tiene la característica de que estima parámetros que no se pueden medir directamente, como el estado de carga, el estado de salud y la vida útil restante [46].
4. Comunicación. El sistema BMS debe ser capaz de comunicarse con los demás sistemas en los que se esté implementado [45].

En consecuencia, los sistemas BMS se han consolidado como un componente esencial en el desarrollo de baterías, ya que permiten combinar seguridad, eficiencia energética y gestión inteligente de almacenamiento [4].

5.8.2 Implementación del modelo electrotérmico en un BMS

El modelo electrotérmico desarrollado en este trabajo permite reproducir de forma acoplada el comportamiento eléctrico y térmico de una batería de ion-litio, a partir de variables medibles como la corriente, la tensión y la temperatura. A partir de estas magnitudes, el modelo es capaz de estimar variables internas relevantes como el estado de carga (SOC), la potencia disipada o la evolución térmica del sistema.

En los sistemas reales de gestión de baterías (BMS), no todas las variables de interés pueden medirse directamente mediante sensores. Magnitudes como el estado de carga, la resistencia interna o la potencia disponible deben ser estimadas a partir de modelos y algoritmos, lo que introduce incertidumbre en la supervisión del sistema.

En este contexto, el modelo electrotérmico desarrollado constituye una herramienta útil para complementar la información disponible en un BMS, permitiendo obtener estimaciones más precisas del estado de la batería bajo distintas condiciones de operación.

A partir de estas capacidades, resulta de interés analizar cómo este modelo puede integrarse dentro de un sistema de gestión de baterías y qué funciones puede desempeñar en la supervisión, control y optimización del sistema.

5.8.1 Aplicación del modelo desarrollado en un BMS

La Figura 5-10 muestra un esquema conceptual de la integración del modelo electrotérmico desarrollado dentro de un sistema de gestión de baterías (BMS), representando el flujo de información entre el sistema físico, el modelo y los algoritmos de control.

En primer lugar, la batería proporciona al BMS las variables que pueden medirse directamente mediante sensores, principalmente la tensión, la corriente y la temperatura, representadas en la parte superior del esquema. Estas magnitudes constituyen las entradas del modelo electrotérmico.

A partir de estas variables, el modelo reproduce el comportamiento acoplado eléctrico y térmico de la batería, tal y como se muestra en el bloque central de la Figura Este modelo permite obtener estimaciones de variables internas no medibles directamente.

