

Desarrollo de un pack de baterías de baja capacidad y alta potencia para vehículos eléctricos con pila combustible

Cristóbal Luis Véliz Tello

2025

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor Guía:
Ph.D Antonio Sánchez (UTFSM)

Profesor Correferente:
MSc. Felipe Morales (UTFSM)

Santiago, 2025.



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Desarrollo de un pack de baterías de baja capacidad y alta potencia para vehículos eléctricos con pila combustible.

Nombre del candidato(a): Cristóbal Véliz Tello

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Eléctrica

Campus: Santiago, San Joaquín **Departamento:** Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Antonio Sánchez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente

DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 23/02/2026

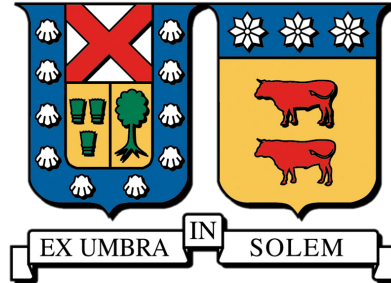
Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 23/02/2026

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



Desarrollo de un pack de baterías de baja capacidad y alta potencia para vehículos eléctricos con pila combustible

Cristóbal Luis Véliz Tello

2025

*“Hoy mato y muero en mi verdad
Tengo la virtud de sentirme bien conmigo
No hay cero que me saque del lugar
Soy mi propia luz, tengo de hermano al destino”
— Camilo Joaquín Villarruel, Milo J*

Agradecimientos

Al concluir esta etapa, hago una retrospectiva de todos los momentos vividos a lo largo del camino, tanto los desafíos como los éxitos. En las dificultades es donde más se aprende y se crece como persona, mientras que los momentos felices se disfrutaban plenamente. En ambas circunstancias, siempre conté con el apoyo y la compañía de personas, por lo que estoy profundamente agradecido, su presencia me permitió superar obstáculos, potenciar mi desarrollo y crecer como persona.

Quiero dedicar un especial agradecimiento a mi madre, Luisa, quien me ha apoyado no solo durante esta etapa, sino a lo largo de toda mi vida. Gracias a ella disfruté de una infancia y adolescencia llenas de las mejores oportunidades para desarrollarme como persona, recibiendo su apoyo tanto en lo personal como en lo académico. Aunque durante gran parte de esta etapa estuviéramos distanciados, viviendo en distintas ciudades, nunca me sentí solo, pues siempre recibí su apoyo, estando dispuesta a escucharme, aconsejarme y acompañarme en todo momento. Su actitud frente a los desafíos, nunca rendirse, perseverar y mantenerse fiel a uno mismo, fue fundamental en los momentos críticos, inspirándome a seguir adelante y a dar lo mejor de mí. Por todo ello, le estaré eternamente agradecido, pues su amor, guía y ejemplo han sido pilares fundamentales en mi formación, tanto personal como profesional.

De igual manera, agradezco a mi familia. A mi padre, Bernardo, quien siempre estuvo disponible para brindarme las mejores oportunidades y respaldarme y guiarme. Mi hermano, también llamado Bernardo, con quien conviví durante toda esta etapa, su cuidado y preocupación constante ante cualquier situación hicieron que mi camino fuera más seguro y acompañado. Mis abuelos, Bernardo, Juana y Luis, quienes, a pesar de la distancia, siempre estuvieron pendientes de mí, entregándome su cariño y aprecio. Mi abuela María Alicia, que en paz descansa, no estuvo presente durante esta etapa, pero estoy seguro de que desde el cielo me envió sus mejores energías y me cuidó en todo momento. Mis tíos paternos, Naslo y Claudia, junto a mi prima Josefa, quienes en Santiago me abrieron las puertas de su hogar, haciendo que mi estadía fuera más cómoda y que me sintiera en casa, compartiendo su cariño, atención y apoyo en todo momento. Mi tío materno, Patricio, quien desde pequeño siempre reconoció mi potencial y mis capacidades para lograr grandes cosas, le agradezco profundamente su confianza y el aliento constante que me ha brindado a lo largo de mi vida. Finalmente, quiero agradecer a mi amiga de la infancia, Amparo, a quien conozco desde pequeño y es alguien que considero como una familiar más. A pesar de que vivamos en distintas ciudades, ella siempre ha estado pendiente de mí, demostrando su apoyo, cariño y disposición para acompañarme en cada etapa de mi vida.

Este logro se lo debo a mis profesores guías, Antonio Sánchez y Felipe Morales, quienes me acompañaron durante todo el proceso, orientándome, guiándome y entregándome conocimientos y retroalimentaciones, lo que fue fundamental para el desarrollo del tema de mi memoria. Asimismo, quiero expresar mi agradecimiento a Gerardo Aravena, apoyo académico de pañol, quien siempre estuvo dispuesto a asistirme y ayudarme en las labores de laboratorio.

Quiero expresar mi gratitud a mis amigos del colegio, Juan, Vittorio, Jaime, Felipe, Francisco, Mariela y Constanza, con quienes compartí momentos fuera de la universidad y que siempre me ayudaron a distraerme y olvidarme del estrés académico, llenando esas etapas de risas, apoyo y buenos recuerdos. Cada salida significaba mucho para mí, fortaleciendo nuestra amistad a pesar de que ya no compartiéramos un espacio en común. Es reconfortante pensar que, luego de tantos años de haber salido del colegio, cuento con personas que se preocupan por mí y disfrutan estando a mi lado.

Dentro de las personas que hicieron esta etapa más llevadera y significativa, quiero agradecer a mis primeros amigos de la universidad de plan común: Javiera, Víctor, Stephanie, Camilo y Beatriz. Atesoraré los momentos compartidos estudiando Matemáticas 1 y Física 100 en la biblioteca, los carretes en cerrito y las llamadas por *Discord* durante la pandemia, cada uno de estos recuerdos hizo más amenas las situaciones complejas. A pesar de que hayamos tomado carreras diferentes y que en ocasiones nos hayamos distanciado, su amistad y compañía han sido, y siguen siendo, indispensables para mí, ya que siempre han mostrado preocupación por mí, entregándome su confianza en mis capacidades para lograr cualquier cosa.

Al ingresar a eléctrica, me encontré con personas que poco a poco me fueron integrando a su grupo ya formado, lo que resulta realmente significativo para mí, dado que me permitió sentirme acogido desde el inicio. Con ellos viví todo tipo de experiencias, desde intensas jornadas de estudio y trabajo en equipo hasta momentos de diversión y compañerismo, que hicieron de esta etapa algo inolvidable. Quiero agradecer especialmente a Lucas, Daniel, Fabián, Felipe, Javier, José, Lorena, Camila, Joaquín, Richard y Gonzalo, cuya compañía y apoyo hicieron que cada momento fuera más significativo.

Especialmente, quiero agradecer con mucho cariño a Macarena, quien en estos últimos meses se ha vuelto una persona muy especial para mí. Aunque estuvo presente desde que ingresé a la carrera, su apoyo durante la finalización de esta etapa ha sido realmente indispensable. Su disposición para acompañarme, escucharme y compartir panoramas, junto con su constante preocupación y confianza en mis capacidades, me brindó paz y tranquilidad, algo invaluable e innegociable, y me dio un *plus* extra que me permitió finalizar esta etapa de la mejor manera posible. Su generosidad, empatía y alegría hicieron que cualquier dificultad se sintiera más ligera y su motivación me inspiraron a dar lo mejor de mí.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tablas	V
Resumen	1
1. Introducción	3
1.1. Motivación	3
1.2. Objetivos	6
1.3. Metodología	6
2. Discusión bibliográfica	9
3. Marco Teórico	12
3.1. Electromovilidad en Chile	13
3.2. Evolución de la huella de carbono	14
3.3. Crecimiento del mercado de EVs y PHEVs	15
3.4. Vehículos eléctricos con pila combustible	16
3.5. Celdas	17
3.6. Módulo y Pack de Baterías	22
3.7. Estado de Carga	22
3.8. Alta Potencia	24
3.9. Baja Capacidad	24
3.10. Sistema de Gestión de Batería (BMS)	25
3.11. Gestión Térmica	26
3.12. Vehículos eléctricos con pila de combustible del mercado	27
4. Dimensionamiento del Módulo de Baterías	29
4.1. Selección y Justificación de la Configuración	30
4.2. Definición de Parámetros del Módulo	30
4.3. Gestión Térmica	33
4.4. Selección del BMS del Módulo	35
5. Simulación del rendimiento del módulo	37
5.1. Modelación Módulo de Baterías 6s2p	38
5.1.1. <i>Battery Builder</i>	38
5.1.2. Configuración de parámetros del módulo	39

5.1.3.	Circuito Eléctrico y Térmico	41
5.1.3.a.	Eléctrico	41
5.1.3.b.	Térmico	42
5.2.	Ensayos	43
5.2.1.	Descarga a Corriente nominal	43
5.2.2.	Descarga a Corriente máxima	43
5.2.3.	Carga a corriente nominal	43
5.2.4.	Descarga con ventilación forzada	43
5.2.5.	Ciclo WLTP	45
5.2.5.a.	Definición	45
5.2.5.b.	Construcción del perfil	46
5.3.	Resultados	50
5.3.1.	Descarga a Corriente nominal	50
5.3.2.	Descarga a Corriente máxima	51
5.3.3.	Carga a Corriente nominal	52
5.3.4.	Descarga con ventilación forzada	53
5.3.5.	Ciclo WLTP	55
5.3.6.	Ciclos WLTP repetidos con refrigeración Líquida	56
6.	Evaluación del desempeño en laboratorio	59
6.1.	Construcción del módulo	61
6.2.	Esquemas de conexión	61
6.3.	Resultados	62
6.3.1.	Descarga a Corriente nominal	62
6.3.2.	Descarga a Corriente máxima	64
6.3.3.	Carga a Corriente nominal	66
6.3.4.	Descarga con ventilación forzada	67
6.3.5.	Enfriamiento mediante convección natural	70
6.3.6.	Enfriamiento mediante ventilación forzada	73
7.	Análisis	75
7.1.	Comparación entre resultados simulados y experimentales	77
7.2.	Validación de los objetivos de alta potencia y baja energía	82
7.3.	Evaluación del desempeño térmico del módulo	84
7.4.	Integración y desempeño del BMS en el sistema experimental	85
7.5.	Escalabilidad pack de baterías	86
8.	Conclusiones	87
	Apéndices	94
	Anexos	94
A.1.	Circuito de refrigeración	94
A.2.	Ensayos Adicionales	95
A.2.1.	Simulink	95
A.2.2.	Laboratorio	105

Índice de Figuras

3.1.	Crecimiento de la participación de mercado de EV y PHEV en Chile (2021-2024) en porcentaje del total [4].	16
3.2.	Modelo de polarización dual [23].	20
3.3.	Curva normalizada de OCV frente a SOC para una celda de ion litio.	20
3.4.	Curva normalizada de resistencia interna frente a SOC para una celda de ion litio.	21
3.5.	Infografía Mirai [35]	28
5.1.	Módulo de baterías diseñado en <i>Battery Builder</i>	39
5.2.	Esquema del sistema de ventilación forzada.	44
5.3.	Vista frontal del módulo de baterías que se expone al flujo de aire.	44
5.4.	Perfil de distancia, velocidad y aceleración Ciclo WLTP [50]	46
5.5.	Diagrama de Cuerpo Libre del FCEV.	47
5.6.	Perfil Ciclo WLTP de Potencia.	49
5.7.	Resultados del ensayo de descarga a 1C.	50
5.8.	Resultados del ensayo de descarga a corriente máxima.	51
5.9.	Resultados del ensayo de carga a 1C.	53
5.10.	Resultados del ensayo de descarga con ventilación forzada.	54
5.11.	Resultados del ensayo del Ciclo WLTP.	55
5.12.	Resultados del ensayo del Ciclo WLTP con Refrigeración Líquida.	57
6.1.	Módulo de baterías 6s2p.	61
6.2.	Esquema del circuito experimental del módulo de baterías.	62
6.3.	Descarga de cada celda a 1C en el laboratorio.	63
6.4.	Resultados del ensayo de descarga a 1C en el laboratorio.	63
6.5.	Descarga de cada celda a corriente máxima en el laboratorio.	64
6.6.	Resultados del ensayo de descarga a corriente máxima en el laboratorio.	65
6.7.	Carga de cada celda a 1C en el laboratorio.	66
6.8.	Resultados del ensayo de carga a 1C en el laboratorio.	67
6.9.	Montaje del sistema de refrigeración por convección forzada.	68
6.10.	Descarga de cada celda a corriente máxima en el laboratorio.	69
6.11.	Resultados del ensayo de descarga a corriente máxima en el laboratorio.	69
6.12.	Evolución de la temperatura del módulo de baterías en función del tiempo durante el enfriamiento desde 80 [°C] mediante convección natural.	72
6.13.	Evolución de la temperatura del módulo de baterías en función del tiempo durante el enfriamiento desde 80 [°C] mediante convección forzada.	73
7.1.	Comparación entre simulación y experimento de la evolución de la potencia y la temperatura durante el ensayo de descarga a 1C.	77

7.2.	Comparación entre simulación y experimento de la evolución de la potencia y la temperatura durante el ensayo de descarga a corriente máxima.	78
7.3.	Comparación entre simulación y experimento de la evolución de la potencia y la temperatura durante el ensayo de descarga a 50 [A] con refrigeración forzada.	79
7.4.	Evolución de la potencia cuando se descarga el módulo a corriente máxima en el laboratorio.	82
1.	Circuito de Refrigeración Líquida [40]	94
2.	Resultados del ensayo de descarga a 2C.	95
3.	Resultados del ensayo de descarga a 3C.	96
4.	Resultados del ensayo de descarga a 4C.	97
5.	Resultados del ensayo de descarga a 5C.	98
6.	Resultados del ensayo de descarga a 6C.	99
7.	Resultados del ensayo de descarga a 7C.	100
8.	Resultados del ensayo de descarga a 8C.	101
9.	Resultados del ensayo de descarga a 9C.	102
10.	Resultados del ensayo de descarga a 10C.	103
11.	Resultados del ensayo de descarga a 11C.	104
12.	Resultados del ensayo de descarga a 12C.	105
13.	Descarga de cada celda a 2C en el laboratorio.	106
14.	Resultados del ensayo de descarga a 2C en el laboratorio.	106
15.	Descarga de cada celda a 3C en el laboratorio.	107
16.	Resultados del ensayo de descarga a 3C en el laboratorio.	108
17.	Descarga de cada celda a 4C en el laboratorio.	109
18.	Resultados del ensayo de descarga a 4C en el laboratorio.	109
19.	Descarga de cada celda a 5C en el laboratorio.	110
20.	Resultados del ensayo de descarga a 5C en el laboratorio.	111
21.	Descarga de cada celda a 6C en el laboratorio.	112
22.	Resultados del ensayo de descarga a 6C en el laboratorio.	112
23.	Descarga de cada celda a 7C en laboratorio.	113
24.	Resultados del ensayo de descarga a 7C en el laboratorio.	114
25.	Descarga de cada celda a 8C.	115
26.	Resultados del ensayo de descarga a 8C en el laboratorio.	115
27.	Descarga de cada celda a 9C.	116
28.	Resultados del ensayo de descarga a 9C en el laboratorio.	117
29.	Descarga de cada celda a 10C.	118
30.	Resultados del ensayo de descarga a 10C en el laboratorio.	118
31.	Descarga de cada celda a 11C.	119
32.	Resultados del ensayo de descarga a 11C en el laboratorio.	120
33.	Descarga de cada celda a 12C.	121
34.	Resultados del ensayo de descarga a 12C en el laboratorio.	121

Índice de Tablas

3.1.	Evolución de certificados de homologación por tipo de vehículo en Chile entre 2021 y 2024 [4].	16
4.1.	Parámetros Batería EVE-INR21700/40P.	31
4.2.	Parámetros módulo de Baterías EVE-INR21700/40P 6s2p.	32
5.1.	Parámetros del módulo introducidos en Simulink.	40
5.2.	Parámetros del Toyota Mirai [52].	48
5.3.	Coefficientes Aerodinámico y de Rodadura <i>típeaks</i> del Toyota Mirai [53] [54].	48
5.4.	Constante gravitacional y Densidad del aire establecidos por normativas [55] [56].	48
5.5.	Resultados del ensayo de descarga a 1C.	50
5.6.	Resultados del ensayo de descarga a corriente máxima.	51
5.7.	Resultados del ensayo de carga a 1C.	52
5.8.	Resultados del ensayo de descarga con ventilación forzada.	54
5.9.	Resultados del ensayo del ciclo WLTP.	55
5.10.	Valores máximos y mínimos del ensayo del ciclo WLTP.	55
6.1.	Disposición de las resistencias para descargar el módulo a mayor corriente.	60
6.2.	Resultados del ensayo de descarga a 1C en el laboratorio.	62
6.3.	Descarga de cada celda a corriente máxima en el laboratorio.	64
6.4.	Resultados del ensayo de carga a 1C en el laboratorio.	66
6.5.	Descarga de cada celda a 50 [A] con ventilación forzada en el laboratorio.	68
6.6.	Comparación de potencia, temperatura y tiempo cuando se descarga el módulo a 50 [A] con y sin ventilación forzada.	70
7.1.	Valores iniciales y finales de la potencia, temperatura final y tiempo de descarga de la simulación y del ensayo experimental por convección natural.	80
7.2.	Error comparativo de la potencia, temperatura y tiempo entre la simulación y el ensayo experimental por convección natural.	80
7.3.	Valores iniciales y finales de la potencia y temperatura en conjunto del tiempo de descarga por ventilación forzada.	81
7.4.	Error comparativo de la potencia, temperatura y tiempo entre la simulación y el ensayo experimental por convección forzada.	81
7.5.	Valores de potencia, energía, densidad de potencia, densidad energética, potencia específica y energía específica obtenidos durante la descarga a corriente máxima en el tiempo estable.	83

7.6.	Especificaciones del vehículo eléctrico de celda de combustible (FCEV) Toyota Mirai [66]	83
1.	Resultados del ensayo de descarga a 2C.	95
2.	Resultados del ensayo de descarga a 3C.	95
3.	Resultados del ensayo de descarga a 4C.	96
4.	Resultados del ensayo de descarga a 5C.	97
5.	Resultados del ensayo de descarga a 6C.	98
6.	Resultados del ensayo de descarga a 7C.	99
7.	Resultados del ensayo de descarga a 8C.	100
8.	Resultados del ensayo de descarga a 9C.	101
9.	Resultados del ensayo de descarga a 10C.	102
10.	Resultados del ensayo de descarga a 11C.	103
11.	Resultados del ensayo de descarga a 12C.	104
12.	Resultados del ensayo de descarga a 2C en el laboratorio.	105
13.	Resultados del ensayo de descarga a 3C en el laboratorio.	107
14.	Resultados del ensayo de descarga a 4C en el laboratorio.	108
15.	Resultados del ensayo de descarga a 5C en el laboratorio.	110
16.	Resultados del ensayo de descarga a 6C en el laboratorio.	111
17.	Resultados del ensayo de descarga a 7C en el laboratorio.	113
18.	Resultados del ensayo de descarga a 8C en el laboratorio.	114
19.	Resultados del ensayo de descarga a 9C en el laboratorio.	116
20.	Resultados del ensayo de descarga a 10C en el laboratorio.	117
21.	Resultados del ensayo de descarga a 11C en el laboratorio.	119
22.	Resultados del ensayo de descarga a 12C en el laboratorio.	120

Nomenclatura.

A	: Área superficial.
BAT	: Batería(s).
BMS	: <i>Battery Management System</i> (Sistema de Gestión de Baterías).
C	: <i>C-rate</i> .
c	: Calor específico.
C	: Capacitancia.
C_d	: Coeficiente de arrastre .
D	: Diámetro.
EV	: Vehículo Eléctrico.
FCEV	: Vehículo Eléctrico con Pila Combustible.
FC	: Pila de combustible.
E	: Energía.
Fd	: Fuerza de desplazamiento.
Fr	: Fuerza de roce.
g	: Gravedad.
H	: Altura.
h	: Coeficiente convectivo.
I	: Corriente.
I_{max}	: Corriente máxima.
kt	: Conductividad térmica.
L	: Largo.
m	: Masa.
m_{modulo}	: Masa del módulo.
Nu	: Número de Nusselt.
N	: Número.
OCV	: Tensión de Circuito Abierto.
PHEV	: Vehículo Híbrido.
P	: Potencia.
P_{max}	: Potencia máxima.
PEMFC	: <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cells</i> .
Q	: Caudal.
R	: Resistencia.
R_{int}	: Resistencia interna.
Re	: Número de Reynolds.
SOC	: <i>State of Charge</i> (Estado de carga).
T	: Temperatura.
T_a	: Temperatura Ambiente.
T_0	: Temperatura Inicial.
t	: Tiempo.
V	: Tensión.

V_{max}	:	Tensión Máxima.
V_{min}	:	Tensión Mínima.
Vol	:	Volumen.
Vol _{celda}	:	Volumen celda.
Vol _{modulo}	:	Volumen módulo.
v	:	Velocidad.
α	:	Ángulo de inclinación.
μ	:	Viscosidad dinámica.

Resumen

Este proyecto se centra en el desarrollo de un pack de baterías de litio de alta potencia y baja capacidad energética para vehículos eléctricos con pila de combustible (FCEV). La motivación surge de la necesidad de avanzar hacia una movilidad más limpia y eficiente, en línea con las políticas chilenas de electromovilidad. En los FCEV, la batería cumple un rol complementario a la pila de combustible, entregando potencia instantánea en aceleraciones, recuperando energía en frenado regenerativo y estabilizando el sistema eléctrico.

El estudio se estructura mediante una metodología secuencial, comenzando con el análisis del estado del arte sobre tecnologías de baterías, métodos de simulación, estrategias de gestión térmica y sistemas de protección para garantizar una operación eficiente y segura. A partir de este análisis, se definió el uso de celdas EVE-INR21700/40P. Antes de abordar el diseño completo del pack de baterías, resulta conveniente desarrollar primero un módulo de baterías con 6 celdas en series y 2 en paralelo, ya que este permite estudiar el comportamiento eléctrico y térmico a menor escala, validar las estrategias de control y gestión, y asegurar la viabilidad del diseño antes de su implementación en el conjunto total del vehículo.

Para la gestión del módulo, y con el fin de asegurar una operación segura y un adecuado balanceo entre celdas, se selecciona un Sistema de Gestión de Baterías (BMS) pasivo por razones de factibilidad económica. Este sistema realiza el monitoreo de tensión y temperatura por celda, además del balanceo pasivo. La estimación del estado de carga (SOC) se implementó mediante un método híbrido que combina el conteo de carga y la curva de tensión de circuito abierto (OCV) y SOC de forma independiente al BMS. Aun así, el BMS cumple un rol fundamental en la protección del sistema, garantizando la seguridad del módulo frente a condiciones de sobrecarga, sobredescarga o sobret temperatura.

En cuanto a la gestión térmica, se estudiaron tres estrategias, convección natural, ventilación forzada y refrigeración líquida. Si bien la última representa la solución más eficiente para FCEV, los ensayos experimentales se limitaron a las dos primeras debido a restricciones prácticas de laboratorio. Estas pruebas permitieron analizar el comportamiento térmico de las celdas bajo distintas condiciones de enfriamiento, evaluando su capacidad para disipar calor y mantener la estabilidad operativa del módulo.

La simulación del módulo se realizó en MATLAB/Simulink utilizando la herramienta Battery Builder y modelos térmico-eléctricos basados en la metodología de Gazzari. Se llevaron a cabo ensayos de descarga a corriente nominal y máxima, carga nominal, descarga con ventilación forzada y ciclo WLTP para evaluar el comportamiento bajo condiciones reales.

Posteriormente, se construyó el módulo y se realizaron pruebas de descarga y carga. Los resultados demostraron que el BMS mantiene el balanceo con diferencias del orden de

milivoltios y que la ventilación forzada reduce la temperatura, mejorando la estabilidad térmica y el tiempo de descarga. Los ensayos de enfriamiento confirmaron que la ventilación acelera la disipación térmica, reduciendo el tiempo de enfriamiento de 22 horas a 3,3 horas y que es posible disminuir la temperatura de descarga.

Finalmente, el análisis comparativo mostró que el módulo logra una potencia específica similar a la del Toyota Mirai, cumpliendo el objetivo de alta potencia, aunque con una energía específica superior, lo que indica un sobredimensionamiento del diseño. Los resultados sientan las bases para la futura escalabilidad del módulo hacia un pack completo.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La transición hacia un transporte más limpio y eficiente, libre de emisiones de carbono, es una tendencia mundial, y en Chile se ha incorporado como parte de los compromisos para avanzar hacia un desarrollo sostenible, impulsando la electromovilidad como eje central de la modernización del sector transporte.

El sector transporte en Chile constituye una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la huella de carbono del país. La dependencia de vehículos a combustión interna incrementa la concentración de contaminantes locales e intensifica los efectos del cambio climático, afectando la salud de la población y la sostenibilidad ambiental.

Para enfrentar estos desafíos, Chile ha implementado políticas y estrategias orientadas a la promoción de la electromovilidad, organizadas en cuatro ejes estratégicos. El primero busca fomentar la adopción de vehículos eléctricos mediante incentivos y financiar tecnologías limpias, el segundo se centra en desarrollar la infraestructura de carga y establecer regulación, incluyendo normas técnicas y el apoyo a la industria nacional, el tercero impulsa la investigación y la formación de capital humano, promoviendo la innovación tecnológica, los estándares de seguridad y la capacitación de especialistas y el cuarto eje enfatiza la difusión de información y la articulación entre actores públicos, privados y académicos, así como la cooperación internacional para acelerar la adopción de la electromovilidad [1].

Estos ejes estratégicos se encuentran respaldadas por políticas nacionales, como la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, el Plan Nacional de Eficiencia Energética, la Estrategia Climática de Largo Plazo, la Planificación Energética de Largo Plazo, la Política Energética Nacional 2050 (PEN) y la Ley de Eficiencia Energética (Ley 21.305). La PEN constituye el principal marco estratégico del país para orientar la transición energética hacia un sistema bajo en emisiones. Establece metas y lineamientos para integrar energías renovables, mejorar la eficiencia energética y disminuir la dependencia de combustibles fósiles, con especial énfasis en el transporte limpio y la electromovilidad. Además, contempla revisiones periódicas cada cinco años para incorporar avances tecnológicos, cambios en el contexto internacional y nuevas prioridades sociales, asegurando que la política se mantenga actualizada y efectiva [2] [3].

La expansión de los vehículos eléctricos (EV) e híbridos enchufables (PHEV) en Chile ha mostrado un crecimiento sostenido, impulsada por las políticas de promoción de la electromovilidad y la expansión de la infraestructura de carga. Este aumento refleja una tendencia hacia la electrificación del parque vehicular y una mejora en la eficiencia energética, en línea con los objetivos de la Ley 21.305 sobre Eficiencia Energética. La PEN 2050 respalda este desarrollo, estableciendo metas de transición hacia un transporte más limpio y orientando la integración de tecnologías de cero emisiones en el país [1].

A pesar de este crecimiento, los EV y PHEV enfrentan desafíos importantes. Los EV presentan autonomía limitada, lo que dificulta su uso en recorridos largos o en zonas con infraestructura de carga insuficiente, mientras que los PHEV, combinan propulsión eléctrica con motores de combustión interna, manteniendo cierta dependencia de combustibles fósiles y limitando los beneficios de reducción de emisiones [4].

Para solventar estas limitaciones, se han explorado alternativas como los FCEV. Los FCEV generan electricidad, mediante una reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno, produciendo únicamente agua como subproducto. Esta tecnología ofrece mayor autonomía que los EV tradicionales, y el suministro de hidrógeno se realiza en tiempos comparables a los de llenar el tanque de un vehículo convencional. Además, elimina la dependencia de combustibles fósiles de los PHEV. [5].

Considerando las características de los FCEV, surge la necesidad de optimizar los sistemas de almacenamiento de energía que complementan la pila de combustible. Aunque los FCEV generan electricidad a partir del hidrógeno, la batería cumple un rol fundamental al suministrar potencia instantánea durante aceleraciones, recuperar energía en frenadas regenerativas y estabilizar la operación del sistema. Por ello, el presente estudio se centra en el desarrollo de un módulo de baterías de alta potencia y baja capacidad, diseñado para complementar la pila de combustible, responder a los requerimientos dinámicos del vehículo y asegurar un desempeño eficiente y seguro bajo condiciones de operación realistas.

Para garantizar un funcionamiento óptimo del módulo de baterías, es fundamental contar con sistemas de supervisión que monitoreen parámetros críticos como tensión, corriente, temperatura y SOC. En este contexto, el BMS cumple un papel esencial en la seguridad y el rendimiento del sistema, ya que protege las celdas ante condiciones anómalas como sobrecarga, sobredescarga o sobretensión, y realiza el balanceo de tensión para mantener la misma tensión entre ellas. Existen principalmente dos tipos de BMS, pasivo y activo. El primero disipa el exceso de energía en forma de calor mediante resistencias, mientras que el segundo redistribuye la carga entre celdas a través de convertidores, logrando un balanceo más eficiente. Aunque los BMS activos ofrecen un mejor desempeño térmico y energético, los pasivos se emplean en etapas de desarrollo o aplicaciones de menor complejidad por su menor costo y facilidad de implementación, manteniendo igualmente un adecuado nivel de protección y supervisión.

De forma complementaria, la gestión térmica del módulo resulta determinante para mantener la estabilidad y prolongar la vida útil del sistema. Las variaciones de temperatura afectan directamente la capacidad, la resistencia interna y la seguridad de las celdas, por lo que es indispensable mantenerlas dentro de un rango óptimo de operación. En este estudio se analizan tres estrategias de gestión térmica, convección natural, refrigeración por aire forzado y refrigeración líquida. La primera corresponde a la estrategia más simple y económica, aunque presenta limitaciones en escenarios de alta carga térmica; la segunda incrementa la disipación de calor mediante el aumento del flujo de aire sobre el módulo,

alcanzando un equilibrio entre simplicidad y eficiencia; mientras que la tercera, que utiliza un circuito de refrigerante líquido, ofrece el mayor rendimiento térmico, resultando más adecuada para aplicaciones FCEV y condiciones de alta potencia.

El análisis del sistema se centra en el Toyota Mirai, un FCEV de producción comercial que integra una pila de combustible de hidrógeno junto con un sistema de baterías de ion-litio. La pila de combustible suministra energía continua a partir de la conversión electroquímica del hidrógeno, mientras que la batería actúa como un sistema de almacenamiento auxiliar capaz de responder a demandas transitorias de potencia y de recuperar energía durante las fases de frenado regenerativo. Esta arquitectura híbrida demuestra la complementariedad de ambas tecnologías, la pila de combustible asegura autonomía y suministro estable, en tanto que la batería aporta flexibilidad operativa, soporte dinámico y estabilidad al sistema propulsor [6] [7].

El desarrollo y modelado del módulo de baterías se fundamenta en los principios teóricos y metodológicos descritos por Gregory L. Plett [8] [9], cuyas investigaciones constituyen una referencia esencial para el análisis de celdas, módulos y sistemas de gestión de baterías. Su marco conceptual permite caracterizar con rigor los aspectos eléctricos, térmicos y de control del sistema, garantizando que el diseño cumpla con criterios de desempeño y seguridad.

En cuanto a la simulación, se implementan modelos en *MATLAB/Simulink* siguiendo las directrices de Javier Gazzarri [10], utilizadas en el ámbito académico e industrial para la representación matemática de baterías de ion-litio. Dichas simulaciones permiten reproducir con fidelidad el comportamiento dinámico del módulo bajo condiciones de operación variables, contemplando tanto la respuesta electroquímica como la gestión térmica del sistema.

Finalmente, para la validación experimental, se llevan a cabo ensayos de carga y descarga del módulo de baterías, considerando las disposiciones establecidas en las normativas internacionales IEC 62133 (*Safety Testing for Lithium Ion Batteries*) [11] e IEC 60086 (*Primary Batteries – General*) [12]. Estas regulaciones proporcionan lineamientos técnicos que aseguran que las pruebas se realicen bajo criterios estandarizados de seguridad, confiabilidad y desempeño, garantizando seguridad al momento de realizar pruebas en el módulo. A partir de los experimentos se evalúan los resultados de densidad energética y de potencia, así como la potencia y la energía específica, con el objetivo de compararlos con los valores de referencia establecidos en el Toyota Mirai, a fin de verificar si el módulo cumple con las características de alta potencia y baja capacidad energética propias de los sistemas FCEV. En particular, se analiza el ensayo de descarga a corriente máxima, ya que en esta condición se alcanza la máxima potencia del módulo, permitiendo evaluar su capacidad de respuesta ante demandas elevadas de corriente y su comportamiento térmico bajo condiciones extremas de operación.

1.2. Objetivos

Objetivo General:

- Diseñar y desarrollar un pack de baterías de litio de alta potencia y baja capacidad energética para vehículos eléctricos con pila de combustible.

Objetivos Específicos:

- Estudiar el estado del arte asociado a las tecnologías de baterías de alta potencia y baja capacidad usados en vehículos eléctricos con pilas combustibles, analizando las técnicas actuales utilizadas para su diseño, protección, simulación y control térmico.
- Dimensionar un pack de baterías de baja capacidad y alta potencia, considerando los requisitos de potencia del sistema con pila de combustible, utilizando un diseño modular.
- Seleccionar BMS que cumpla con los criterios de seguridad, estimar el Estado de Carga (SOC), extender la vida útil y realice un balance activo de las celdas.
- Encontrar lineamientos para un sistema de refrigeración para el módulo de baterías.
- Simular el rendimiento del módulo de baterías en condiciones operativas típicas de vehículos eléctricos.
- Evaluar el desempeño de un módulo del módulo de baterías mediante pruebas de laboratorio.

1.3. Metodología

Se plantea la siguiente metodología como plan de trabajo:

- **Estudio del estado del arte de baterías de alta potencia y baja capacidad junto con la tecnología de BMS.**

La revisión bibliográfica se centra inicialmente en el análisis del estado del arte de los EV, PHEV y FCEV destacando su relación con los sistemas de almacenamiento de energía. El estudio considera el funcionamiento y modelado de las baterías, incluyendo sus fenómenos eléctricos y térmicos, junto con los sistemas de monitoreo de variables críticas como el estado de carga, la temperatura y la corriente, a través deL BMS y estrategias de refrigeración que aseguren su correcto desempeño. Asimismo, se revisan las celdas comerciales de alta potencia y baja capacidad, seleccionadas mediante plataformas de proveedores internacionales, con el fin de identificar aquellas que cumplen con los requisitos técnicos del diseño del módulo. En paralelo, se analizan los BMS pasivos y activos disponibles en el mercado evaluando su compatibilidad con la arquitectura propuesta y sus parámetros eléctricos de operación. Finalmente, se abordan las estrategias de gestión térmica y sistemas de refrigeración, fundamentales para garantizar la operación segura y eficiente de los módulos bajo condiciones de alta demanda de potencia, considerando métodos como la convección natural, la ventilación forzada y la refrigeración líquida. Este análisis se sustenta en literatura

científica reciente, bases de datos técnicas y en los textos especializados de Gregory L. Plett [8] [9], que aportan el marco teórico y metodológico necesario para comprender el comportamiento electroquímico y térmico de los sistemas de almacenamiento de energía, así como la integración de BMS y estrategias de gestión térmica.

- **Dimensionamiento del módulo de baterías.**

Se establece el diseño del módulo de baterías, lo que implica la disposición de las celdas en configuraciones de serie y paralelo. El criterio principal para determinar el número de celdas en serie y en paralelo se basa en lograr una alta potencia con baja capacidad, optimizando así el rendimiento del sistema en términos de respuesta dinámica y eficiencia. Una vez definida la configuración, se calculan los parámetros clave del módulo, tales como tensión, corriente, potencia, capacidad y tiempos de carga y descarga.

- **Selección y dimensionamiento del BMS.**

En esta etapa, se selecciona un BMS compatible con el diseño modular propuesto. El BMS debe ser capaz de medir la tensión y temperatura de las celdas, y ser adecuado para la cantidad total de celdas del módulo. Para su elección, se consideran las alternativas disponibles en los sitios web de fabricantes como Texas Instruments, Infineon y Analog Devices. La función principal del BMS es supervisar el estado de las celdas y garantizar su operación segura durante los ensayos, mediante el monitoreo continuo de parámetros eléctricos y térmicos.

- **Diseño de un sistema de refrigeración.**

Se revisan teóricamente los lineamientos para el diseño de un sistema de refrigeración que garantice la gestión térmica del módulo de baterías, necesario para mantener un funcionamiento seguro y eficiente en condiciones típicas de operación de un FCEV. Este análisis considera el efecto térmico al realizar las pruebas de corriente máxima, nominal y los ciclos de conducción normalizados. En el laboratorio, se procura mantener las temperaturas dentro de los límites seguros para garantizar la seguridad en todo momento, sin comprometer la integridad del sistema. Si bien no se implementa un sistema de refrigeración líquida en el laboratorio, se estudian y aplican alternativas basadas en convección natural y ventilación forzada, considerando además la refrigeración líquida como técnica de referencia, de modo que todas las simulaciones y ensayos se realicen bajo condiciones térmicas controladas.

- **Simulación del rendimiento del módulo.**

Una vez definido el modelo final del módulo y el sistema de refrigeración, se realizan simulaciones en *MATLAB/Simulink* para evaluar el rendimiento del sistema bajo condiciones operativas. Durante las simulaciones, se miden parámetros clave como tensión, corriente, potencia, temperatura y SOC, considerando la corriente máxima, nominal y los ciclos de conducción normalizados. En particular, se analiza el comportamiento térmico del módulo al aplicar diferentes estrategias de gestión térmica, tales como convección natural, ventilación forzada y refrigeración líquida, lo que permite prever su desempeño y realizar ajustes de diseño antes de la implementación física en el laboratorio. Los resultados obtenidos contribuyen a optimizar el rendimiento del módulo. En el laboratorio, se toman medidas para mantener las temperaturas dentro de los límites seguros, asegurando siempre la integridad y la seguridad del sistema.

- **Evaluación del desempeño en pruebas de laboratorio.**

Una vez validado el modelo mediante simulación, se procede a la adquisición de las celdas de batería y del BMS adecuado para la construcción de un módulo de prueba. En el laboratorio, se realizan ensayos experimentales destinados a evaluar el desempeño del módulo, verificando parámetros clave como la potencia, la capacidad de descarga, la estabilidad térmica y el comportamiento del BMS en condiciones operativas. Para la ejecución de estas pruebas, se emplean equipos complementarios como fuentes programables, cargas electrónicas y sensores de medición que permiten cargar, descargar, registrar los parámetros eléctricos y térmicos del sistema. Durante los ensayos, se aplican estrategias de gestión térmica basadas en convección natural y ventilación forzada, asegurando que las temperaturas se mantengan dentro de los límites seguros. Las pruebas experimentales permiten confirmar la validez del diseño, garantizando que el módulo cumple con los requerimientos establecidos para su funcionamiento en un sistema basado en pila de combustible. Este proceso constituye una etapa fundamental para la futura implementación del pack completo de baterías y su integración en un vehículo eléctrico con pila de combustible (FCEV).

Capítulo 2

Discusión bibliográfica

Diversos estudios recientes evidencian que la movilidad eléctrica en Chile ha avanzado como estrategia para reducir emisiones, destacando EV, PHEV y FCEV. Cada una de estas tecnologías presenta características particulares que condicionan su adopción, desempeño y eficiencia energética en distintos contextos.

Los EV funcionan únicamente con energía almacenada en baterías, eliminando las emisiones contaminantes durante su operación. No obstante, su autonomía limitada y la dependencia de la infraestructura de recarga restringen su uso en recorridos prolongados o en zonas con baja densidad de estaciones de carga, motivando la búsqueda de soluciones complementarias que amplíen su alcance y optimicen su eficiencia.

Los PHEV combinan un motor eléctrico con un motor de combustión interna, lo que les permite extender su autonomía respecto a los EV y ofrecer mayor flexibilidad operativa. No obstante, al seguir dependiendo de combustibles fósiles, continúan generando emisiones contaminantes, especialmente cuando opera el motor térmico. Por ello, los PHEV representan una solución transitoria hacia un transporte más limpio, pero no eliminan el impacto ambiental asociado al uso de combustibles convencionales.

A pesar de los avances alcanzados por los EV y PHEV en la reducción de emisiones locales, ambos presentan limitaciones que dificultan su consolidación como soluciones definitivas para la movilidad sostenible. Los EV dependen completamente de baterías de gran capacidad, cuya fabricación y reciclaje implican un alto costo energético y ambiental, además de requerir una infraestructura de recarga extensa aún en desarrollo. Por su parte, los PHEV, aunque mitigan parcialmente las limitaciones de autonomía de los vehículos eléctricos, continúan utilizando combustibles fósiles y, por tanto, mantienen un nivel significativo de emisiones.

En este contexto, los vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV) surgen como una alternativa, capaz de integrar las ventajas de la propulsión eléctrica con una fuente de energía limpia y de rápida reposición. Estos vehículos generan electricidad a bordo mediante una reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno, produciendo únicamente agua como subproducto. Gracias a ello, eliminan las emisiones locales y permiten autonomías extendidas con tiempos de recarga similares a los de los vehículos convencionales. De este modo, los FCEV se perfilan como una opción estratégica dentro de la transición hacia una movilidad eléctrica más eficiente y ambientalmente sostenible.