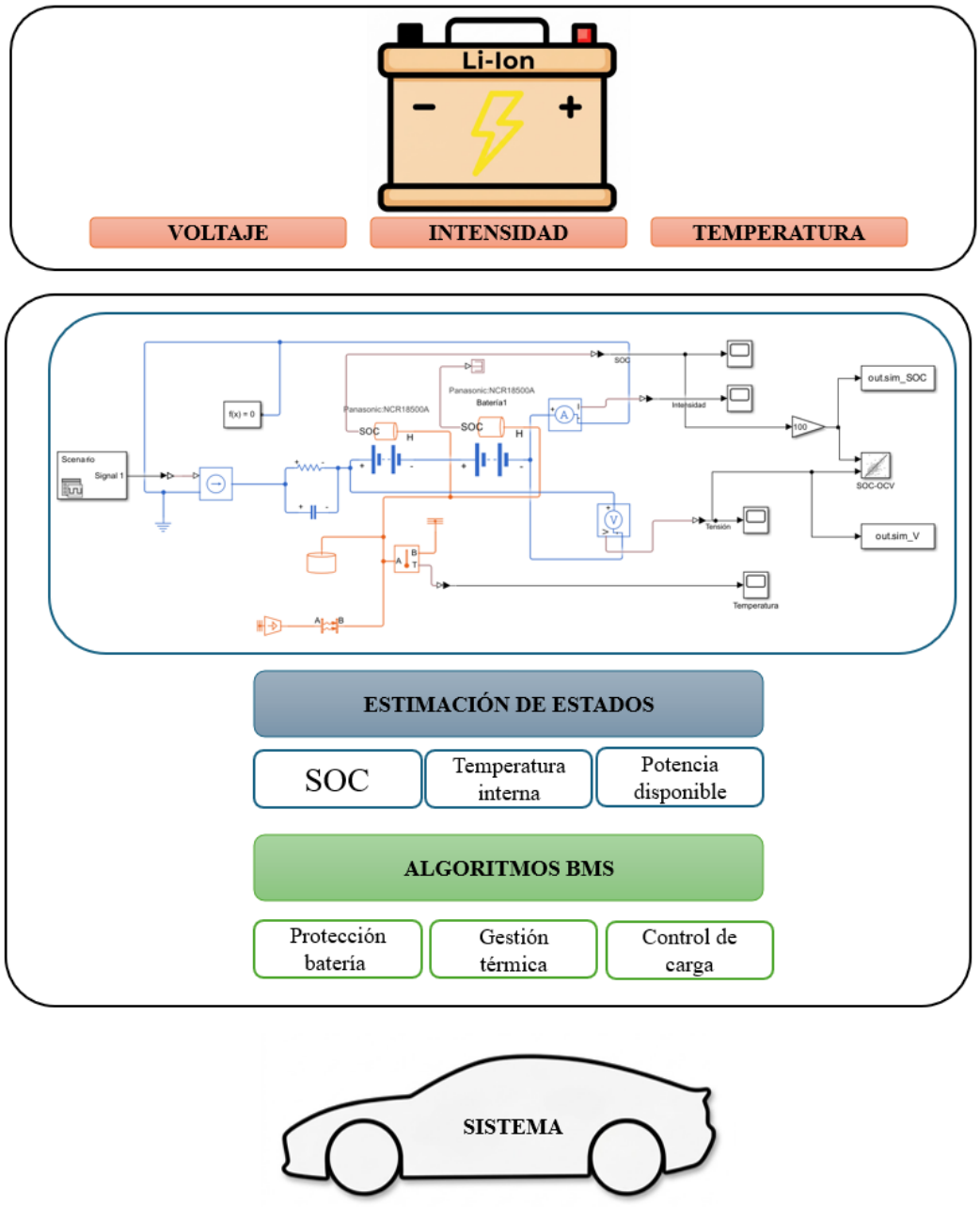


Figura 5-10 Implementación del modelo electrotérmico en un sistema de gestión de baterías [Fuente: creación propia]

En particular, el bloque de estimación de estados proporciona magnitudes clave como el estado de carga (SOC), la temperatura interna y la potencia disponible, las cuales resultan fundamentales para la supervisión del sistema.

Estas estimaciones son utilizadas por los algoritmos del BMS, representados en la parte inferior del esquema, para llevar a cabo funciones de protección, gestión térmica y control de los procesos de carga y descarga.

Finalmente, las acciones generadas por el BMS se aplican sobre el sistema físico, cerrando el lazo de control y garantizando un funcionamiento seguro y eficiente de la batería dentro del sistema global.

De este modo, el modelo electrotérmico actúa como un bloque intermedio que transforma variables medibles en información relevante para la toma de decisiones, permitiendo mejorar la precisión, la seguridad y el rendimiento del sistema.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Introducción

En este capítulo se presentan las principales conclusiones sobre el trabajo realizado. En primer lugar, se evalúa el grado de cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de este trabajo. Posteriormente, se proponen algunas líneas futuras de trabajo que podrían permitir ampliar y mejorar el modelo desarrollado.

6.2 Conclusiones

Los resultados obtenidos a lo largo del presente trabajo permiten extraer una serie de conclusiones relevantes en relación con el comportamiento electrotérmico de las baterías de ion-litio y la validez del modelo desarrollado.

En primer lugar, se ha diseñado y construido un banco de ensayos capaz de realizar ciclos controlados de carga y descarga bajo condiciones térmicas reguladas. Este sistema experimental ha permitido obtener datos fiables del comportamiento eléctrico de la batería y analizar de forma sistemática la influencia de la temperatura en su funcionamiento.

A partir de los ensayos realizados, se han obtenido las curvas SOC–OCV y se ha estudiado la variación de la tensión en circuito abierto con la temperatura. Los resultados muestran que, a medida que aumenta la temperatura, la tensión en circuito abierto tiende a disminuir ligeramente para un mismo estado de carga, observándose en el rango de 20 ºC a 50 ºC un desplazamiento del orden del 2 % al 3 % del valor de tensión del sistema.

Asimismo, se ha comprobado que la influencia térmica no es uniforme a lo largo del estado de carga. En los extremos del SOC, la tensión presenta una mayor sensibilidad a las variaciones de temperatura, con diferencias cercanas al 0,8 %, mientras que en la zona intermedia del rango de operación el comportamiento resulta más estable, con variaciones comprendidas aproximadamente entre el 0,3 % y el 0,5 %.