El desempeño de los FCEV depende en gran medida de la integración eficiente de

sistemas de almacenamiento de energía complementarios, específicamente baterías que proporcionen potencia instantánea durante aceleraciones, recuperen energía en frenadas regenerativas y estabilicen la operación de la pila de combustible. Por ello, es esencial desarrollar módulos de baterías de alta potencia y baja capacidad que complementen la pila de combustible sin incrementar significativamente el peso ni el volumen del sistema, garantizando un desempeño dinámico y seguro bajo condiciones de operación realistas.

La gestión térmica y eléctrica constituye un factor determinante en el desempeño y la confiabilidad de los FCEV. Los sistemas de supervisión mediante BMS se dividen principalmente en dos categorías: pasivo y activo. Los BMS activos representan la opción más eficiente, ya que permiten un balanceo preciso de las celdas y la medición directa de parámetros críticos como corriente y estado de carga (SOC). Si bien en los objetivos de este trabajo se plantea la utilización de un BMS activo que mida directamente el SOC, en la práctica esta alternativa no resulta posible, dado que actualmente no existe una tecnología que combine todas las características requeridas y, además, su adquisición implicaría un costo elevado. Por estas razones, se opta por emplear un BMS pasivo que únicamente mide tensión y temperatura, mientras que la corriente se registra mediante sensores externos y el SOC se estima a partir de estos datos. Esta decisión responde a criterios de factibilidad económica y a la fase inicial de desarrollo experimental, en el que no se requiere un sistema de supervisión avanzado, pero sí se busca validar conceptos de diseño y comportamiento del módulo de baterías. De este modo, se alcanza un equilibrio entre funcionalidad, simplicidad y costo, permitiendo obtener información relevante sobre el rendimiento del módulo sin comprometer la integridad del ensayo experimental.

En relación con la gestión térmica, es importante señalar que, aunque la refrigeración líquida constituye el estándar en aplicaciones de FCEV debido a su capacidad para mantener temperaturas estables bajo alta demanda de potencia, en este trabajo se recurrirá a técnicas de convección natural y ventilación forzada. Si bien estas estrategias no representan la solución más eficiente desde el punto de vista térmico, permiten controlar las temperaturas dentro de límites seguros para los ensayos de laboratorio. Además, su implementación resulta fundamental en la fase inicial de desarrollo experimental, ya que posibilita caracterizar el comportamiento térmico de las baterías ante distintas condiciones de carga antes de adoptar sistemas de gestión más complejos. Esta elección evidencia las restricciones prácticas de infraestructura y recursos, pero también subraya la necesidad de interpretar los resultados experimentales considerando que las condiciones térmicas no reflejan completamente un escenario de operación real de un FCEV.

Es importante señalar que los equipos disponibles en el laboratorio presentan limitaciones en su capacidad de entrega de corriente, lo que condiciona los ensayos de descarga de alta potencia. Para superar parcialmente esta restricción, se recurrirá a la conexión de resistencias externas con el fin de incrementar la corriente de descarga del módulo de baterías. Si bien esta solución permite alcanzar niveles de corriente superiores a los que la instrumentación podría suministrar por sí sola, implica que la corriente no se mantenga completamente constante durante la prueba, generando variaciones en la potencia medida. Asimismo, debe considerarse que no se dispone de equipos capaces de realizar simultáneamente procesos de carga y descarga controlados, lo que impide replicar de forma precisa un ciclo de conducción real. No obstante, estas limitaciones son coherentes con la fase inicial de desarrollo experimental en la que se enmarca este proyecto, cuyo objetivo principal es caracterizar el comportamiento térmico y eléctrico del módulo bajo condiciones representativas, sentando las bases para futuras etapas de validación con equipamiento especializado

y escenarios de ensayo más complejos.

Para el modelado y análisis del comportamiento de las baterías, la bibliografía especializada de Gregory L. Plett proporciona un marco teórico sólido sobre sistemas de almacenamiento de energía, modelado electroquímico y gestión de baterías de iones de litio. Los métodos propuestos permiten estimar parámetros críticos como el SOC y la resistencia interna de las celdas, constituyendo una referencia fundamental para el diseño, simulación y supervisión de módulos de baterías de alta potencia y baja capacidad.

De manera complementaria, las metodologías desarrolladas por Javier Gazzarri constituyen una referencia práctica para la implementación de modelos de baterías en entornos de simulación como *MATLAB/Simulink*. Sus lineamientos han sido ampliamente adoptados en el ámbito académico e industrial, dado que permiten representar con alta fidelidad el comportamiento dinámico y térmico de las celdas de ion-litio de forma simplificada, así como analizar el impacto de distintas estrategias de gestión energética. Esta aproximación posibilita reproducir en laboratorio escenarios de operación realistas y evaluar la respuesta del módulo bajo condiciones de alta demanda de potencia.

En cuanto a los lineamientos normativos, se consideran las disposiciones de la IEC 62133 y de la IEC 60086, las cuales establecen criterios de seguridad, confiabilidad y desempeño para pruebas de carga y descarga. La aplicación de estas normas permite garantizar que los ensayos se realicen bajo parámetros reconocidos internacionalmente. No obstante, en este trabajo se plantea además llevar las pruebas hacia el límite seguro de operación del módulo, con el fin de observar su respuesta térmica y eléctrica en condiciones extremas. Esta estrategia busca obtener información adicional sobre la estabilidad del diseño y los márgenes de seguridad del sistema, siempre respetando los umbrales definidos por la literatura y la normativa para evitar condiciones de riesgo.

Como referencia práctica para el desarrollo de FCEV, el Toyota Mirai se utiliza ampliamente como modelo representativo. Este vehículo combina una pila de combustible que genera electricidad a partir de hidrógeno con un sistema de baterías que complementa la operación de la pila, suministrando potencia instantánea, recuperando energía en frenadas regenerativas y estabilizando el suministro eléctrico. Si bien existen otros modelos de vehículos eléctricos con celda de combustible, como el Honda Clarity *Fuel Cell* y el Hyundai Nexa, el Toyota Mirai se ha consolidado como el referente más representativo y documentado en el ámbito académico e industrial. El estudio de su desempeño permite analizar la autonomía, eficiencia energética, respuesta dinámica y gestión térmica, aportando criterios fundamentales para validar modelos de simulación y ajustar el diseño de módulos de baterías destinados a FCEV, asegurando seguridad, eficiencia y desempeño.

Capítulo 3

Marco Teórico

La exploración de alternativas de vehículos sostenibles en Chile se encuentra respaldada por las estrategias nacionales de transición energética y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, que promueven el uso de tecnologías limpias en el transporte. El país ha definido metas para incrementar la participación de energías renovables no convencionales, así como para incentivar la adopción de vehículos eléctricos y otras soluciones de movilidad de bajas emisiones, con el objetivo de disminuir la dependencia de combustibles fósiles y mejorar la calidad del aire urbano.

En este contexto, la movilidad eléctrica se basa en sistemas de almacenamiento de energía capaces de suministrar potencia de manera controlada, garantizando eficiencia y seguridad en la operación de los vehículos. Los EV, PHEV y FCEV presentan distintos principios de operación que condicionan su diseño, desempeño y las estrategias de gestión de energía. Mientras los EV dependen exclusivamente de la energía almacenada en baterías, los PHEV combinan esta energía con un motor de combustión interna, permitiendo mayor autonomía pero manteniendo cierta dependencia de combustibles fósiles. Por su parte, los FCEV generan electricidad a bordo mediante una reacción electroquímica controlada entre hidrógeno y oxígeno, produciendo únicamente agua como subproducto y complementando la operación de la pila con packs de baterías que suministran potencia instantánea, recuperan energía durante la frenada regenerativa y estabilizan el suministro eléctrico.

Para comprender y optimizar el desempeño de los módulos de baterías en estos sistemas, es fundamental analizar los parámetros eléctricos, energéticos y térmicos que definen su operación. La tensión y la corriente determinan la entrega y demanda de energía en cada instante, mientras que la temperatura influye directamente en la eficiencia, seguridad y vida útil de las celdas. El SOC permite estimar la energía disponible y controlar la gestión de la batería, mientras que la potencia y la energía suministrada reflejan la capacidad del módulo para responder a demandas dinámicas. La densidad de potencia y la densidad energética, junto con la potencia y energía específicas, son parámetros clave que caracterizan módulos de alta potencia y baja capacidad, asegurando que el sistema pueda entregar grandes *peaks* de potencia sin incrementar significativamente el peso o volumen del pack.

El modelado de las celdas es un componente esencial del análisis de sistemas de almacenamiento. Este modelado permite predecir el comportamiento eléctrico y térmico de las celdas mediante la caracterización de curvas fundamentales como la tensión en circuito abierto (OCV) frente al SOC y la resistencia interna frente al SOC. Estas curvas refle-

jan las propiedades electroquímicas de las celdas y son utilizadas para estimar la entrega de energía, el rendimiento bajo carga y descarga, y la eficiencia térmica del módulo. Los modelos matemáticos resultantes facilitan la simulación del comportamiento dinámico del sistema, la optimización de su diseño y la evaluación de estrategias de gestión de energía y temperatura.

La gestión térmica y eléctrica de los módulos se integran con estos parámetros, ya que mantener las celdas dentro de rangos seguros de tensión, corriente y temperatura es fundamental para garantizar estabilidad, eficiencia y seguridad. Las estrategias de refrigeración incluyen convección natural, ventilación forzada y refrigeración líquida, siendo esta última la más eficiente en aplicaciones de alta demanda de potencia. Los sistemas de supervisión de los módulos, los BMS, se clasifican principalmente en pasivos y activos, según el método de balanceo de las celdas. Los BMS pasivos igualan la carga de las celdas disipando el exceso de energía en forma de calor mediante resistencias, ofreciendo una solución sencilla pero con eficiencia limitada, mientras que los BMS activos transfieren energía de las celdas más cargadas hacia las menos cargadas mediante convertidores electrónicos, logrando un balanceo más rápido y eficiente. Además del balanceo, los BMS realizan un seguimiento continuo de variables críticas como tensión y temperatura, que constituyen las mediciones básicas para garantizar la seguridad de las celdas. En aplicaciones más avanzadas o específicas, también se monitorizan corriente y SOC de cada celda o del módulo completo, lo que permite prevenir sobrecargas, sobredescargas y sobrecalentamientos, asegurando una operación segura y estable del módulo bajo distintas condiciones de funcionamiento.

Vehículos comerciales como el Toyota Mirai constituyen ejemplos de integración de pila de combustible y módulos de baterías de alta potencia y baja capacidad. Su análisis permite observar la interacción entre almacenamiento de energía, gestión térmica, supervisión eléctrica y modelado de celdas, proporcionando referencias para el diseño y simulación de sistemas similares en FCEV.

3.1. Electromovilidad en Chile

En Chile, la promoción de la electromovilidad se sustenta en un conjunto de políticas y estrategias de largo plazo que buscan avanzar hacia un transporte más limpio y eficiente, reduciendo la huella de carbono del sector. Entre estas iniciativas destaca la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (EH2V), orientada a posicionar al país como líder en la producción y uso de hidrógeno limpio, desarrollada de manera participativa con expertos, empresas, ONG y ciudadanía. Complementariamente, el Plan Nacional de Eficiencia Energética, establecido por el Ministerio de Energía cada cinco años según la Ley 21.305, define la visión del país en eficiencia energética, abarcando áreas como transporte, edificaciones, sectores productivos y educación. Por su parte, la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) establece lineamientos a treinta años para reducir la vulnerabilidad frente al cambio climático y transitar hacia una economía baja en emisiones, considerando sectores clave como transporte, minería y agricultura. En paralelo, la Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) proyecta la evolución del consumo y generación de energía eléctrica con un horizonte mínimo de treinta años, garantizando la infraestructura necesaria y la integración segura de energías renovables. Todas estas políticas se complementan con la Política Energética Nacional 2050 (PEN), que define metas y orientaciones para un sistema energético confiable, sostenible, inclusivo y competitivo, revisándose cada cinco años para incorporar avances tecnológicos y nuevas prioridades nacionales [1] [2] [3] .

Estas políticas se operan a través de cuatro ejes estratégicos que orientan la adopción de la electromovilidad. El primer eje, enfocado en medios de transporte sustentable y financiamiento, promueve el uso de EV mediante instrumentos de fomento, subsidios y exenciones, así como la habilitación de nuevas tecnologías y modelos de negocio. El segundo eje, relativo a infraestructura de carga y regulación, aborda la construcción de estaciones de recarga y el desarrollo de normativas que faciliten el funcionamiento de los EV, al mismo tiempo que impulsa la formación de capital humano y la industria nacional de componentes. El tercer eje se centra en investigación y capital humano, incentivando la innovación tecnológica, la integración de la red eléctrica con sistemas de carga y la definición de estándares de seguridad y eficiencia. Finalmente, el cuarto eje, dedicado a difusión, información y articulación, busca la transferencia de conocimientos al público, la cooperación entre actores del sector y la colaboración internacional para acelerar la transición hacia un transporte eléctrico sostenible [1] [2] [3].

3.2. Evolución de la huella de carbono

La evolución de la huella de carbono en Chile refleja tanto el impacto acumulado del transporte como la urgencia de reforzar políticas y tecnologías bajas en emisiones. De acuerdo con el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, las emisiones totales alcanzaron 111.049 [ktCO₂eq] en 2022, frente a 105.552 [ktCO₂eq] en 2020, lo que representa una tasa de crecimiento anual compuesta cercana al 2,6 % [13]. A pesar de las absorciones de carbono provenientes de sumideros asociados al uso de suelo y a la forestación, que representaron aproximadamente 63.992 [ktCO₂eq], el balance nacional neto se situó en 48321 [ktCO₂eq] en 2022 [14]. Si esta tendencia se mantiene, las emisiones podrían escalar hasta cerca de 132.000 [ktCO₂eq] hacia 2030, lo que pondría en tensión el cumplimiento de los compromisos climáticos internacionales [15].

La estimación de esta huella se fundamenta en herramientas como los factores de emisión de Huella Chile, que permiten convertir el consumo energético en emisiones de CO₂ equivalente. Por ejemplo, el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) descendió de 0.3907 [kgCO₂eq/kWh] en 2021 a 0.2421 [kgCO₂eq/kWh] en 2023, evidenciando el proceso de descarbonización de la matriz eléctrica y potenciando el beneficio ambiental de la electrificación [16].

Las políticas presentadas en la sección anterior, como la PEN, ECLP, EH2V y la Ley 21.305 de Eficiencia Energética [1] [2] [3], buscan revertir la tendencia creciente de emisiones, impulsando un transporte más limpio y eficiente. Estas iniciativas se complementan con instrumentos económicos como el Impuesto Verde y los sistemas de compensación de emisiones, que han permitido mitigar millones de toneladas de CO₂ mediante señales de precio y el fomento de inversiones en tecnologías limpias [17].

En este marco, la electromovilidad surge como una de las estrategias más efectivas para reducir la huella de carbono del sector transporte. La incorporación de EV y PHEV, permite disminuir las emisiones directas en zonas urbanas y avanzar hacia la meta de carbono neutralidad al 2050. Este efecto se ve reforzado a medida que la matriz eléctrica del país continúa reduciendo su intensidad de carbono, consolidando así una sinergia entre política pública, innovación tecnológica y sostenibilidad ambiental [17].

3.3. Crecimiento del mercado de EVs y PHEVs

El crecimiento del parque los EV y PHEV en Chile ha estado influenciado por las políticas nacionales de movilidad sostenible. Iniciativas como la Política Energética Nacional 2050, la Ley de Eficiencia Energética y la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde han establecido un marco normativo que fomenta la adopción de tecnologías de cero emisiones, mediante subsidios, exenciones tributarias, financiamiento y el impulso a la infraestructura de carga, generando condiciones más favorables tanto para usuarios como para empresas. Estas políticas no solo actúan sobre el mercado de vehículos, sino que también promueven el desarrollo de la industria nacional de componentes y servicios asociados a la electromovilidad, incentivando la innovación tecnológica y la creación de empleos en sectores estratégicos.

Desde el punto de vista técnico, los EV funcionan únicamente mediante energía almacenada en baterías recargables de alta densidad energética. Esta energía alimenta uno o más motores eléctricos que convierten la electricidad en movimiento mecánico, controlando velocidad y par mediante sistemas electrónicos de gestión. Los EV no generan emisiones locales durante su operación y pueden recuperar energía durante la frenada regenerativa, transformando la energía cinética en electricidad para recargar parcialmente la batería.

Los PHEV combinan un sistema eléctrico similar al de los EV con un motor de combustión interna, lo que les permite operar en modo completamente eléctrico durante recorridos cortos y cambiar a combustión cuando la energía de la batería se agota o se requieren mayores niveles de potencia. Esta combinación permite extender la autonomía, reducir el consumo de combustible y mantener cierta flexibilidad operativa, aunque no elimina por completo la dependencia de combustibles fósiles.

Como resultado, la combinación de incentivos económicos, regulaciones técnicas y apoyo a la industria nacional ha facilitado un crecimiento sostenido de los EV y PHEV, acelerando la transición hacia un transporte más eficiente y con menor impacto ambiental. Esta expansión no solo ha incrementado la cantidad de vehículos eléctricos en circulación, sino que también ha contribuido a mejorar la eficiencia energética promedio del parque vehicular y a reducir progresivamente la huella de carbono del sector transporte. Paralelamente, el aumento de la conciencia ambiental entre los consumidores ha favorecido la adopción de tecnologías de cero emisiones, consolidando una tendencia positiva hacia la movilidad eléctrica.

Esto se refleja en la Tabla 3.1 y Figura 3.1, donde se observa la participación de mercado de los EV y PHEV en Chile entre 2021 y 2024, expresada como porcentaje del total de vehículos homologados. La comparación con el parque vehicular total evidencia cómo la adopción de tecnologías de cero emisiones ha aumentado de manera sostenida, confirmando el efecto directo de las políticas públicas, los incentivos y la expansión de la infraestructura de carga en la promoción de un transporte más limpio y eficiente. Además, esta tendencia se ve reforzada por la planificación de largo plazo en el sector energético, que incluye proyecciones de integración de energías renovables y estrategias de descarbonización, asegurando que el crecimiento de los vehículos eléctricos y PHEV se mantenga consistente con los objetivos nacionales de sostenibilidad y carbono neutralidad [4].

Tabla 3.1
EVOLUCIÓN DE CERTIFICADOS DE HOMOLOGACIÓN POR TIPO DE VEHÍCULO
EN CHILE ENTRE 2021 Y 2024 [4].

Tecnología	2021	2022	2023	2024
Combustión Interna	321.106	312.888	241.527	176.721
EV	496	903	1.300	4024
HEV con recarga (PHEV)	152	260	694	747
HEV sin recarga	1.882	2.787	2.084	5.872
Total	323.636	316.838	245.605	187.364

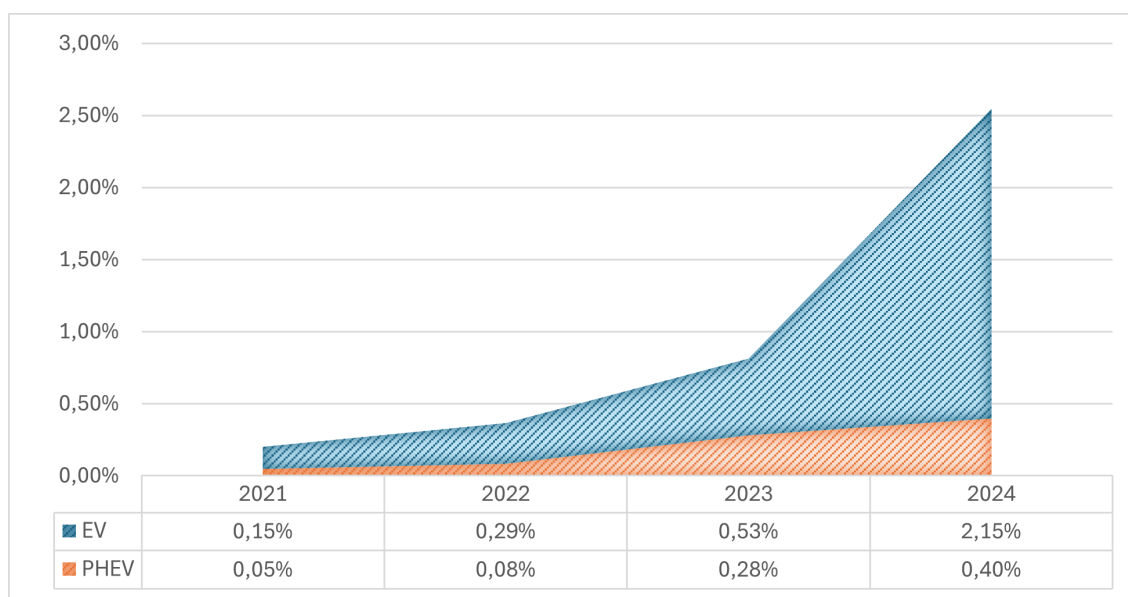


Figura 3.1. Crecimiento de la participación de mercado de EV y PHEV en Chile (2021-2024) en porcentaje del total [4].