Por otro lado, el incremento de la temperatura afecta de forma significativa al comportamiento resistivo de la batería. Los resultados experimentales muestran que la resistencia interna disminuye a medida que aumenta la temperatura, lo que reduce las pérdidas óhmicas y facilita los procesos electroquímicos en el interior de la celda. Este efecto se traduce en una respuesta eléctrica más suave y en una reducción parcial de los fenómenos de polarización durante los procesos de carga y descarga.

A partir de los datos experimentales obtenidos, se ha realizado un ajuste matemático de la relación SOC–OCV, obteniéndose una representación continua de la curva con un error cuadrático medio del

orden de milivoltios y un coeficiente de determinación elevado, lo que confirma la buena concordancia entre el modelo matemático y los datos experimentales.

En paralelo, se ha implementado un modelo electrotérmico en el entorno de simulación Simulink®, utilizando la librería Simscape Electrical, que permite integrar el comportamiento eléctrico y térmico del sistema. La comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante simulación muestra que el modelo reproduce adecuadamente la tendencia global del comportamiento de la batería, obteniéndose errores cuadráticos medios del orden de 0,27 V a 20 ºC y 0,34 V a 50 ºC.

Estos resultados indican que, si bien el modelo no reproduce con exactitud absoluta el comportamiento de la batería, sí es capaz de capturar de forma coherente las principales tendencias electrotérmicas del sistema. Las diferencias observadas pueden atribuirse a las simplificaciones inherentes al modelo equivalente empleado, así como a la utilización de una celda representativa en la parametrización y a las incertidumbres asociadas a los ensayos experimentales.

En conjunto, el trabajo desarrollado demuestra la viabilidad del uso combinado de ensayos experimentales y modelos electrotérmicos simplificados como herramienta para el análisis del comportamiento de baterías de ion-litio. Este enfoque permite comprender la influencia de la temperatura sobre variables clave como la tensión, la resistencia interna y el estado de carga, constituyendo una base sólida para futuros desarrollos orientados a mejorar la precisión del modelo y su aplicación en sistemas de gestión de baterías.

6.3 Líneas futuras

Sobre el trabajo realizado, se identifican diversas líneas futuras que podrían permitir ampliar y mejorar el estudio desarrollado.

Una primera línea de trabajo consistiría en mejorar el sistema de adquisición de datos experimentales, mediante el desarrollo e implementación de un sistema de medida basado en Arduino que permita registrar con mayor precisión la tensión de la batería durante los ensayos. Una instrumentación más precisa permitiría reducir las incertidumbres asociadas a las medidas experimentales y obtener curvas SOC-OCV con una mayor resolución.

Otra posible mejora sería ampliar el rango de temperaturas analizado, modificando la cámara térmica controlada desarrollada en este trabajo para permitir la realización de ensayos a temperaturas más extremas. De esta forma sería posible estudiar el comportamiento de la batería en condiciones más alejadas del rango nominal de operación, donde los efectos térmicos sobre los parámetros eléctricos suelen ser más pronunciados.

Asimismo, resultaría de interés analizar de forma conjunta la influencia de la temperatura y la intensidad de carga o descarga sobre el comportamiento de la batería. En este sentido, la realización de ensayos a diferentes corrientes permitiría estudiar cómo varía la relación SOC-OCV bajo distintas condiciones de solicitación eléctrica y térmica, obteniendo una caracterización más completa del sistema.

Por último, una línea futura relevante sería desarrollar el modelo electrotérmico utilizando los parámetros específicos de la batería empleada en los ensayos experimentales, a partir de los datos proporcionados por el fabricante. Esto permitiría reducir las discrepancias observadas entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante simulación, mejorando la fidelidad del modelo desarrollado.

El desarrollo de estas líneas futuras permitiría profundizar en la caracterización electrotérmica de la batería y mejorar la precisión del modelo desarrollado para su posterior aplicación en otros sistemas como los sistemas de gestión de baterías.

7 BIBLIOGRAFÍA

[1] V. Quintero, O. Che, E. Ching, O. Auciello, y E. de Obaldía, «Baterías de ion litio: características y aplicaciones», *Lithium Ion Batter.*.

[2] S. Lv, X. Wang, W. Lu, J. Zhang, y H. Ni, «The Influence of Temperature on the Capacity of Lithium Ion Batteries with Different Anodes», *Energies*, vol. 15, n.º 1, p. 60, dic. 2021, doi: 10.3390/en15010060.

[3] G. O. Esteban, «Caracterización de baterías de Litio para el estudio del envejecimiento».

[4] D. J. R. Patarroyo, R. A. G. Porras, y A. F. C. Fajardo, «Sistemas de gestión de baterías (BMS) y su importancia para los sistemas de almacenamiento de baterías (BESS)», 2015.

[5] D. Linden y T. B. Reddy, *Handbook of batteries*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

[6] «State_of_charge_estimation_of_lithium-ion_battery_».

[7] X. Hu, S. Li, y H. Peng, «A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries», *J. Power Sources*, vol. 198, pp. 359-367, ene. 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.10.013.

[8] J. Xu, C. C. Mi, B. Cao, J. Deng, Z. Chen, y S. Li, «The State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Based on a Proportional-Integral Observer», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, n.º 4, pp. 1614-1621, may 2014, doi: 10.1109/TVT.2013.2287375.

[9] D. Carlier, I. Saadoune, M. Menetrier, y C. Delmas, «Lithium Electrochemical Deintercalation from O2-LiCoO2».

[10] M. Yoshio, R. J. Brodd, y A. Kozawa, Eds., *Lithium-Ion Batteries: Science and Technologies*. New York, NY: Springer New York, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-34445-4.

[11] W. Zhou, Y. Zheng, Z. Pan, y Q. Lu, «Review on the Battery Model and SOC Estimation Method», *Processes*, vol. 9, n.º 9, p. 1685, sep. 2021, doi: 10.3390/pr9091685.

[12] T. Zangato, A. Osmani, y P. Alizadeh, «Data-Driven Policy Mapping for Safe RL-based Energy Management Systems», 19 de junio de 2025, *arXiv*: arXiv:2506.16352. doi: 10.48550/arXiv.2506.16352.

[13] J. Zhang y J. Lee, «A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery», *J. Power Sources*, vol. 196, n.º 15, pp. 6007-6014, ago. 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.03.101.

[14] A. J. Bard y L. R. Faulkner, *Electrochemical methods: fundamentals and applications*, 2. edition. New York Weinheim: Wiley, 2001.

[15] P. Atkins, J. D. Paula, y J. Keeler, *Atkins' Physical Chemistry*, 12.ª ed. Oxford University Press, 2022. doi: 10.1093/hesc/9780198847816.001.0001.

[16] S. Sampathkumar, S. Paranthaman, y L.-Y. Kuo, «Insights into stability, kinetic, and electrochemical performance of silicon-doped boron carbon nitride as a promising anode material for lithium-ion battery: First-principles calculations», *J. Energy Storage*, vol. 139, p. 118534, dic. 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.118534.