3.4. Vehículos eléctricos con pila combustible

En continuidad con la revisión del crecimiento de los EV y PHEV y la necesidad de alternativas que superen sus limitaciones, los FCEV se presentan como una solución que combina autonomía extendida y cero emisiones locales. Los EV, si bien operan sin emisiones locales y permiten un control eficiente de la energía, presentan limitaciones significativas relacionadas con la autonomía de las baterías, la densidad energética limitada y la dependencia de la infraestructura de recarga, lo que restringe su capacidad para realizar recorridos prolongados o cubrir rutas en zonas con baja disponibilidad de estaciones de carga. Por su parte, los PHEV extienden la autonomía gracias al motor de combustión interna, pero mantienen una dependencia parcial de combustibles fósiles, lo que reduce su eficiencia global y limita los beneficios ambientales asociados a la electrificación del transporte. Estas restricciones evidencian la necesidad de tecnologías que combinen cero emisiones locales con capacidad de operación extendida.

En este contexto, una pila de combustible (FC) constituye el componente central del sistema energético del FCEV. Este dispositivo electroquímico convierte directamente la

energía química del hidrógeno en electricidad mediante una reacción con el oxígeno del aire, generando únicamente agua como subproducto. Entre las tecnologías disponibles, las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) son las más empleadas en aplicaciones vehiculares debido a su alta densidad de potencia, rápida respuesta y operación a bajas temperaturas, características que las hacen adecuadas para satisfacer las demandas dinámicas de los vehículos modernos [18].

En la PEMFC, el hidrógeno almacenado en el vehículo se introduce en el ánodo, donde se disocia en protones y electrones. Mientras los protones atraviesan la membrana electrolítica hacia el cátodo, los electrones generan un flujo eléctrico a través de un circuito externo, produciendo corriente utilizable para el vehículo. En el cátodo, los protones, los electrones y el oxígeno del aire se combinan para formar agua, evitando emisiones contaminantes locales. El correcto funcionamiento de la PEMFC requiere sistemas de control y gestión que mantengan condiciones de temperatura y presión adecuadas, aseguren la distribución uniforme de los gases y protejan la membrana, garantizando eficiencia, durabilidad y seguridad del sistema. Además, es necesario implementar estrategias de monitoreo y diagnóstico que detecten posibles fallas o degradación de la pila, asegurando un desempeño confiable a lo largo de su vida útil [7].

Las baterías desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento de los FCEV, complementando la PEMFC y optimizando el desempeño general del vehículo. Los módulos de baterías suministran energía instantánea durante aceleraciones, maniobras de alta demanda y frenadas regenerativas, estabilizando la operación de la pila de combustible y asegurando una entrega de energía constante y segura al motor eléctrico. Además, permiten almacenar la energía recuperada, contribuyendo a la eficiencia del sistema y prolongando la vida útil de la PEMFC al reducir las fluctuaciones de carga. La integración de sistemas de supervisión mediante BMS asegura que cada celda opere dentro de rangos seguros de tensión y temperatura, gestionando el balanceo de celdas y protegiendo el módulo frente a condiciones de sobrecarga o descarga profunda.

De manera integrada, el FCEV combina la PEMFC con el módulo de baterías y el motor eléctrico, el cual convierte la energía eléctrica en movimiento para propulsar el vehículo, regulando la potencia mediante sistemas de control electrónico e inversores. Durante la frenada regenerativa, la energía cinética se transforma nuevamente en electricidad y se almacena en la batería, incrementando la eficiencia global del sistema. Esta interacción entre pila, batería y motor permite que los FCEV superen las limitaciones de alcance de los EV y la dependencia parcial de combustibles fósiles de los PHEV, combinando autonomía extendida con cero emisiones locales, optimizando la respuesta dinámica y prolongando la vida útil tanto de la PEMFC como del módulo de baterías [19].

3.5. Celdas

Las baterías, fundamentales en los FCEV para complementar la pila de combustible, están compuestas por celdas electroquímicas, que son las unidades básicas de almacenamiento de energía. Una celda es capaz de almacenar energía mediante reacciones de oxidación-reducción, donde los electrones fluyen a través de un circuito externo generando energía eléctrica útil. Cada celda consta de un ánodo, típicamente de grafito; un cátodo, formado por óxidos metálicos de litio, un electrolito, que facilita el movimiento de iones de litio entre los electrodos y un separador, que previene el contacto eléctrico directo,

asegurando la seguridad y eficiencia del sistema. [8].

El material de los electrodos y del electrolito influye directamente en el rendimiento, la eficiencia y la seguridad de la celda. Entre las tecnologías disponibles, las celdas de ion-litio se destacan por su alta densidad energética, lo que permite almacenar una mayor cantidad de energía en un volumen y peso reducidos, y por su eficiencia en ciclos de carga y descarga, con bajas pérdidas de energía. Asimismo, presentan baja pérdida de carga en reposo y una vida útil relativamente larga, características que las hacen especialmente adecuadas para aplicaciones en FCEV, donde se requieren ciclos de operación frecuentes y la entrega de alta potencia de manera segura [20] [21].

Los parámetros que determinan el rendimiento de una celda incluyen tanto aspectos eléctricos como físicos. Entre los más relevantes se encuentran la tensión nominal, que determina el potencial eléctrico de la celda, la capacidad, que indica la cantidad de carga que puede almacenar y, junto con la tensión, define la energía y la corriente máxima de carga y descarga, limitando la rapidez con la que la celda puede suministrar o absorber energía, en combinación con la tensión, se obtiene la potencia que entrega o recibe la celda. La resistencia interna, compuesta por una parte óhmica asociada a la conducción de electrones e iones, y una parte polarizativa vinculada a la transferencia de carga y a los procesos de difusión, influye directamente en la caída de tensión bajo carga y en la generación de calor por efecto Joule, afectando tanto la eficiencia como la vida útil de la celda. Este parámetro no es constante, sino que depende del estado de carga, la temperatura y la magnitud de la corriente, de modo que una resistencia elevada limita la capacidad de entregar potencia en condiciones de alta demanda y puede comprometer la seguridad por sobrecalentamiento.

De manera complementaria, el C-rate es un parámetro que relaciona la corriente de carga o descarga con la capacidad nominal de la celda. Se define como la tasa de corriente que permite cargar o descargar completamente la batería en el transcurso de una hora. Por ejemplo, una celda de 4 [Ah] sometida a 1C se carga o descarga con 4 [A], a 0,5C la corriente corresponde a 2[A], mientras que a 2C la corriente asciende a 8 [A]. De este modo, el *C-rate* permite cuantificar la rapidez con la que se transfiere energía hacia o desde la celda y evaluar su impacto sobre la tensión, el SOC y la generación de calor durante los ciclos de operación. Por su parte, la temperatura de operación condiciona la eficiencia y la seguridad durante ciclos de alta corriente, mientras que el peso y las dimensiones de la celda influyen directamente en su densidad de energía y densidad de potencia, así como en su energía y potencia específicas [20] [21].

En este contexto, los parámetros eléctricos y físicos descritos anteriormente no solo determinan el desempeño de la celda, sino que también influyen directamente en su comportamiento durante los ensayos de caracterización. Entre estos, el ensayo de tensión en circuito abierto (OCV) y la determinación del SOC son fundamentales para evaluar cómo la celda almacena y entrega energía bajo diferentes condiciones de operación. La OCV proporciona información sobre el potencial eléctrico de la celda sin flujo de corriente, permitiendo relacionarlo con el SOC, que representa la fracción de energía disponible respecto a su capacidad total. En el caso de las celdas de ion-litio, estas curvas OCV-SOC ya han sido caracterizadas en estudios previos, lo que permite utilizarlas como referencia para caracterizar el comportamiento de la celda durante los procesos de carga y descarga en los ensayos, así como para validar su rendimiento, eficiencia y seguridad bajo distintos perfiles de operación [22].

Ahora bien, la OCV por sí sola no refleja la tensión real de operación de la celda durante la carga o descarga. Para interpretar este comportamiento y los fenómenos internos que afectan la tensión en los terminales, se utilizan modelos de circuito equivalente que permiten capturar la dinámica eléctrica de la celda. En su versión más detallada, el modelo de polarización dual (*Dual Polarization*, DP) representa la celda mediante una fuente de tensión dependiente del SOC y dos ramas resistiva-capacitiva (RC) adicionales, que describen la polarización electroquímica y la polarización por concentración. La resistencia interna explica la caída inmediata de tensión y la generación de calor por efecto Joule, mientras que las ramas RC capturan los transitorios de tensión asociados a la transferencia de carga en los electrodos y a la difusión de iones dentro de la celda [23].

El modelo DP surge de la necesidad de distinguir entre los distintos procesos de polarización observados en las celdas de ion-litio, especialmente cuando los fenómenos de carga y descarga generan transitorios significativos. La polarización electroquímica se asocia a la transferencia de carga en la interfase electrodo–electrolito, mientras que la polarización de concentración refleja la limitación en la difusión de iones dentro de los electrodos. Las capacidades de las ramas RC caracterizan la respuesta transitoria de cada uno de estos procesos, permitiendo describir de manera separada sus efectos sobre la tensión terminal de la celda. En la Figura 3.2 se presenta el modelo de polarización dual (Dual Polarization, DP), el cual representa la celda mediante una fuente de tensión dependiente del SOC y dos ramas RC que caracterizan la dinámica eléctrica de la celda y la resistencia interna que refleja la caída inmediata de tensión y la generación de calor por efecto Joule. [23].

- **Fuente de tensión (V_{OCV}):** Representa el potencial de la celda en reposo en función del SOC, correspondiente a la tensión que la celda alcanzaría si no circulara corriente.
- **Resistencia serie (R_0):** Modela la resistencia óhmica inmediata de la celda, incluyendo electrodos, electrolito y contactos. Esta resistencia produce la caída instantánea de tensión al variar la corriente, explicando la diferencia inicial entre OCV y tensión terminal.
- **Rama RC rápida (R_1, C_1):** Captura la polarización rápida asociada a la transferencia de carga en la interfase electrodo–electrolito. Esta rama afecta los transitorios de tensión en escalas de tiempo de segundos cuando la corriente cambia rápidamente.
- **Rama RC lenta (R_2, C_2):** Representa la polarización lenta, principalmente relacionada con la difusión de iones en los electrodos y otros procesos retardados. Afecta los transitorios de tensión en escalas de decenas de segundos a minutos.
- **Tensión terminal (V_{celda}):** Corresponde a la tensión medida en los bornes de la celda durante la carga o descarga, considerando la influencia combinada de la fuente de tensión, la resistencia serie y las ramas RC.

$$V_{celda}(t) = V_{OCV}(SOC) - I(t) \cdot R_0 - V_{R_1C_1}(t) - V_{R_2C_2}(t) \quad (3.1)$$

La expresión refleja cómo la dinámica de polarización y la resistencia interna afectan la entrega de energía de la celda, ya que cada componente del modelo de polarización dual contribuye a la respuesta eléctrica de manera específica. En conjunto, la resistencia interna y la dinámica de polarización determinan la capacidad efectiva de la celda para

entregar energía en condiciones reales, afectando tanto la potencia máxima disponible como la eficiencia de conversión y la generación de calor. Además, influyen directamente en la estabilidad térmica y en la seguridad, dado que una caída de tensión elevada o una corriente excesiva pueden generar sobrecalentamiento, acelerando la degradación de la celda o incluso comprometiendo su integridad.

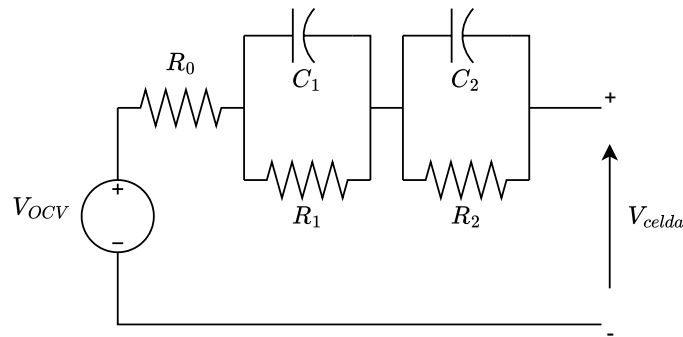


Figura 3.2. Modelo de polarización dual [23].

La Figura 3.2 muestra que la tensión en reposo de la celda, medida sin que circule corriente, corresponde a la fuente del modelo. La curva OCV-SOC refleja este potencial de equilibrio y sirve como referencia para interpretar la tensión de la celda durante la operación. Mientras la OCV define la referencia termodinámica, la resistencia interna y las ramas RC explican las caídas de tensión y los transitorios observados bajo carga o descarga. Así, la curva OCV frente al SOC no solo indica el nivel de carga disponible, sino que también permite relacionar regiones de la curva con fenómenos internos del circuito equivalente, como la polarización rápida y lenta, que afectan la entrega de potencia y la eficiencia de la celda. En la Figura 3.3 se presenta la curva de OCV en función del SOC a 25 [°C] para una celda Panasonic NCR18650BF [24], reflejando el comportamiento típico de esta tecnología.

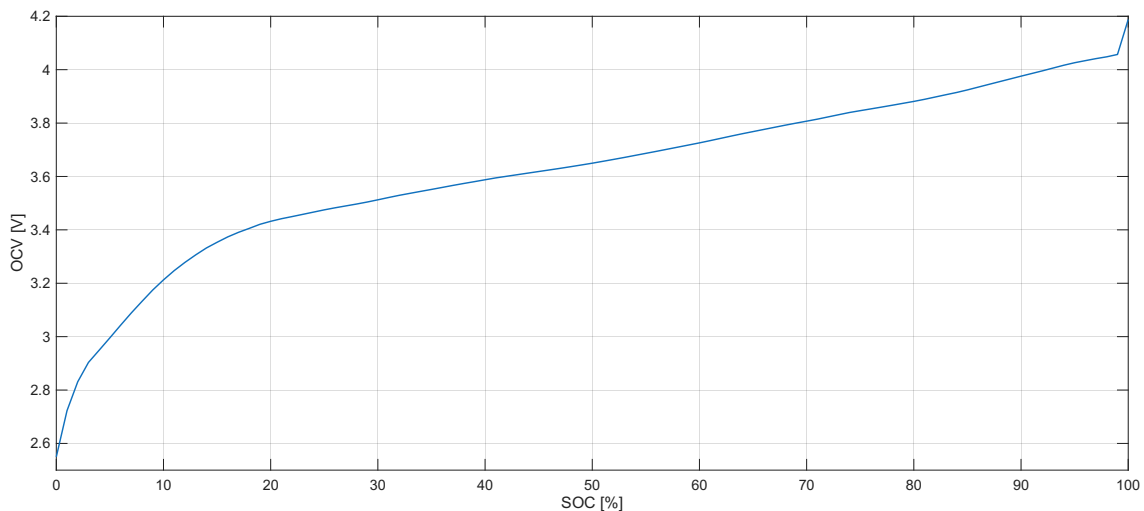


Figura 3.3. Curva normalizada de OCV frente a SOC para una celda de ion litio.

La curva de OCV frente al SOC de una batería de ion litio describe la variación de la tensión en función del nivel de carga de la celda y se distingue en tres tramos principales. Al inicio de la descarga, partiendo desde un SOC cercano a la carga completa, se observa una caída abrupta de la tensión. Este comportamiento se explica por fenómenos de desaturación superficial en los electrodos y por el desbalance de potenciales en la interfase electrodo-electrolito, donde las reacciones iniciales se desarrollan con mayor rapidez. Posteriormente, la curva presenta un tramo de comportamiento prácticamente lineal, asociado a la coexistencia en equilibrio de diferentes fases dentro del material activo del electrodo, lo que otorga estabilidad al potencial electroquímico. Finalmente, cuando el SOC es bajo, la tensión experimenta una caída de carácter exponencial y abrupto, producto de la disminución en la actividad del litio en el ánodo, el incremento de la polarización interna y las limitaciones difusivas en las partículas, que reducen la disponibilidad de carga. Esta evolución característica de la curva OCV es fundamental para la estimación precisa del SOC y para definir los rangos seguros de operación de la batería [25].

A partir de esta información, se relaciona el comportamiento de la resistencia interna de la celda con el estado de carga. La resistencia interna presenta una variación significativa a lo largo del SOC, lo que impacta directamente en la diferencia entre la tensión en circuito abierto y la tensión terminal durante la operación de carga o descarga. La resistencia tiende a aumentar en los extremos de carga, mientras que alcanza valores mínimos en la región intermedia, reflejando la eficiencia de la transferencia de carga y los procesos de difusión de iones dentro de los electrodos. Esta variación se caracteriza mediante ensayos de carga y descarga a distintas corrientes conocidas, registrando la caída de tensión instantánea respecto a la tensión en circuito abierto. La curva resultante, que relaciona la resistencia interna con el estado de carga, permite interpretar cómo los fenómenos de polarización rápida y lenta afectan la entrega de potencia y la generación de calor, constituyendo una herramienta fundamental para evaluar el desempeño de la celda bajo condiciones de operación típicas de vehículos híbridos eléctricos [26]. En la Figura 3.4 se muestra la curva característica de la resistencia interna en función del SOC para distintas temperaturas de las celdas de ion litio del modelo Molicel INR21700P45B, considerando como referencia la temperatura de 25[°C].

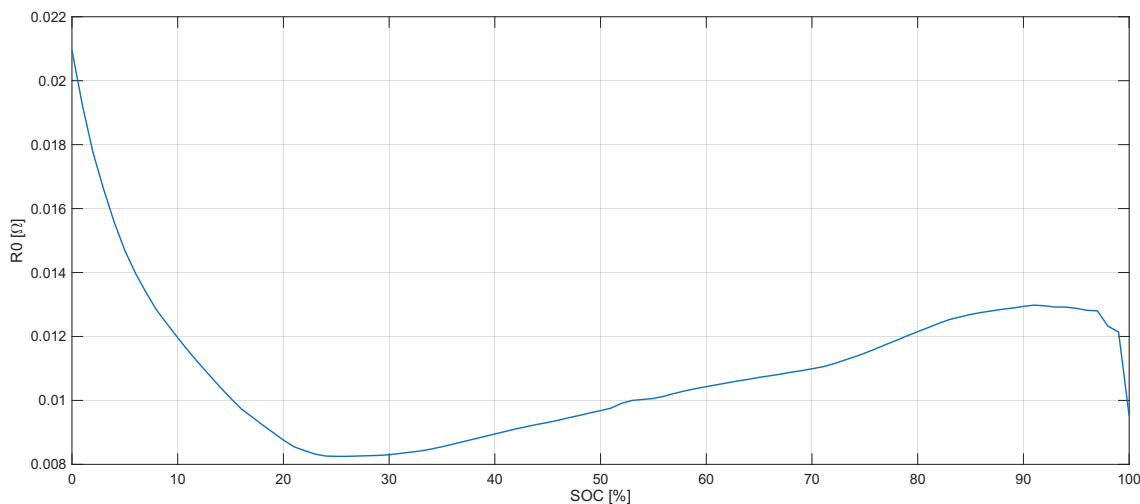


Figura 3.4. Curva normalizada de resistencia interna frente a SOC para una celda de ion litio.

Finalmente, durante los ensayos de carga y descarga, la celda no opera en condiciones de reposo, sino que entrega o absorbe corriente según la demanda. La magnitud de esta corriente se relaciona con la tasa de carga o descarga, definida por el parámetro *C-rate*, que indica la proporción de la corriente respecto a la capacidad nominal de la celda. Por ejemplo, un *C-rate* de 1C significa que la corriente aplicada permite cargar o descargar la celda completamente en una hora. A medida que aumenta el *C-rate*, la caída de tensión debido a la resistencia interna y las ramas RC se hace más pronunciada, y la generación de calor interna se incrementa, lo que puede afectar tanto la eficiencia como la vida útil de la celda [27].

El comportamiento observado durante la carga y descarga puede relacionarse directamente con los tres tramos de la curva OCV–SOC, en la región alta de SOC, la tensión cae rápidamente al aplicar corriente, en la parte central, la tensión se mantiene relativamente estable incluso a corrientes moderadas y en la región baja de SOC, la caída de tensión se vuelve más marcada debido a la limitación de iones disponibles en el ánodo y a la polarización interna. Esta relación entre OCV, resistencia interna, ramas RC y *C-rate* permite explicar y predecir la respuesta de la celda bajo condiciones de operación típicas en FCEV [27].

3.6. Módulo y Pack de Baterías

A partir del análisis realizado sobre las celdas individuales, sus parámetros eléctricos y físicos, y el comportamiento observado en los ensayos de carga y descarga, es posible diseñar módulos de baterías que combinen varias celdas en configuraciones serie y paralelo según los requerimientos de tensión y capacidad. La conexión en serie permite incrementar la tensión total del módulo sumando las tensiones de cada celda, mientras que la conexión en paralelo aumenta la capacidad y la corriente máxima que puede entregar, manteniendo la tensión de cada rama en paralelo constante. La disposición de las celdas dentro del módulo, junto con los sistemas de interconexión, aislamiento y gestión térmica, asegura una distribución uniforme de la corriente y temperatura, optimizando la eficiencia, la seguridad y la vida útil del conjunto.

Posteriormente, varios módulos se integran para formar un pack de baterías, que constituye la unidad de almacenamiento completa del vehículo. El pack incluye sistemas de protección y supervisión, como sensores y BMS, que monitorean parámetros críticos como tensión, corriente y temperatura, gestionan el balanceo de celdas y protegen frente a sobrecargas, descargas profundas o sobrecalentamiento. Esta arquitectura modular permite escalar de manera flexible la energía y potencia del sistema, asegurando un suministro estable y seguro de energía en aplicaciones exigentes como los FCEV, donde se requiere que la interacción entre pila de combustible, motor eléctrico y almacenamiento de energía mantenga eficiencia, autonomía y respuesta dinámica bajo condiciones de operación.

3.7. Estado de Carga

Dentro de los parámetros que supervisa el BMS, el SOC de la batería ocupa un papel central. El SOC indica la fracción de energía disponible en un momento determinado, generalmente expresada como porcentaje de la capacidad total de la batería. Su correcta estimación resulta esencial para garantizar la seguridad del módulo o pack, optimizar la efi-

ciencia energética y prolongar la vida útil de las celdas, ya que permite prevenir condiciones de sobrecarga o descarga profunda que podrían degradar irreversiblemente los materiales activos y afectar la entrega de potencia.

A diferencia de parámetros como tensión, corriente o temperatura, el SOC no puede medirse directamente y requiere métodos de estimación que aproximen la energía restante en la batería. Uno de los métodos más utilizados es el *Coulomb Counting*, que se basa en integrar la corriente de carga y descarga a lo largo del tiempo para determinar la energía consumida o almacenada. Este método permite un seguimiento continuo y en tiempo real del SOC, lo que resulta especialmente útil en aplicaciones con perfiles de carga dinámicos, como los vehículos eléctricos y FCEV, donde la demanda energética varía constantemente. Entre sus ventajas se encuentra su capacidad de proporcionar información instantánea del SOC durante la operación activa de la celda y su relativa facilidad de implementación con sensores de corriente adecuados. No obstante, su precisión depende críticamente de la exactitud de la medición de corriente y de la capacidad nominal de la batería, así como de la correcta consideración de la degradación de la celda con el tiempo. Pequeñas desviaciones en estos parámetros pueden acumularse, generando errores significativos en la estimación del SOC a largo plazo. Además, *Coulomb Counting* no corrige automáticamente las desviaciones acumuladas por el envejecimiento de la batería o condiciones de operación no previstas, por lo que su confiabilidad disminuye si se utiliza de manera aislada [28].

El método basado en la tensión de circuito abierto (OCV) estima el SOC a partir de la relación característica entre la tensión de la celda y su nivel de carga. Su principal ventaja es que no acumula errores integrativos como *Coulomb Counting*, ofreciendo una estimación más estable cuando la celda se encuentra en reposo. Además, la curva OCV-SOC proporciona información directa sobre el potencial eléctrico de equilibrio de la celda, lo que permite detectar anomalías y verificar la coherencia del estado de carga. Sin embargo, este método presenta limitaciones importantes durante la operación activa, la tensión terminal se ve afectada por la resistencia interna, las ramas de polarización de la celda y las corrientes instantáneas, lo que impide obtener una estimación precisa en tiempo real. También requiere periodos de reposo o estabilización, lo que limita su aplicabilidad en aplicaciones con demandas energéticas rápidas o ciclos de carga/descarga frecuentes [28].

Para superar las limitaciones individuales de estos métodos, se emplean técnicas de estimación basadas en filtros avanzados, como el Kalman extendido (EKF) o no lineal (UKF), que integran modelos matemáticos del comportamiento electroquímico y eléctrico de la celda con mediciones de tensión, corriente y temperatura. Estas técnicas permiten corregir errores derivados de *Coulomb Counting* y OCV, compensando desviaciones dinámicas y transitorias de la celda, lo que se traduce en una estimación más precisa del SOC bajo condiciones de operación variables. La principal desventaja de estos métodos radica en la complejidad computacional requerida, así como en la necesidad de contar con modelos precisos y parámetros ajustados a las características específicas de cada celda, lo que incrementa los requisitos de diseño y validación del sistema de gestión [29].

Otra estrategia efectiva consiste en combinar *Coulomb Counting* con el método OCV. En esta aproximación, *Coulomb Counting* proporciona seguimiento continuo en tiempo real durante la operación activa, mientras que la medición de OCV corrige la deriva acumulada durante periodos de reposo o baja corriente. Esta combinación permite lograr un equilibrio entre precisión y continuidad en la estimación, proporcionando un SOC estable que resulta relevante para la gestión energética, la planificación de la autonomía y la operación segura

de los módulos y packs de baterías en aplicaciones como los FCEV. La integración de estos métodos con el BMS asegura que los módulos mantengan su rendimiento, eficiencia y seguridad, al permitir que cada celda opere dentro de sus límites eléctricos y térmicos durante ciclos de alta demanda, aceleraciones y recuperación de energía mediante frenadas regenerativas [28].

3.8. Alta Potencia

La potencia eléctrica de una batería se define como el producto de la corriente por la tensión, representando la cantidad de energía que la batería puede entregar o absorber por unidad de tiempo. Para evaluar el desempeño dinámico del sistema, se utilizan parámetros como la potencia específica, que indica la potencia disponible por unidad de masa, y la densidad de potencia, que representa la potencia entregable por unidad de volumen. Estos indicadores son fundamentales para dimensionar módulos y packs de baterías capaces de responder a demandas instantáneas de energía, como aceleraciones rápidas, frenadas regenerativas y *peaks* de carga en aplicaciones de FCEV.

En aplicaciones de FCEV, los packs de alta potencia están diseñados para entregar y absorber corrientes elevadas en periodos cortos, permitiendo responder de manera inmediata a demandas energéticas del vehículo. Esta característica depende tanto de celdas con baja resistencia interna y un rango de operación que favorece la rapidez de respuesta, como de la disposición y configuración de los módulos, que influyen en la distribución de corrientes y minimizan las caídas de tensión. Para que la entrega de alta potencia sea segura, la batería debe operar en rangos donde la tensión se mantiene relativamente constante según la curva OCV–SOC, evitando los extremos de SOC, por ejemplo, trabajando idealmente entre 90 y 20 %, donde la tensión cambia rápidamente y podría comprometer el rendimiento y la vida útil del sistema [20] [21].

La arquitectura de las celdas y su disposición en el pack también son determinantes. Conexiones en serie aumentan la tensión máxima del sistema, mientras que combinaciones en paralelo permiten que el pack soporte mayores corrientes de descarga. La cantidad de módulos integrados define la corriente total que puede entregarse de manera segura. La correcta integración de estas configuraciones asegura que el sistema responda rápida y eficientemente ante condiciones exigentes, como aceleraciones bruscas o arranques en frío [8]. Los avances en el diseño físico y químico de las celdas han permitido que estas baterías no solo respondan a *peaks* de corriente, sino que mantengan estabilidad y confiabilidad a largo plazo, incluso bajo condiciones operativas extremas, asegurando que los FCEV cuenten con un suministro de energía instantáneo y seguro [9].

3.9. Baja Capacidad

La capacidad de un módulo de baterías se define como la cantidad total de energía que puede almacenar y entregar bajo condiciones normales de operación. Esta capacidad determina directamente cuánta energía está disponible para el vehículo en cada ciclo y condiciona el rango de operación seguro de las celdas. La capacidad del módulo depende del número de celdas conectadas en paralelo, ya que cada rama paralela incrementa la cantidad de carga eléctrica que puede almacenarse, mientras que la conexión en serie establece la tensión del módulo, necesaria para cumplir con los requisitos del sistema eléctrico del

vehículo.

Para caracterizar los módulos se utilizan parámetros como la energía específica, que expresa la energía disponible por unidad de masa, y la densidad energética, que indica la energía almacenada por unidad de volumen. Estos indicadores son esenciales para evaluar la relación entre tamaño o peso del módulo y la energía que puede entregar. La energía total y su distribución entre las celdas determinan cómo se diseña el módulo para asegurar eficiencia, estabilidad térmica y operación segura bajo ciclos de carga y descarga.

Los módulos de baja capacidad se definen como aquellos cuyo diseño limita la cantidad total de energía almacenada. Esta estrategia permite que las celdas individuales operen con menor estrés durante ciclos repetitivos de carga y descarga, como los que ocurren durante arranques frecuentes, frenadas regenerativas y maniobras con demandas transitorias de potencia. Al reducir la capacidad, se prioriza la durabilidad y la seguridad sobre la autonomía total, asegurando que las celdas puedan manejar *peaks* de corriente sin comprometer su vida útil ni su estabilidad térmica.

3.10. Sistema de Gestión de Batería (BMS)

Los BMS son componentes fundamentales para la operación segura y eficiente de las baterías en FCEV, ya que general supervisan parámetros eléctricos y térmicos como la tensión y la temperatura. También hay otros que también miden la corriente y el SOC. Esta supervisión permite que el sistema funcione dentro de rangos seguros, evitando sobrecargas, descargas profundas y desequilibrios que podrían comprometer tanto la eficiencia como la vida útil de la batería. La necesidad de un BMS es relevante en configuraciones donde múltiples celdas se conectan en serie y paralelo, ya que las diferencias de carga entre celdas individuales pueden generar pérdidas de energía y degradación acelerada si no se corrigen.

Existen diferentes tipos de BMS según el nivel de monitoreo y control que proporcionan. Los BMS más simples supervisan la tensión y la temperatura de las celdas y realizan balanceo de celdas, ofreciendo protección básica contra sobrecarga, descarga excesiva y sobrecalentamiento. Estos sistemas son adecuados para aplicaciones con requerimientos de potencia moderados. En contraste, los BMS más avanzados miden además la corriente, el SOC, la potencia y la energía del pack. Este nivel de supervisión permite estimaciones precisas del SOC, la gestión eficiente de la entrega de energía bajo condiciones dinámicas y el balanceo activo de celdas, garantizando un rendimiento estable y seguro incluso en aplicaciones de alta demanda.

Además, los BMS pueden clasificarse según el método de balanceo de celdas que implementan. En los BMS pasivos, el exceso de carga de una celda se disipa en forma de calor mediante resistencias, equilibrando la carga de manera simple y económica. Esta disipación de calor es inherente al método y constituye la principal forma de energía desperdiciada en este tipo de balanceo. La ventaja de este enfoque radica en su bajo costo y simplicidad de implementación, ya que no requiere componentes electrónicos complejos. Sin embargo, su desventaja se encuentra en las pérdidas energéticas en forma de calor y en que el balanceo es más lento, lo que puede limitar la optimización de la entrega de energía en aplicaciones de alta demanda [30].

Por otro lado, los BMS activos transfieren energía desde las celdas con mayor carga hacia las de menor carga mediante convertidores electrónicos, reduciendo pérdidas y mejorando la eficiencia global del sistema. Esta técnica permite un balanceo más rápido y preciso,

optimizando la utilización de cada celda y garantizando que el pack de baterías funcione de manera más uniforme, lo que es especialmente relevante en aplicaciones que requieren alta potencia y ciclos repetitivos de carga y descarga. La principal desventaja de los BMS activos es su mayor complejidad de diseño y costo, ya que requieren circuitos electrónicos adicionales y algoritmos de control más sofisticados para gestionar el flujo de energía entre celdas [31]. En este trabajo, dado que el objetivo principal es poner a prueba las celdas y caracterizar su comportamiento, se plantea utilizar un BMS pasivo que únicamente mida tensión y temperatura. Esta configuración básica permite monitorear las variables críticas necesarias para garantizar la seguridad de las pruebas y mantener las celdas dentro de rangos operativos seguros. De manera complementaria, el SOC se determina mediante sensores de corriente externos, integrando los datos obtenidos durante los ensayos para obtener una estimación del SOC del módulo.

3.11. Gestión Térmica

La gestión térmica es un aspecto crítico en el diseño y funcionamiento de baterías, ya que la temperatura influye directamente en la eficiencia, seguridad y vida útil del sistema. Tanto las baterías como las FC generan calor durante su operación, las baterías experimentan incrementos de temperatura debido a la resistencia interna y las reacciones electroquímicas durante ciclos de carga y descarga, mientras que las FC producen calor como subproducto del proceso de conversión de hidrógeno en electricidad [32]. Mantener la temperatura dentro de rangos óptimos es fundamental, pues valores por encima de los límites recomendados aceleran la degradación de los materiales activos y aumentan el riesgo de fallos térmicos o incluso eventos críticos como la fuga térmica, por otro lado, temperaturas demasiado bajas reducen la movilidad iónica de las celdas, incrementando la resistencia interna y limitando la entrega inmediata de potencia.

En este trabajo se consideran tres técnicas de gestión térmica aplicables a módulos de baterías, convección natural, ventilación forzada y refrigeración líquida. La convección natural se basa en la disipación pasiva de calor desde la superficie de las celdas hacia el aire circundante, aprovechando la diferencia de densidad que se genera entre el aire caliente y el frío. Es una técnica simple y económica, que no requiere componentes adicionales más allá de un diseño que favorezca el flujo de aire alrededor del pack. Sin embargo, su capacidad de extracción de calor es limitada y depende en gran medida de las condiciones ambientales, como la temperatura y la circulación de aire externa. Por esta razón, no se considera como estrategia principal de gestión térmica en este trabajo, y su uso se limita a observar el comportamiento del compartimiento de las celdas frente a distintas demandas de carga [33].

La ventilación forzada consiste en incrementar la transferencia de calor mediante el uso de ventiladores o sopladores que dirigen aire a través de canales diseñados dentro del pack. Al forzar el movimiento del aire, se mejora la convección y se reducen los puntos calientes generados durante la operación, lo que permite mantener una mayor homogeneidad de temperatura entre las celdas. Esta estrategia es más eficiente que la convección natural y se utiliza en aplicaciones de media a alta potencia. No obstante, su desempeño puede verse limitado cuando las corrientes de operación y la generación de calor son muy elevadas, además de requerir energía adicional para accionar los ventiladores y un diseño más complejo en cuanto a la distribución del flujo de aire [33].

La refrigeración líquida es la técnica más efectiva para controlar la temperatura en módulos de alta potencia. Consiste en hacer circular un fluido refrigerante como agua, glicol o mezclas especializadas, a través de canales integrados, tuberías o placas de intercambio térmico en contacto con las celdas. Este método permite una extracción de calor uniforme y más rápida que los sistemas basados en aire, ya que los líquidos tienen una mayor capacidad calorífica y conductividad térmica. La refrigeración líquida ofrece un control más preciso de la temperatura y asegura que todas las celdas operen dentro de un rango seguro, incluso en ciclos exigentes y de alta potencia. Su principal desventaja es la mayor complejidad de diseño e integración, ya que requiere bombas, tuberías y sellado adecuado para evitar fugas, lo que implica un incremento en costo, peso y mantenimiento [34].

En vehículos comerciales, la gestión térmica se combina con sistemas de control avanzados que regulan la temperatura de manera dinámica. Intercambiadores de calor, bombas de circulación y sensores distribuidos ajustan el flujo de aire o refrigerante según la demanda energética, equilibrando la temperatura de la batería y la FC, que operan en rangos distintos. Además, los BMS juegan un papel crucial, monitoreando continuamente la temperatura de cada celda y modulando la carga y descarga para evitar condiciones extremas. Esta integración asegura que el rendimiento del sistema no se vea comprometido por variaciones térmicas y que tanto la batería como la FC operen de manera eficiente, segura y confiable bajo todas las condiciones de operación del FCEV.

3.12. Vehículos eléctricos con pila de combustible del mercado

Los FCEV han evolucionado significativamente en el mercado automotriz, adoptando tecnologías que combinan baterías de alta potencia y baja capacidad con FC para maximizar eficiencia energética y autonomía. A diferencia de los EV, que dependen exclusivamente de baterías de gran capacidad, los FCEV utilizan un enfoque dual en el que la pila de combustible actúa como la fuente primaria de energía, mientras que la batería complementa la demanda instantánea de potencia en situaciones como aceleraciones y arranques en frío. En la actualidad, los FCEV han logrado posicionarse como una alternativa viable a los vehículos de combustión interna, gracias a su combinación de alta eficiencia, bajas emisiones y tiempos de recarga reducidos en comparación con los EV convencionales.

Uno de los modelos más representativos en el mercado es el Toyota Mirai, un FCEV impulsado por una FC de PEMFC que genera hasta 128 [kW] de potencia y trabaja en conjunto con una batería de ion-,litio de 1,24 [kWh]. Su autonomía alcanza aproximadamente 650 [km] con un tiempo de recarga de hidrógeno inferior a cinco minutos, lo que lo convierte en una alternativa eficiente frente a los EV que requieren tiempos de carga prolongados. Toyota ha desarrollado una infraestructura de tanques de almacenamiento de hidrógeno a alta presión que permite al Mirai almacenar suficiente combustible sin comprometer el espacio ni el peso del vehículo, además de contar con un sistema de gestión térmica avanzado que optimiza la disipación del calor generado por la FC y la batería [6]. La Figura 3.5 presenta la estructura modular del Toyota Mirai, permitiendo visualizar los componentes relevantes para el análisis de su sistema de propulsión y almacenamiento de energía.

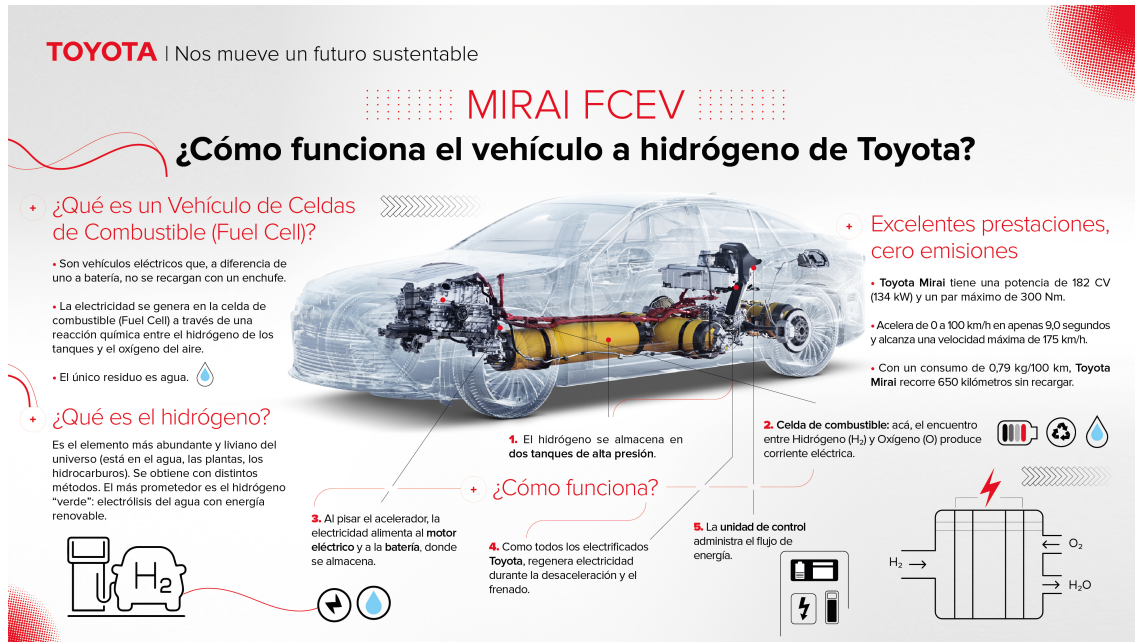


Figura 3.5. Infografía Mirai [35]

Otro modelo destacado es el Hyundai Nexo, que emplea un sistema similar al del Mirai pero con mejoras en eficiencia aerodinámica y tecnologías de asistencia al conductor. Su FC genera 95 [kW] de potencia, mientras que su batería de ion-litio de 1.56 [kWh] proporciona soporte en momentos de alta demanda. Su autonomía de hasta 666 [km] lo posiciona como uno de los FCEV de hidrógeno con mayor alcance en el mercado actual. Una de sus características más innovadoras es su sistema de purificación de aire, que filtra partículas ultrafinas antes de que el aire entre en la FC, aumentando la eficiencia del sistema y contribuyendo a la reducción de contaminantes atmosféricos [36]. El Honda Clarity Fuel Cell, aunque discontinuado en algunos mercados, fue otro de los pioneros en la adopción de FC en FCEV. Incorporaba una FC con una potencia de aproximadamente 103 [kW] y una batería auxiliar que optimizaba la respuesta del sistema en momentos de alta exigencia energética [37].