[17] D. O. Santos, D. G. Fernandez, y V. Manuel, «Modelado desde primeros principios electroquímicos de celdas de iones de litio».
[18] A. A.-H. Hussein y I. Batarseh, «An overview of generic battery models», en *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA: IEEE, jul. 2011, pp. 1-6. doi: 10.1109/PES.2011.6039674.
[19] H. He, R. Xiong, y J. Fan, «Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach», *Energies*, vol. 4, n.º 4, pp. 582-598, mar. 2011, doi: 10.3390/en4040582.
[20] J. Wehbe y N. Karami, *Battery equivalent circuits and brief summary of components value determination of lithium ion: A review*. 2015, p. 49. doi: 10.1109/TAEECE.2015.7113598.
[21] «Sanchez - Modelado de sistemas de gestion termica en baterias para vehiculos hibridos mediante el...»
[22] J. E. R. Marambio, W. C. Muñoz, R. P. Behnke, y A. O. Bernardin, «MODELAMIENTO TÉRMICO DE EMPAQUES DE BATERÍAS DE LITIO».
[23] D. Bernardi, E. Pawlikowski, y J. Newman, «A General Energy Balance for Battery Systems», *J. Electrochem. Soc.*, vol. 132, n.º 1, pp. 5-12, ene. 1985, doi: 10.1149/1.2113792.
[24] A. A. Pesaran, «Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions».
[25] B. Battery, «Sistema de gestión térmica de baterías de vehículos eléctricos: explicación de la refrigeración por aire», Bonnen Battery. Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.bonnenbatteries.com/es/ev-battery-thermal-management-system-liquid-cooling-system-for-lithium-ion-battery/
[26] «Sistemas de gestión térmica de baterías (BTMS) para aplicaciones de movilidad». Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://cicenergigune.com/es/blog/sistemas-gestion-termica-baterias-btms-vehiculo-electrico
[27] H. Pico, I. Pazmiño, y B. Ponce, «Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo teórico validado en laboratorio», *Rev. Téc. Energ.*, vol. 17, n.º 2, pp. 83-91, ene. 2021, doi: 10.37116/revistaenergia.v17.n2.2021.432.
[28] S. Kang, H. Tu, y H. Fang, «BattBee: Equivalent circuit modeling and early detection of thermal runaway triggered by internal short circuits for lithium-ion batteries», *Appl. Energy*, vol. 404, p. 127016, feb. 2026, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.127016.
[29] E. Barreiro Rius, «Análisis de las partículas generadas por el fenómeno de fuga térmica en baterías de ion-litio», *Univ. Politécnica Valencia*, vol. 18, n.º 1, p. ix, sep. 2014, doi: 10.4995/ia.2014.3293.
[30] «TD_YoanaFernandezPulido».
[31] M. I. B. Flores, «DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE ESTADO DE SALUD DE BATERÍAS DE ION-LITIO, MEDIANTE EL USO DE ESPECTROSCOPÍA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA Y CARACTERIZACIÓN DEL TÉRMINO DE LA VIDA ÚTIL BASADO EN LA GENERACIÓN DE CALOR DADA POR LA IMPEDANCIA INTERNA».
[32] J. Huet Sanchis, «Desarrollo de una carga electrónica regulable para el análisis y clasificación de baterías de ion litio», *Ing. Agua*, vol. 18, n.º 1, p. ix, sep. 2014, doi: 10.4995/ia.2014.3293.
[33] «Estudio de la degradación de las baterias de ion litio».
[34] A. Conde Velsaco, «ESTUDIO, ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN MODELO GENÉRICO DE ENVEJECIMIENTO PARA BATERÍAS DE ION-LITIO. APLICACIÓN A LFP Y NMC».
[35] D. L. J. Jiménez, «GESTIÓN ÓPTIMA DE LA ENERGÍA DE UNA NANO-RED PARA MINIMIZAR LA DEGRADACIÓN DE UN PACK MODULAR DE BATERÍAS DE ION-LITIO».
[36] J. Vetter *et al.*, «Ageing mechanisms in lithium-ion batteries».
[37] P. Keil *et al.*, «Calendar Aging of Lithium-Ion Batteries: I. Impact of the Graphite Anode on Capacity Fade», *J. Electrochem. Soc.*, vol. 163, n.º 9, pp. A1872-A1880, 2016, doi: 10.1149/2.0411609jes.
[38] J. B. Goodenough y Y. Kim, «Challenges for Rechargeable Li Batteries», *Chem. Mater.*, vol. 22, n.º 3, pp. 587-603, feb. 2010, doi: 10.1021/cm901452z.

[39] «capa SEI». Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://medium.com/@srinidhibr94/the-hidden-guardian-exploring-the-solid-electrolyte-interphase-sei-layer-in-li-ion-cell-63d7cd227eec
[40] «MAX31865».
[41] «100182 Instruction Manual_0506».
[42] «Módulo reductor LM2596 DC-DC con pantalla estabilizador de voltaje electrónico entrada 25V-40V salida 1,25 V-37V regulador de voltios Variable - AliExpress 13», aliexpress. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: //es.aliexpress.com/item/1005010185684029.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=google&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=&aff_short_key=_oDc8nzq
[43] H. J. Bergveld, «Battery Management Systems: Design by Modelling».
[44] M. A. Carbonell, «DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS (BMS) PARA BATERÍAS LiFePO4».
[45] «Diseño e implementación de un sistema de gestion de baterias para una moto electrica».
[46] R. Ahmed, «Role of deep learning in battery management system (BMS) for electric vehicles – A review», 2026.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

En cumplimiento del Sello Internacional de Calidad EUR-ACE y del sub-resultado de aprendizaje 3.1, en el presente trabajo se han considerado, de forma implícita y explícita, diversos aspectos sociales, de seguridad, ambientales y económicos relacionados con el desarrollo y la validación de un modelo electrotérmico para baterías de ion-litio.

En primer lugar, desde el punto de vista social y tecnológico, el trabajo se enmarca en el contexto actual de electrificación y transición energética, donde las baterías de ion-litio desempeñan un papel fundamental en aplicaciones como el vehículo eléctrico y el almacenamiento de energía. Tal y como se recoge en Introducción y Objetivos, la mejora en el conocimiento y modelado de estos sistemas contribuye al desarrollo de tecnologías más eficientes y fiables, con impacto directo en la sociedad al favorecer sistemas energéticos más sostenibles y accesibles.