Capítulo 4

Dimensionamiento del Módulo de Baterías

El dimensionamiento de un módulo de baterías para aplicaciones de movilidad requiere definir una arquitectura eléctrica, parámetros físicos y estrategias de gestión térmica que garanticen el cumplimiento de sus funciones operativas. En este caso, el diseño se orienta a cubrir demandas puntuales de alta potencia y baja capacidad, propias de un sistema de apoyo energético que complementa a una fuente principal de generación, como la pila de combustible. La configuración seleccionada busca optimizar la entrega de *peaks* de corriente durante aceleraciones y frenado regenerativo, manteniendo un formato compacto y de bajo peso que facilite la integración y la gestión térmica.

A partir de la disposición de celdas definida, se determinan la tensión nominal y máxima, la capacidad total, la energía, la corriente máxima admisible y la potencia disponible, así como las propiedades físicas del módulo, incluyendo masa, volumen y densidades energéticas y de potencia. A partir de la tensión y la corriente se obtiene la potencia que el módulo puede entregar, mientras que la tensión junto con la capacidad permiten obtener la energía almacenada. Las dimensiones físicas, masa, altura y radio se emplean para calcular parámetros como la energía específica y la potencia específica, así como las densidades de energía y potencia, que permiten comparar el rendimiento del módulo con estándares de referencia y evaluar su viabilidad dentro de un sistema de alta potencia y baja capacidad.

La gestión térmica se analiza considerando el calor generado durante los perfiles de alta demanda, evaluando alternativas de refrigeración que aseguren la operación en rangos de temperatura seguros y estables. Se estudian tres técnicas principales: convección natural, ventilación forzada y refrigeración líquida, siendo esta última la más eficiente al utilizar un fluido circulante para extraer el calor del módulo.

Por otro lado, la selección del BMS se realiza de forma que su arquitectura y número de canales se alineen con la configuración eléctrica del módulo. Este sistema de gestión supervisa de manera continua la tensión y temperatura, asegurando un funcionamiento seguro y estable del módulo. Se emplea un sistema de balanceo pasivo, que iguala la carga entre celdas mediante la disipación de energía, evitando diferencias significativas que puedan comprometer la seguridad, la estabilidad o la vida útil del módulo.

4.1. Selección y Justificación de la Configuración

La elección de una configuración 6s2p, que consiste en seis celdas conectadas en serie y dos en paralelo, responde a criterios eléctricos, térmicos y funcionales orientados a optimizar el desempeño del módulo en aplicaciones de alta potencia y baja capacidad. Esta arquitectura permite alcanzar la tensión modular adecuada para integrarse de manera eficiente con los convertidores y sistemas de tracción de vehículos con pila de combustible (FCEV), asegurando la entrega de potencia instantánea requerida durante aceleraciones y frenado regenerativo. La conexión en paralelo de dos celdas incrementa la corriente máxima disponible y distribuye de manera más uniforme la carga y la generación de calor, garantizando que los picos de corriente no comprometan la integridad de las celdas ni la estabilidad térmica del módulo. Este equilibrio entre tensión y corriente es especialmente importante en los FCEV, donde la batería de soporte debe responder rápidamente a variaciones de demanda sin afectar la durabilidad ni la eficiencia del sistema.

Además, la configuración 6s2p contribuye a mejorar la estabilidad térmica y prolongar la vida útil del módulo, aspectos fundamentales en aplicaciones de alta potencia. La baja capacidad total del módulo se ajusta a su función de soporte energético puntual, permitiendo que la fuente principal de energía, la pila de combustible, proporcione la autonomía principal del vehículo, mientras que el módulo entrega la energía necesaria para eventos de alta demanda de forma inmediata. Esto resulta en un diseño compacto y ligero, que facilita su integración en los espacios limitados del tren motriz de los FCEV, reduce el peso total del sistema y simplifica la gestión térmica, optimizando la eficiencia global del vehículo.

Desde el punto de vista modular, esta configuración permite la replicación de unidades estandarizadas para conformar packs escalables, lo que simplifica tanto la fabricación como el mantenimiento y la validación experimental. La disposición compacta facilita un control más preciso de parámetros críticos como la resistencia interna y la uniformidad de carga entre celdas, asegurando la seguridad, la robustez y la eficiencia operativa del módulo. En conjunto, esta arquitectura refleja un enfoque de diseño ampliamente adoptado en los FCEV, donde la entrega de alta potencia en ciclos breves es prioritaria, y donde la combinación de bajo volumen, alta densidad de potencia y gestión térmica efectiva es determinante para garantizar la confiabilidad y el rendimiento del sistema.

4.2. Definición de Parámetros del Módulo

La determinación de los parámetros eléctricos del módulo se fundamenta en las características de las celdas seleccionadas. En este estudio se utilizan celdas recargables de ion litio, modelo EVE-INR21700/40P [38], las cuales presentan forma cilíndrica y cuyas especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 4.1. Esta información sirve como base para establecer la tensión nominal, la capacidad total, la corriente máxima admisible y la potencia del módulo en la configuración propuesta, así como para estimar su volumen y otras dimensiones físicas necesarias para el diseño del sistema.

A partir de las especificaciones técnicas de la celda EVE-INR21700/40P, presentadas en la Tabla 4.1, se establecen los parámetros eléctricos del módulo con configuración 6s2p. Esta disposición permite determinar de manera sistemática la tensión, capacidad, energía y potencia del módulo, asegurando que cumpla con los requerimientos de operación del vehículo.

Tabla 4.1
PARÁMETROS BATERÍA EVE-INR21700/40P.

Parámetro	Valor
Tensión Nominal	3,6 [V]
Tensión Mínima	2,5 [V]
Tensión Máxima	4,2 [V]
Capacidad Nominal	4 [Ah]
Corriente máxima	50 [A]
Peso	70 [g]
Altura	70,15 [mm]
Diámetro	21,15 [mm]
Temperatura máxima en carga	60 [°C]
Temperatura máxima en descarga	80 [°C]

La tensión nominal del módulo se calcula según la cantidad de celdas conectadas en serie:

$$V_{nom} = 6 \cdot 3,6 \text{ [V]} = 21,6 \text{ [V]} \quad (4.1)$$

De forma similar, se obtienen las tensiones mínima y máxima del módulo:

$$V_{min} = 6 \cdot 2,5 \text{ [V]} = 15 \text{ [V]} \quad (4.2)$$

$$V_{max} = 6 \cdot 4,2 \text{ [V]} = 25,2 \text{ [V]} \quad (4.3)$$

La capacidad del módulo se determina por la cantidad de celdas en paralelo, que suman su capacidad individual:

$$C = 2 \cdot 4 \text{ [Ah]} = 8 \text{ [Ah]} \quad (4.4)$$

De igual manera, la corriente máxima del módulo se ve incrementada por la configuración en paralelo:

$$I_{max} = 2 \cdot 50 \text{ [A]} = 100 \text{ [A]} \quad (4.5)$$

Con la tensión nominal y la capacidad total, se calcula la energía almacenable en el módulo:

$$E = 21,6 \text{ [V]} \cdot 8 \text{ [Ah]} = 172,8 \text{ [Wh]} \quad (4.6)$$

La potencia máxima disponible se obtiene como el producto de la tensión máxima y la corriente máxima:

$$P_{max} = 25,2 \text{ [V]} \cdot 100 \text{ [A]} = 2,52 \text{ [kW]} \quad (4.7)$$

El peso del módulo se calculan multiplicando ambos parámetros por el número total de celdas:

$$m_{modulo} = 12 \cdot 70 \text{ [g]} = 840 \text{ [g]} = 0,84 \text{ [kg]} \quad (4.8)$$

Finalmente, el volumen del módulo se obtiene multiplicando el volumen de una celda unitaria por la cantidad total de celdas del módulo. Dado que las celdas EVE-INR21700/40P tienen forma cilíndrica, se calcula el volumen de cada celda usando la fórmula del cilindro, considerando tanto la superficie lateral como las bases:

$$\text{Vol}_{celda} = 70,15 \cdot \left(\frac{21,15}{2}\right)^2 \cdot \pi = 24630 \text{ [mm}^3\text{]} = 0,0246 \text{ [L]} \quad (4.9)$$

$$\text{Vol}_{modulo} = 12 \cdot 24.630 \text{ [mm}^3\text{]} = 295.200 \text{ [mm}^3\text{]} = 0,2952 \text{ [L]} \quad (4.10)$$

El dimensionamiento del módulo permite definir con claridad los parámetros necesarios para construir un modelo preciso, capaz de simular su comportamiento y preparar los ensayos de laboratorio. En la Tabla 4.2 se presentan los parámetros eléctricos del módulo 6s2p, basados en las características de las celdas EVE-INR21700/40P.

Tabla 4.2
PARÁMETROS MÓDULO DE BATERÍAS EVE-INR21700/40P 6s2p.

Parámetro	Valor
Tensión Nominal	21,6 [V]
Tensión Mínima	15 [V]
Tensión Máxima	25,2 [V]
Capacidad Nominal	8 [Ah]
Corriente máxima	100 [A]
Energía	172,8 [Wh]
Potencia máxima	2,520 [kW]
Peso	0,84 [kg]
Volumen	0,2952 [L]

A partir de las características y dimensiones de las celdas individuales se construye el módulo completo, definiendo sus parámetros nominales y aquellos necesarios para representar su comportamiento en el modelo. Esta información permite desarrollar un modelo previo que refleje con precisión las dinámicas del módulo antes de los ensayos de laboratorio, facilitando la evaluación de su desempeño bajo distintos perfiles de operación. De este modo, se cierra la etapa de dimensionamiento y preparación del módulo, sentando las bases para el análisis detallado en los capítulos siguientes.

4.3. Gestión Térmica

La gestión térmica del módulo de baterías fundamental en el diseño de sistemas de almacenamiento de energía, ya que las celdas de ion-litio son altamente sensibles a variaciones de temperatura. Un aumento excesivo de calor puede generar efectos adversos en seguridad, eficiencia y vida útil. En términos de seguridad, eleva el riesgo de reacciones térmicas descontroladas, degradación del material o incluso fenómenos de fuga térmica que podrían derivar en incendios. En cuanto al rendimiento, temperaturas elevadas incrementan la resistencia interna de las celdas, reduciendo la eficiencia y la energía disponible durante la operación. De igual manera, la vida útil del módulo se ve comprometida, ya que la exposición prolongada a condiciones fuera del rango óptimo acelera la degradación de los materiales activos y disminuye el número de ciclos útiles de carga y descarga.

Con el fin de evaluar de manera inicial el comportamiento térmico de las celdas, se consideran dos enfoques de disipación de calor, la convección natural y la ventilación forzada. En el primer caso, la transferencia de calor ocurre por el movimiento pasivo del aire alrededor del módulo, ofreciendo una disipación limitada y dependiente de las condiciones ambientales. En el segundo caso, la ventilación forzada introduce ventiladores o sopladores que incrementan el flujo de aire sobre la superficie del módulo, mejorando la remoción de calor y reduciendo la formación de puntos calientes.

Para representar estos mecanismos en la simulación, se implementa en *MATLAB Simscape Thermal* un circuito térmico simplificado que modela la interacción entre el módulo y el ambiente bajo ambas estrategias de enfriamiento. Esta configuración permite analizar cómo responden las celdas frente a diferentes condiciones térmicas, identificar tendencias de sobrecalentamiento y evaluar la eficiencia relativa de la disipación de calor, sirviendo como base para el desarrollo de sistemas de enfriamiento más avanzados. Con el fin de representar cada uno de los mecanismos de disipación de calor, se utilizan los siguientes elementos en el modelo:

- ***Convective Heat Transfer***: El modelo representa la transferencia de calor desde la superficie del módulo hacia el aire. En el caso de convección natural, el coeficiente convectivo se ajusta a valores típicos de flujo pasivo, considerando un área de superficie expuesta limitada, dado que no existe ningún mecanismo que active la circulación de aire alrededor del módulo. Para la ventilación forzada, el coeficiente convectivo se incrementa según las características del ventilador Jason FJK6623PB230 [39], considerando su caudal de aire y presión estática. Además, se amplía el área de superficie expuesta al flujo de aire en función de la cara del módulo que esté siendo ventilada.
- ***Temperature Sensor***: Simula la medición de la temperatura en puntos críticos de la superficie del módulo, permitiendo monitorear que las celdas se mantengan dentro del rango operativo seguro y detectando riesgos de sobrecalentamiento.
- ***Heat Flow Rate Sensor***: Calcula la cantidad de calor que se transfiere desde el módulo hacia el ambiente, evaluando la eficiencia de la disipación tanto en convección natural como en ventilación forzada.

A partir de la información proporcionada por estos bloques, se puede evaluar cómo las características físicas y geométricas del módulo afectan su comportamiento térmico. En este contexto, si bien la convección natural y la ventilación forzada no constituyen métodos

altamente eficaces de gestión térmica, estas estrategias permiten una aproximación inicial para evaluar la temperatura de las celdas y estudiar el comportamiento térmico del módulo bajo distintas condiciones de operación. De esta manera, se facilita la identificación de tendencias de sobrecalentamiento y la eficiencia relativa de la disipación de calor, sirviendo como base para el desarrollo de sistemas de enfriamiento más avanzados. Por esta razón, en los FCEV resulta común implementar sistemas de refrigeración líquida para garantizar un control térmico más eficiente durante operaciones de alta demanda.

Para analizar su desempeño, se considera teóricamente el modelo *EV Battery Cooling System Design* de MathWorks [40], el cual posteriormente se implementa en la simulación del ciclo WLTP con ciclos repetidos. Este sistema incluye una placa de enfriamiento de aluminio con canales internos para el fluido refrigerante, una bomba hidráulica que mantiene el flujo, un intercambiador de calor (radiador) asistido por ventilador eléctrico y un controlador térmico que emplea algoritmos PID para regular tanto la bomba como el ventilador, asegurando que la temperatura del módulo se mantenga dentro de un rango seguro.

El proceso térmico inicia con la generación de calor en las celdas, que se conduce hacia la placa y se transfiere al fluido mediante convección forzada. El fluido caliente circula hacia el radiador, donde el ventilador facilita la transferencia de calor al ambiente, completando el ciclo hidráulico y asegurando una gestión térmica eficiente incluso en condiciones de alta potencia o ciclos repetidos de operación.

Los principales componentes son:

- **Placa de enfriamiento:** Actúa como la superficie de contacto directo entre las celdas de la batería y el sistema de refrigeración. Su función es recoger el calor generado durante la operación de las celdas y transferirlo al fluido que circula en su interior.
- **Canales de refrigeración:** Son los conductos internos de la placa por donde circula el refrigerante. Su diseño busca aumentar la transferencia de calor al promover un flujo turbulento, pero al mismo tiempo mantener unas pérdidas de presión moderadas para no sobrecargar la bomba.
- **Bomba hidráulica:** Es la encargada de mover el refrigerante a través del circuito. Al variar su caudal según la temperatura del sistema, asegura que siempre exista la cantidad de flujo necesaria para evacuar el calor sin gastar más energía de la requerida.
- **Intercambiador de calor (radiador):** Permite que el refrigerante descargue al ambiente el calor acumulado en la placa de enfriamiento. Para aumentar la eficiencia, utiliza tubos metálicos con aletas y un ventilador que fuerza la convección con el aire exterior.
- **Fluido refrigerante:** Cumple el rol de medio de transporte del calor. La mezcla de agua desionizada y etilenglicol permite absorber la energía térmica en la placa, desplazarla hacia el radiador y, además, protege al sistema contra corrosión, congelamiento y sobrecalentamiento.
- **Controlador térmico:** Coordina el funcionamiento de la bomba y el ventilador en base a la temperatura medida en el módulo. De esta forma mantiene las baterías dentro de un rango seguro de operación, evitando degradación prematura y asegurando la eficiencia energética del sistema.

El modelo desarrollado integra la dinámica térmica e hidráulica del sistema, evaluando su comportamiento frente a perfiles de operación variables como el ciclo WLTP, y permitiendo realizar ajustes paramétricos para optimizar la gestión térmica. En la Figura 1, presentada en el Anexo A.1, se muestra el esquema del sistema de refrigeración líquida.

En resumen, la evaluación teórica del módulo de baterías considera tanto la disipación pasiva mediante convección natural como la gestión térmica activa a través de ventilación forzada y refrigeración líquida. La convección natural permite evacuar el calor sin consumo energético adicional, mientras que la ventilación forzada incrementa la tasa de transferencia térmica mediante el flujo controlado de aire sobre el módulo, mejorando la uniformidad de temperatura. Por su parte, la combinación de placa de enfriamiento, canales, bomba hidráulica, radiador, fluido refrigerante y controlador térmico asegura un control preciso de la temperatura en condiciones de alta demanda. La integración de estos fenómenos en el modelo térmico e hidráulico proporciona una herramienta capaz de analizar distintos escenarios de operación, optimizar parámetros críticos y garantizar que las celdas se mantengan dentro de un rango seguro, sentando las bases para la simulación del ciclo WLTP y la evaluación cuantitativa del desempeño del sistema.

4.4. Selección del BMS del Módulo

El BMS tiene como función principal monitorear y mantener las variables críticas de operación del módulo, principalmente la tensión y la temperatura de las celdas, asegurándose de que se mantengan dentro de rangos seguros. Además, el BMS realiza el balanceo de las celdas, igualando los niveles de carga mediante disipación controlada de energía, con el fin de optimizar la uniformidad del módulo y protegerlo de condiciones de operación extremas.

La selección del BMS se fundamenta en su compatibilidad con el módulo diseñado, considerando la cantidad de celdas en serie y la facilidad de integración. En este proyecto se opta por un balanceo pasivo, que, aunque más simple que el balanceo activo, requiere un control cuidadoso del calor disipado durante la compensación de carga, evitando incrementos térmicos que puedan comprometer la seguridad y el desempeño del sistema.

Con base en estos criterios, se selecciona el BQ79606EVM-897 [41], un módulo de evaluación desarrollado por Texas Instruments que integra el circuito BQ79606-Q1, diseñado específicamente para la monitorización de módulos de baterías en aplicaciones automotrices. Este sistema constituye una solución básica de BMS, adecuada para las primeras etapas de diseño y validación, ya que ofrece las funciones esenciales de monitoreo y balanceo sin la complejidad de arquitecturas más avanzadas. El circuito permite medir individualmente la tensión de hasta seis celdas conectadas en serie e incorpora múltiples entradas analógicas compatibles con termistores NTC externos, lo que facilita un monitoreo térmico distribuido de alta resolución.

El balanceo pasivo del BQ79606EVM-897 se realiza mediante resistencias de descarga internas, que se activan electrónicamente para disipar el exceso de carga en las celdas con mayor tensión. Este método mantiene el equilibrio energético entre las celdas sin necesidad de transferencia activa, reduciendo la complejidad del sistema, aunque con la limitación de una menor eficiencia y mayor generación de calor respecto a esquemas activos.

La comunicación del módulo se establece mediante el protocolo UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), que permite transmisión bidireccional de datos con baja

latencia y bajo consumo de recursos. Esta interfaz facilita tanto la lectura periódica de registros internos del sistema como la configuración de parámetros operativos del BMS.

Por último, la temperatura del módulo se mide utilizando termistores NTC de 10 [k Ω] [42], conectados directamente a las entradas analógicas del BMS. Esta configuración permite obtener un perfil térmico localizado, capaz de detectar aumentos de temperatura en puntos críticos del módulo. Dicho monitoreo distribuido es fundamental para implementar acciones de protección preventiva, como la reducción de carga o el apagado del sistema ante condiciones potencialmente dañinas.

En conjunto, el BQ79606EVM-897 constituye una solución inicial de gestión de baterías que, si bien carece de balanceo activo o de comunicación en red escalable, proporciona una base confiable para garantizar la operación segura del módulo en fases tempranas de desarrollo.

Capítulo 5

Simulación del rendimiento del módulo

La simulación se desarrolla en *MATLAB/Simulink* para modelar de manera integral el comportamiento eléctrico y la gestión térmica del módulo de baterías en un FCEV con PEMFC. La configuración del módulo se realiza mediante la herramienta *Battery Builder*, la cual permite definir la batería conforme a sus especificaciones nominales comerciales, incluyendo tensión, capacidad, corriente, dimensiones físicas y curvas de comportamiento electroquímico normalizadas. Esta aproximación garantiza que el módulo simulado refleje con precisión su operación real, considerando tanto la entrega de potencia instantánea como la capacidad limitada de almacenamiento.