En relación con los aspectos de seguridad y salud, estos se abordan especialmente en el Estado del Arte, donde se analizan los riesgos asociados a una gestión térmica inadecuada, como el envejecimiento prematuro, la pérdida de rendimiento o la fuga térmica. Este último constituye un fenómeno crítico que puede derivar en incendios o explosiones, lo que pone de manifiesto la importancia de diseñar sistemas seguros y controlados. Asimismo, en la Metodología Experimental se evidencia la implementación de un sistema de control térmico mediante un regulador PID y una cámara isoterma, lo que demuestra la consideración de condiciones seguras durante los ensayos.

Desde el punto de vista ambiental, el trabajo se relaciona directamente con el uso de tecnologías de almacenamiento energético clave en la reducción de emisiones y la integración de energías renovables. El correcto diseño y gestión de baterías permite aumentar su vida útil y eficiencia, reduciendo la necesidad de reemplazo frecuente y, por tanto, el impacto ambiental asociado a su fabricación y reciclaje. Además, el estudio de la influencia de la temperatura y la degradación contribuye indirectamente a minimizar residuos y optimizar el uso de recursos.

En cuanto a los aspectos económicos e industriales, el desarrollo de modelos precisos de baterías tiene una repercusión directa en la optimización de sistemas de gestión de baterías (BMS), lo que permite mejorar el rendimiento, reducir costes de mantenimiento y aumentar la durabilidad de los sistemas. Tal y como se recoge en el capítulo de Modelado y en la implementación en BMS, estos modelos pueden emplearse para mejorar la eficiencia operativa de sistemas reales, lo que resulta clave en sectores industriales como la automoción, la defensa o las energías renovables.

Aunque no existe un apartado específico dedicado exclusivamente a estas implicaciones a lo largo de la memoria, los aspectos sociales, de seguridad, ambientales y económicos se encuentran integrados de forma transversal en los capítulos de introducción, estado del arte, metodología y aplicación del modelo.

El presente trabajo demuestra una conciencia clara de los impactos asociados al desarrollo de sistemas basados en baterías de ion-litio, destacando la importancia de un enfoque ingenieril que no solo considere el rendimiento técnico, sino también la seguridad, la sostenibilidad y la viabilidad económica de las soluciones propuestas.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo del presente trabajo permite realizar una reflexión en el plano ético y social en relación con el uso y la gestión de baterías de ion-litio, especialmente en el contexto actual de electrificación y transición energética.

Desde una perspectiva ética, el uso de modelos electrotérmicos para el análisis del comportamiento de baterías contribuye a mejorar la seguridad de los sistemas, al permitir anticipar condiciones de funcionamiento que pueden resultar peligrosas, como el sobrecalentamiento o la fuga térmica. En este sentido, el trabajo pone de manifiesto la responsabilidad del ingeniero en el diseño de sistemas fiables que minimicen riesgos para las personas y las instalaciones, aspecto que se refleja en el estudio de los efectos térmicos y en la importancia de una correcta gestión mediante sistemas de gestión de baterías.

Asimismo, existe una dimensión social relevante asociada al uso de estas tecnologías. Las baterías de ion-litio son un elemento clave en el desarrollo de tecnologías sostenibles, como el vehículo eléctrico o el almacenamiento de energías renovables. Sin embargo, su fabricación, uso y reciclaje plantean retos relacionados con el consumo de recursos, la sostenibilidad y la gestión de residuos. En este contexto, mejorar su eficiencia y vida útil, como se plantea en este trabajo, supone una contribución indirecta a un uso más responsable de los recursos.

Por otro lado, el trabajo también implica una reflexión sobre la fiabilidad de los datos y modelos empleados. La comparación entre resultados experimentales y simulados pone de manifiesto la existencia de incertidumbres y limitaciones en los modelos utilizados, lo que resalta la importancia de interpretar los resultados con rigor y evitar conclusiones simplificadas. Este aspecto es importante desde un punto de vista ético, ya que decisiones basadas en modelos inadecuados podrían tener consecuencias técnicas y de seguridad.

Aunque estas reflexiones no se presentan en un apartado específico dentro de la memoria, se encuentran implícitas en diferentes secciones, especialmente en el estado del arte, el análisis de riesgos térmicos y la validación del modelo.

En conjunto, el trabajo evidencia la importancia de considerar no solo los aspectos técnicos, sino también las implicaciones éticas y sociales en el desarrollo de soluciones de ingeniería, promoviendo un enfoque responsable en el diseño y aplicación de tecnologías basadas en baterías.