El modelado del circuito se desarrolla conforme a los lineamientos propuestos por Javier Gazzarri, cuyas metodologías se han consolidado como referencia en la representación dinámica de baterías de ion-litio. Dicho enfoque permite reproducir con fidelidad los fenómenos de descarga, carga y degradación, así como evaluar el impacto de la gestión térmica y del perfil de operación sobre el desempeño global del sistema [10].

A partir de este modelado, se simulan cinco tipos de ensayos para evaluar el desempeño del módulo de baterías. En primer lugar, se realiza una descarga a corriente nominal, representativa de condiciones de operación estándar y sostenida, lo que permite analizar el comportamiento del módulo bajo una demanda moderada y continua. A continuación, se lleva a cabo una descarga a corriente máxima, diseñada para evaluar la respuesta del módulo ante demandas energéticas elevadas, como aceleraciones rápidas o *peaks* de potencia, y estudiar la generación de calor en condiciones extremas.

Posteriormente, se efectúa una carga a corriente nominal, que permite examinar la recuperación de energía del módulo y restablecer el SOC inicial antes de cada ensayo, evaluando también el comportamiento térmico durante la carga. De manera adicional, se incluye una descarga con ventilación forzada, ajustando la corriente de descarga de manera que, combinada con la acción del ventilador, la temperatura del módulo no supere los 60[°C].

Finalmente, se simula un ciclo dinámico basado en el protocolo WLTP (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*), que reproduce un perfil de conducción realista con variaciones de velocidad, aceleración y potencia. En este caso, se realiza un ciclo único considerando únicamente la convección natural para evaluar la respuesta del módulo sin asistencia activa. Posteriormente, se simulan repeticiones consecutivas del ciclo bajo

refrigeración líquida, con el objetivo de analizar la eficacia de este método para mantener las celdas dentro de un rango de temperatura seguro durante operaciones prolongadas y exigentes.

Durante todas las simulaciones, se monitorean parámetros relevantes que caracterizan el desempeño del módulo, tales como tensión, corriente, potencia, temperatura y SOC. La tensión y el SOC se registran tanto a nivel de módulo como a nivel de cada celda, permitiendo distinguir el comportamiento individual de las celdas y la respuesta global del conjunto. Se asume que todas las celdas del módulo presentan un comportamiento idéntico, por lo que los valores de cada celda se representan de manera uniforme. Estos indicadores permiten un análisis detallado tanto del comportamiento eléctrico como de la respuesta térmica del módulo, facilitando la identificación de límites de operación, la evaluación de la eficiencia de la gestión térmica y la seguridad del sistema bajo diferentes escenarios.

En base a los resultados obtenidos, se proyecta la replicación de los ensayos en laboratorio, ajustando los protocolos de prueba según las normas IEC 62133 y 60086, como la disponibilidad de equipos. Para esta fase, se planifica replicar únicamente los ensayos de carga y descarga a corriente nominal, la descarga a corriente máxima y la descarga con ventilación forzada, ya que el ciclo WLTP requiere un dispositivo capaz de reproducir perfiles dinámicos de corriente y potencia, lo cual no está disponible en el laboratorio. Este enfoque permite validar los modelos simulados, garantizar la seguridad durante la experimentación y asegurar la coherencia entre los resultados simulados y los obtenidos de manera práctica.

5.1. Modelación Módulo de Baterías 6s2p

5.1.1. *Battery Builder*

La herramienta *Battery Builder* de *MATLAB* está diseñada para el modelado de módulos de baterías a partir de las características de las celdas individuales. Permite ingresar parámetros eléctricos como capacidad y energía, así como propiedades físicas como altura y diámetro de las celdas. Además, ofrece la posibilidad de incorporar circuitos térmicos, permitiendo simular tanto la convección natural, ventilación forzada y la refrigeración líquida. De esta forma, se estudia el comportamiento eléctrico y térmico del módulo antes de su implementación física, lo que resulta útil para optimizar el diseño y garantizar la seguridad de la batería.

Para configurar el módulo, se introducen los datos de las celdas según la Tabla 4.1. La primera decisión de diseño consiste en definir el número de celdas en paralelo, que en este caso es 2. Mantener la separación de 1,5 [mm], ya que previene cortocircuitos y mejora la disipación térmica mediante la circulación de aire entre ellas. Esta disposición permite que la corriente se distribuya de manera más uniforme y que el calor generado durante la operación se gestione de forma más eficiente.

Posteriormente, se configuran 6 celdas en serie para completar el módulo 6s2p. La conexión en serie permite alcanzar la tensión total requerida para integrarse de manera adecuada con los convertidores y sistemas de tracción de los vehículos con pila de combustible. Al mantener la misma distancia entre celdas, se asegura que la gestión térmica y eléctrica se mantenga uniforme, evitando puntos calientes y garantizando un funcionamiento seguro y eficiente del módulo.

Finalmente, la herramienta permite integrar un circuito térmico que simula el com-

portamiento del módulo bajo diferentes condiciones de enfriamiento. Esto incluye tanto la convección natural, forzada como sistemas de refrigeración más avanzados, como la refrigeración líquida. De esta manera, es posible evaluar cómo la geometría, los materiales y la disposición de las celdas afectan la disipación de calor y la estabilidad térmica del módulo. En la Figura 5.1 se presenta el módulo diseñado con *Battery Builder*, mostrando su configuración y la disposición de las celdas.

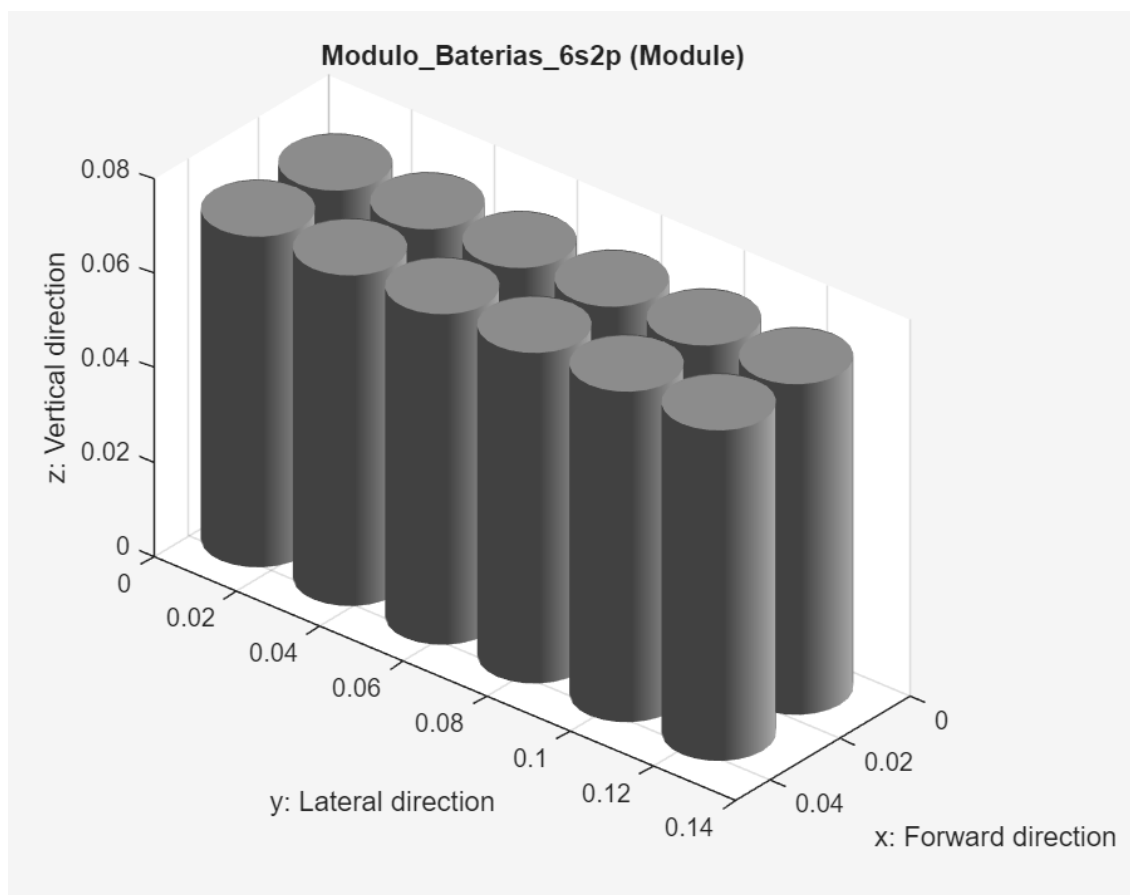


Figura 5.1. Módulo de baterías diseñado en *Battery Builder*

5.1.2. Configuración de parámetros del módulo

Esta sección describe la configuración de los parámetros utilizados en la simulación. Una vez diseñado el módulo de baterías mediante la herramienta *Battery Builder*, se ajustan los parámetros del modelo en *Simulink* para reflejar el comportamiento de las celdas reales. Esto incluye la definición de los valores iniciales y nominales de tensión, corriente, temperatura y SOC, de acuerdo con las especificaciones obtenidas del *datasheet* de las celdas [38].

Como no se dispone de las curvas exactas de SOC frente a OCV ni de SOC frente a resistencia interna de las celdas EVE INR21700/40P, para la simulación se recurre a celdas comerciales de ion litio con datos experimentales disponibles en *MATLAB*. Se selecciona la celda Molicel INR21700 P45B [43], cuyas características son comparables a las especificaciones del *datasheet* de las EVE INR21700/40P, con un rango de tensión entre 2,5 y

4,2 [V] y una resistencia interna aproximada de 13 [mΩ]. Los parámetros de esta celda se emplean tanto para la resistencia interna frente al SOC como para la curva OCV frente a SOC. Aunque no se trata de las curvas exactas de las baterías a utilizar, la celda Molicec permite reproducir de manera aproximada la dinámica de carga, descarga, temperatura y SOC, garantizando una representación adecuada del comportamiento electroquímico del módulo en la simulación.

A partir de estas curvas y de los valores nominales extraídos del *datasheet* de las baterías EVE INR21700/40P, se configuran en Simulink los parámetros iniciales y nominales del módulo, los cuales se resumen en la Tabla 5.1. Asimismo, se establece una prioridad en los parámetros iniciales según su grado de control en los ensayos reales, dando mayor precisión a aquellos que pueden fijarse experimentalmente. De esta forma, la simulación se ajusta a las condiciones más representativas de la operación práctica del módulo.

Tabla 5.1
PARÁMETROS DEL MÓDULO INTRODUCIDOS EN SIMULINK.

Párametro	Valor			Prioridad
	Nominal	Inicial Descarga	Inicial Carga	
SOC Módulo	1	0,9	≈ 0	Baja
Ciclo de carga	1000	0	0	Ninguna
Tensión Módulo	21,6 [V]	24 [V]	18 [V]	Baja
Corriente Módulo	8 [A]	0 [A]	0 [A]	Ninguna
Temperatura	25 [°C]	25 [°C]	25 [°C]	Alta
Tensión Celda	3,6 [V]	4 [V]	3 [V]	Alta
SOC Celda	1	0,9	≈ 0	Baja

Los valores nominales se asignan según los parámetros del módulo, que definen las condiciones estándar para las que fue diseñado y validado. La tensión nominal corresponde al nivel esperado durante descarga en condiciones normales, garantizando estabilidad y seguridad. La corriente nominal indica la corriente continua para operación prolongada, optimizada para preservar la vida útil. El SOC nominal representa la carga completa, es decir, la máxima capacidad de la batería. La temperatura nominal se basa en la temperatura ambiente típica del entorno operativo. En cuanto al número de ciclos, se adopta un valor nominal de 1000 ciclos completos, basado en pruebas estándar de envejecimiento y especificaciones técnicas de celdas similares, equilibrando desempeño, durabilidad y viabilidad técnica para aplicaciones de movilidad eléctrica.

Los valores iniciales se establecen en condiciones representativas del funcionamiento real del módulo. En los ensayos, los parámetros con mayor grado de control son la tensión inicial de cada celda y la temperatura de operación, fijadas para reproducir con precisión las condiciones experimentales. Durante la descarga, la tensión inicial se establece en 4 [V] por celda, lo que permite obtener alta potencia al inicio de la descarga sin superar el límite superior de la celda. La temperatura inicial de la celda se ajusta a 25 [°C], valor estándar en condiciones de ensayo. Otros parámetros que no pueden controlarse directamente, pero que influyen en la dinámica del sistema, incluyen el SOC de las celdas y la tensión total del módulo. Estos se definen a partir de curvas teóricas de baterías de ion-litio, manteniendo consistencia con la tensión inicial de 4 [V] por celda, equivalente a un SOC cercano al 90 [%], asegurando un inicio representativo y seguro de la simulación. Finalmente, se configuran los parámetros sin prioridad, dado que no son relevantes para el ensayo, como la corriente

inicial, se establecen en cero, ya que el módulo se encuentra en reposo al inicio del ensayo. El contador de ciclos también comienza en cero, indicando un módulo sin historial previo y permitiendo evaluar con precisión los efectos de los ciclos completados sobre la degradación del sistema.

Después de cada ensayo de descarga, cuando la batería alcanza su tensión mínima de 2,5 [V], al dejarla en reposo la tensión se recupera ligeramente hasta aproximadamente 3 [V] debido a la redistribución interna de potencial electroquímico. Este fenómeno ocurre porque durante la descarga la corriente genera una caída de tensión interna que desaparece al detener la descarga, y los iones de litio se redistribuyen dentro de los electrodos y el electrolito, equilibrando la concentración. A pesar de esta recuperación, la capacidad utilizable de la batería ya está prácticamente agotada, por lo que el estado de carga se considera cercano a cero, siendo necesario cargar la batería para restaurar su energía disponible y permitir la realización de ensayos siguientes.

A partir de lo anterior, para el ensayo de carga, los valores iniciales se definen de manera que la simulación comience desde un estado seguro y representativo. Los parámetros con mayor prioridad se fijan directamente, la tensión inicial de cada celda se establece en 3 [V] y la temperatura inicial de la celda se ajusta a 25 [°C]. Otros parámetros con prioridad baja, que no pueden controlarse directamente pero afectan la dinámica del módulo, incluyen el SOC de las celdas y la tensión total del módulo, los cuales se establecen cercanos a cero y 18 [V], respectivamente. Finalmente, los parámetros sin prioridad se mantienen iguales a los valores utilizados en los ensayos de descarga. La corriente inicial se establece en cero, ya que el módulo parte en reposo, aplicándose posteriormente la corriente de carga nominal. El contador de ciclos también comienza en cero, reflejando un módulo sin historial previo y permitiendo evaluar con precisión los efectos de la carga sobre la degradación del sistema.

5.1.3. Circuito Eléctrico y Térmico

5.1.3.a. Eléctrico

Para llevar a cabo los ensayos, se implementa un circuito de prueba en el que el módulo de baterías se conecta a una fuente de corriente controlada, configurada como carga activa, que permite ajustar el flujo de corriente según el tipo de ensayo a realizar. Esta fuente simula condiciones de corriente nominal, máxima y el perfil dinámico del ciclo WLTP. En los ensayos de corriente nominal y máxima, la fuente mantiene un valor constante de corriente, reproduciendo escenarios de operación estándar y de alta exigencia, respectivamente. En el caso del ciclo WLTP, la corriente varía dinámicamente en función de la potencia requerida y de la tensión instantánea del módulo, permitiendo replicar las fases de conducción y los transitorios energéticos asociados.

La instrumentación del circuito incluye medidores de corriente, que registran de forma continua el flujo eléctrico del módulo, y un voltímetro en paralelo, encargado de monitorear la tensión en los terminales. A partir de estas mediciones, se calcula la potencia instantánea como el producto de la corriente y la tensión, lo que permite evaluar de manera directa el desempeño energético del módulo en cada ensayo.

El SOC se estima en *Simulink* mediante un bloque tipo *probe*, empleando el método de Coulomb Counting, que integra la corriente de carga y descarga a lo largo del tiempo para determinar la cantidad de energía entregada o absorbida por el módulo. Esta estimación

se combina con las curvas OCV–SOC y resistencia interna–SOC de referencia para las celdas Molicel INR21700 P45B [43], lo que permite corregir posibles desviaciones y reflejar de manera más precisa la evolución del SOC durante los distintos perfiles de operación. Aunque estas curvas provienen de otro tipo de celda, su comportamiento electroquímico y límites de tensión similares permiten aproximar la dinámica de carga, descarga y evolución del SOC del módulo simulado.

De esta manera, el SOC se calcula de forma continua y dinámica, proporcionando información sobre la energía restante en el módulo y permitiendo analizar cómo la corriente, la tensión y la resistencia interna afectan su desempeño bajo distintos tipos de ensayos, incluyendo cargas, descargas y perfiles de potencia variables como los del ciclo WLTP.

5.1.3.b. Térmico

El modelo térmico del módulo de baterías considera inicialmente únicamente la transferencia de calor por convección natural entre las celdas y el ambiente. Este proceso se implementa mediante un bloque de *Convective heat transfer* en *MATLAB Simscape Thermal*, que representa cómo el calor generado por las celdas se disipa hacia el aire circundante. En convección natural, el flujo de aire es pasivo, generado únicamente por la diferencia de temperatura entre la superficie del módulo y el ambiente, sin asistencia mecánica. La superficie de contacto efectiva para la disipación es limitada, ya que no existe ningún mecanismo que active la circulación de aire alrededor de las celdas, restringiendo la capacidad de enfriamiento. Para este bloque se utiliza un coeficiente convectivo típico de $5 \text{ [W/m}^2\cdot\text{K]}$, valor representativo de enfriamiento pasivo [44].

Para mejorar la disipación térmica, en el caso de la ventilación forzada se emplea un ventilador Jason FJK6623PB230, que dirige el flujo de aire a través de un tubo de $11,5 \text{ [cm]}$ de diámetro hacia la superficie lateral de cuatro celdas contiguas. En la simulación se utiliza nuevamente el bloque *Convective heat transfer*, pero se ajusta el coeficiente convectivo según la fuerza, presión y caudal del aire del ventilador, así como la superficie de contacto efectiva, que corresponde a 4 celdas contiguas.

Con el fin de evaluar condiciones prolongadas y repetidas con movimiento, se implementa un sistema de refrigeración líquida basado en modelos de *MathWorks* [40], que simula el flujo del fluido refrigerante a través de canales térmicos integrados en el módulo. El sistema considera una bomba hidráulica que impulsa el líquido refrigerante, asegurando un caudal constante a lo largo de todos los canales que están en contacto térmico con las celdas. El líquido circula por placas o conductos de intercambio térmico, diseñados para maximizar la superficie de contacto con las celdas y homogeneizar la temperatura dentro del módulo, permitiendo un control preciso en condiciones de operación intensiva.

Finalmente, durante toda la simulación, la temperatura del módulo se monitorea mediante un sensor virtual que supervisa continuamente su valor. En concordancia con los límites de operación seguros para celdas de ion litio, se considera un umbral de $80 \text{ [}^\circ\text{C]}$ como referencia de advertencia, aunque la simulación no se interrumpe, este límite sirve como guía para el diseño y ejecución de ensayos experimentales, asegurando que la operación del módulo se mantenga dentro de condiciones seguras y evitando riesgos de sobrecalentamiento en pruebas físicas.

5.2. Ensayos

5.2.1. Descarga a Corriente nominal

El ensayo de corriente nominal consiste en descargar el módulo aplicando una corriente constante de 8 [A], equivalente a la corriente nominal. Este procedimiento permite evaluar la respuesta electroquímica y térmica del módulo bajo un régimen de descarga correspondiente a las condiciones normales de operación.

5.2.2. Descarga a Corriente máxima

Previo al ensayo con corriente máxima, se realiza una evaluación progresiva en la que se incrementa gradualmente la corriente aplicada al módulo. Este procedimiento comienza con el doble de la corriente nominal, seguido por el triple, y así sucesivamente, con el objetivo de observar el comportamiento térmico y eléctrico, para obtener una referencia que permita mayor seguridad al momento de realizar los ensayos en el laboratorio, antes de alcanzar las condiciones más críticas.

Una vez completada esta evaluación, el ensayo de corriente máxima consiste en descargar el módulo aplicando una corriente constante de 100 [A], equivalente a las condiciones de alta demanda del sistema, como aceleraciones bruscas. Este procedimiento permite analizar la respuesta electroquímica y térmica del módulo bajo un régimen de descarga extremo.

5.2.3. Carga a corriente nominal

En condiciones reales de operación, una batería no recupera su estado de carga de manera autónoma tras un proceso de descarga, por lo que es necesario realizar un ensayo de carga controlado. Este se lleva a cabo a corriente nominal, con el objetivo de restablecer el SOC y la tensión de inicio del módulo antes de cada nuevo ensayo de descarga. Este procedimiento garantiza condiciones iniciales consistentes, permitiendo una evaluación precisa y comparable del desempeño del sistema en distintos escenarios.

Este escenario parte de una condición en la que el módulo de baterías tiene la tensión de cada celda en 3 [V] y un SOC cercano a cero. A partir de esta situación, se evalúa su comportamiento durante una etapa de carga controlada hasta alcanzar los límites seguros de la batería, los cuales se resumen en la Tabla 5.1.

5.2.4. Descarga con ventilación forzada

El objetivo del ensayo es iterar los valores de corriente en la simulación de manera que la temperatura de las celdas no supere los 60 [°C], un valor inferior al límite térmico del módulo. De este modo, se busca entregar la máxima potencia posible de forma segura, manteniendo un margen amplio respecto al límite. Para implementar la ventilación forzada durante la descarga, se define un esquema en el que se utiliza un tubo con sección circular en forma de codo, colocando el ventilador en un extremo y el módulo de baterías en el otro. En este, se posiciona la cara del módulo que contiene cuatro celdas contiguas en el extremo del tubo, de manera que el flujo de aire pase directamente sobre estas celdas. En la Figura 5.2 se presenta el esquema propuesto para la ventilación forzada sobre el módulo.

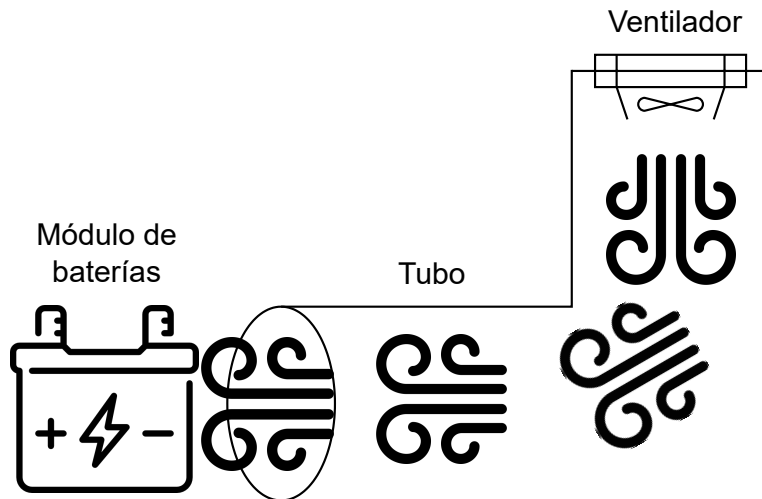


Figura 5.2. Esquema del sistema de ventilación forzada.

En la simulación, el bloque *Convective heat transfer* se configura considerando tanto la superficie de contacto del módulo que recibe el flujo de aire como el coeficiente convectivo. La superficie de contacto se define a partir de la disposición de cuatro celdas adyacentes; en la Figura 5.3 se presentan sus dimensiones detalladas. Por su parte, el coeficiente convectivo se calcula a partir de los parámetros del ventilador, como fuerza, presión y caudal de aire, con el fin de reflejar de manera precisa la capacidad de enfriamiento proporcionada por la ventilación forzada.

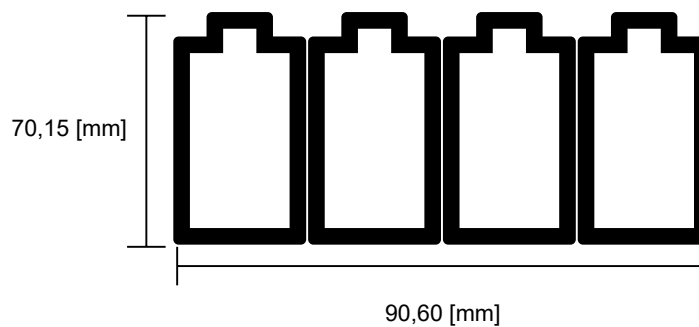


Figura 5.3. Vista frontal del módulo de baterías que se expone al flujo de aire.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor convectivo en un sistema de ventilación forzada, se siguen varios pasos. Primero, se calcula la velocidad del aire que atraviesa el módulo, considerando el caudal volumétrico proporcionado por el ventilador y el área de la sección transversal del tubo que dirige el flujo. Con esta velocidad, se determina el número de Reynolds, el cual relaciona las fuerzas inerciales con las viscosas y permite identificar si el flujo es laminar, transicional o turbulento. Este parámetro indica el régimen del flujo, que condiciona la forma en que el calor se transfiere y determina

qué correlación se debe emplear para calcular el intercambio térmico. A continuación, se utiliza el número de Prandtl, que expresa la relación entre la difusividad de cantidad de movimiento y la difusividad térmica del fluido, indicando cómo se comporta la capa límite térmica y afectando directamente la capacidad del aire para transportar calor. Con ambos valores, se obtiene el número de Nusselt mediante la ecuación de Dittus-Boelter, el cual representa la razón entre la transferencia de calor por convección y por conducción dentro del flujo. Finalmente, el coeficiente convectivo de transferencia de calor se calcula a partir del número de Nusselt, la conductividad térmica del aire y el diámetro del tubo, reflejando la capacidad real del flujo de aire para enfriar las celdas del módulo y reproduciendo el efecto de la ventilación forzada en la simulación [45] [46].

- **Área superficial del módulo que se expone al flujo de aire.**

Se realiza el supuesto de que las cuatro celdas contiguas expuestas al flujo de aire presentan una forma rectangular.

$$A_{Modulo} = L \cdot H = 90,60 \text{ [mm]} \cdot 70,15 \text{ [mm]} = 6356 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (5.1)$$

- **Determinación de la velocidad del aire (v):**

$$v = \frac{Q}{A_{tubo}} = \frac{0,0283 \text{ [m}^3\text{/s]}}{\pi \left(\frac{0,115 \text{ [m]}}{2}\right)^2} \approx 27,2 \text{ [m/s]} \quad (5.2)$$

- **Cálculo del número de Reynolds (Re):**

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{1,225 \text{ [kg/m}^3\text{]} \cdot 27,2 \text{ [m/s]} \cdot 0,115 \text{ [m]}}{18,2 \times 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}} \approx 2,07 \times 10^4 \quad (5.3)$$

- **Cálculo del número de Nusselt (Nu) usando Dittus-Boelter:**

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3} = 0,023 \cdot (2,07 \times 10^4)^{0,8} \cdot 0,71^{0,3} \approx 160,5 \quad (5.4)$$

- **Cálculo del coeficiente convectivo (h):**

$$h = \frac{Nu \cdot kt}{D} = \frac{160,5 \cdot 0,026 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}}{0,115 \text{ [m]}} \approx 36,2 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (5.5)$$

Por lo tanto, en la simulación el bloque *convective heat transfer* se configura con un coeficiente convectivo de 36,2 [W/m²K]. La superficie de contacto se considera como el área frontal del módulo, correspondiente a la disposición de cuatro celdas contiguas expuestas directamente al flujo de aire, cuyo valor es de 6.356 [mm²].

5.2.5. Ciclo WLTP

5.2.5.a. Definición

El ciclo WLTP es un protocolo internacional que evalúa consumo energético, emisiones y rendimiento vehicular. En los FCEV, permite observar la transición entre modos eléctricos, térmicos y combinados. Se divide en cuatro fases: baja, media, alta y extra alta

velocidad que simulan entornos urbanos, suburbanos y autopistas, con aceleraciones, frenadas y detenciones variables, generando un perfil dinámico exigente para el sistema de almacenamiento energético [47] [48].

Este estudio analiza el comportamiento del módulo siguiendo el ciclo WLTP clase 3, tomando como referencia el Toyota Mirai, un vehículo eléctrico con pila de combustible que integra un tren motriz eficiente y una batería de soporte. La elección del Mirai se fundamenta en su arquitectura avanzada, nivel representativo de electrificación y disponibilidad de información técnica, constituyendo un caso adecuado para evaluar la interacción entre pila y batería [49].

El ciclo contiene los gráficos de distancia velocidad y aceleración a lo largo de 1.800 segundos, divididos en cuatro fases de baja, media, alta y extra alta velocidad, estos se presentan en la Figura 5.4. Estos perfiles dinámicos incluyen variaciones constantes de aceleración, frenadas y detenciones, generando una carga de trabajo exigente para los sistemas de propulsión y almacenamiento de energía en el vehículo.

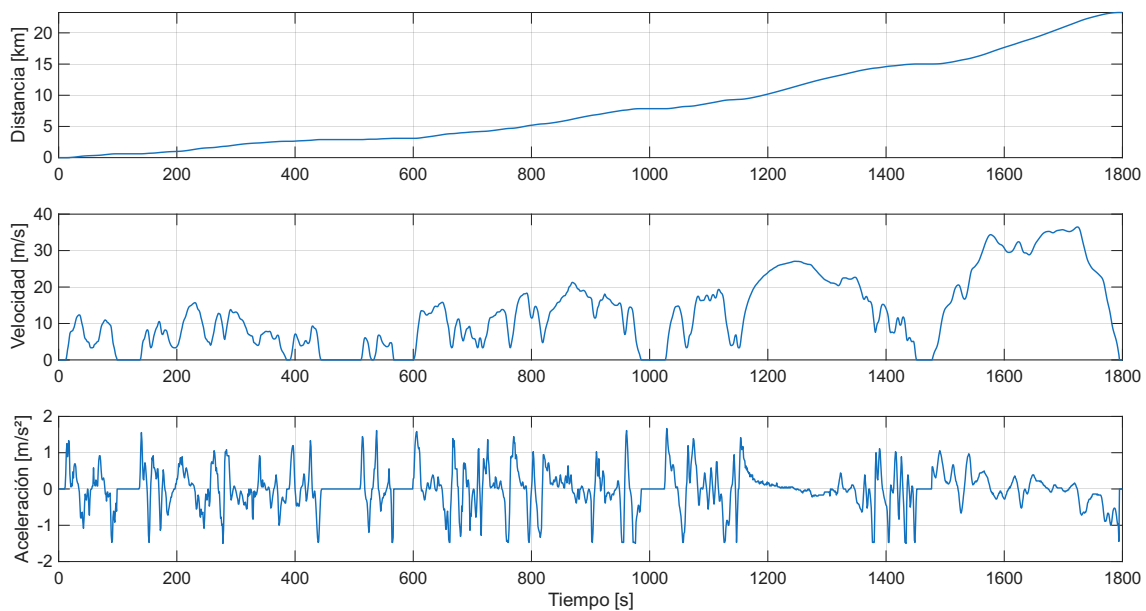


Figura 5.4. Perfil de distancia, velocidad y aceleración Ciclo WLTP [50]

5.2.5.b. Construcción del perfil

La construcción del perfil del ciclo WLTP se basa en el diagrama de cuerpo libre (DCL) del vehículo, mostrado en la Figura 5.5, que permite calcular las fuerzas que actúan en la dirección longitudinal durante el ciclo de conducción. Este modelo considera la resistencia aerodinámica, la resistencia a la rodadura, la inercia del vehículo y la componente gravitacional debida a pendientes, con el objetivo de determinar la potencia total necesaria para cumplir con el perfil de conducción definido por el ciclo WLTP. Aplicando la segunda ley de Newton, la aceleración se obtiene como resultado de la diferencia entre la fuerza de tracción y las fuerzas resistivas. Entre estas resistencias se incluyen la fuerza de rodadura, la resistencia aerodinámica y la componente del peso debida a la pendiente de la vía. Así, el equilibrio dinámico en un plano inclinado se describe considerando la inercia del vehículo igualada a la fuerza de tracción menos las resistencias mencionadas. De esta manera, esta

formulación permite calcular la fuerza neta necesaria en cada instante del ciclo, utilizando los datos de velocidad y aceleración. En la Figura 5.5 se muestra el DCL del vehículo, donde se ilustran las fuerzas involucradas y su influencia en la dinámica del sistema [51].

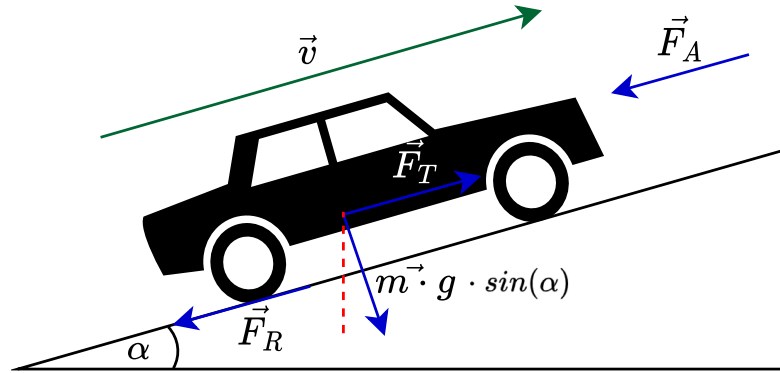


Figura 5.5. Diagrama de Cuerpo Libre del FCEV.

A partir del DCL del vehículo, se establece el balance de fuerzas en la dirección del movimiento, expresado mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$m \frac{dv}{dt} = F_T - F_R - F_A - m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (5.6)$$

$$F_R = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot C_r \quad (5.7)$$

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot S_v \cdot v^2 \quad (5.8)$$

Donde:

- m : masa total del vehículo [kg].
- $\frac{dv}{dt}$: aceleración longitudinal del vehículo.
- F_T : fuerza de tracción generada por el sistema de propulsión.
- F_R : fuerza de resistencia por rodadura.
- F_A : fuerza aerodinámica de arrastre.
- g : Aceleración de la gravedad.
- α : Ángulo de inclinación de la pendiente respecto a la horizontal.
- C_r : Coeficiente de rodadura.
- ρ : Densidad del aire.
- C_d : Coeficiente de arrastre aerodinámico.
- S_v : Área frontal del vehículo.
- v : Velocidad instantánea del vehículo.

Este conjunto de ecuaciones permite modelar la dinámica longitudinal del vehículo, considerando la influencia de la tracción, la resistencia por rodadura, el arrastre aerodinámico y la pendiente del terreno. Su objetivo es determinar la fuerza de tracción que el sistema de propulsión debe generar para superar las fuerzas resistivas y permitir el desplazamiento del vehículo. A partir del balance dinámico, la fuerza de tracción se obtiene despejando la Ecuación (5.6).

$$F_T = m \frac{dv}{dt} + F_R + F_A + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (5.9)$$

Una vez obtenida la fuerza de tracción, es posible calcular la potencia requerida por el sistema de tracción en cada instante, multiplicando dicha fuerza por la velocidad instantánea del vehículo.

$$P_T = m \cdot \frac{dv}{dt} \cdot v + m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot C_r \cdot v + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot S_v \cdot v^3 + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot v \quad (5.10)$$

Para completar el modelo, se consideran los parámetros característicos del Toyota Mirai que intervienen en las ecuaciones de potencia de tracción, incluyendo la masa total del vehículo, el área frontal y la tensión nominal del sistema [52], así como el coeficiente de arrastre aerodinámico y el coeficiente de resistencia a la rodadura [53] [54]. Asimismo, se incorporan dos constantes físicas independientes del vehículo: la aceleración gravitacional, definida según el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) [55], y la densidad del aire, tomada de la norma ISO 2533:1975 para condiciones atmosféricas estándar a nivel del mar [56]. Los valores numéricos de todos estos parámetros se presentan en las Tablas 5.2, 5.3 y 5.4.

Tabla 5.2

PARÁMETROS DEL TOYOTA MIRAI [52].

Parámetro	Valor
Masa	1950 [kg]
Área Superficial	2,35 [m ²]
Tensión	310,8 [V]

Tabla 5.3

COEFICIENTES AERODINÁMICO Y DE RODADURA TÍPEAKS DEL TOYOTA MIRAI [53] [54].

Parámetro	Valor
Arrastre Aerodinámico	0,29
Resistencia de Rodadura	0,01

Tabla 5.4

CONSTANTE GRAVITACIONAL Y DENSIDAD DEL AIRE ESTABLECIDOS POR NORMATIVAS [55] [56].

Constantes	Valor
Gravitacional	9,81 [m/s ²]
Densidad del aire	1,225 [kg/m ³]

Con estos parámetros se calcula la potencia total requerida por el vehículo, que incluye tanto la pila de combustible como la batería. El interés principal es determinar la potencia específica que debe suministrar la batería, la cual se obtiene como la diferencia entre la demanda total del vehículo y la potencia entregada por la pila de combustible.

La potencia suministrada por la pila de combustible se modela mediante una función dinámica que incorpora un retraso temporal característico de 1,5 segundos. Este retraso refleja las limitaciones inherentes al sistema electroquímico de las PEMFC, tales como la difusión de reactivos, la gestión térmica y el control de agua, condicionando la respuesta transitoria del generador y generando un desfase entre la demanda de potencia y la entrega efectiva [57] [58] [59]. De esta manera, la potencia neta que debe aportar la batería se obtiene restando la potencia entregada con retraso de la demanda total del vehículo.

Conociendo la tensión nominal del Toyota Mirai y del módulo diseñado, se determina el número de módulos en serie necesarios dividiendo la tensión total del vehículo entre la tensión de un módulo. Como se requiere un número entero de módulos, el resultado se redondea hacia arriba, garantizando que la tensión total del conjunto cumpla o supere el valor requerido por el sistema de propulsión. Este procedimiento asegura que cada módulo opere dentro de sus límites nominales, manteniendo la seguridad y eficiencia del sistema.

$$\text{Total Módulos} = \frac{V_{\text{Mirai}}}{V_{\text{Modulo}}} = \frac{310,8 \text{ [V]}}{21,6 \text{ [V]}} \approx 15 \quad (5.11)$$

A partir del cálculo anterior, se determina que se requieren 15 módulos conectados en serie para alcanzar la tensión nominal del sistema de propulsión del vehículo. En la Figura 5.6 se presentan las curvas de potencia correspondientes a la demanda total del vehículo, la potencia suministrada por la pila de combustible, la potencia total del pack de baterías, y la potencia demandada específicamente por un módulo.

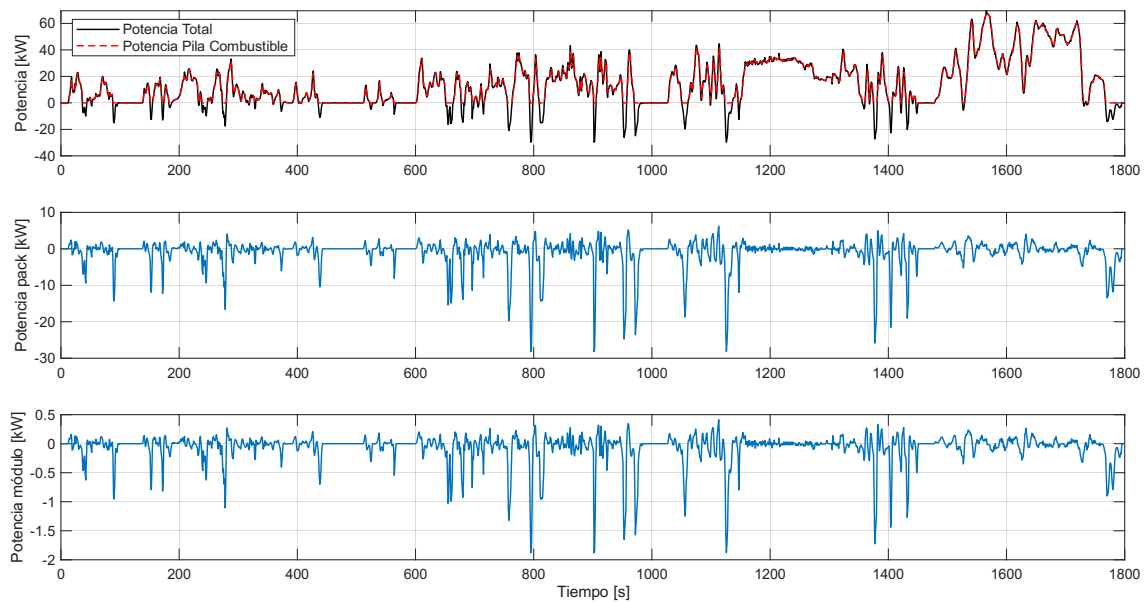


Figura 5.6. Perfil Ciclo WLTP de Potencia.

Con el perfil de potencia del módulo obtenido, la simulación del ciclo WLTP calcula

dinámicamente la corriente demandada en cada instante dividiendo la potencia entre la tensión instantánea del módulo.

5.3. Resultados

5.3.1. Descarga a Corriente nominal

La Tabla 5.5 muestra los valores iniciales, finales y sus diferencias, mientras que la Figura 5.7 representa la evolución temporal de los parámetros durante el ensayo.

Tabla 5.5
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 1C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,647[V]	1,353 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	15,132 [V]	8,118 [V]
Potencia	192,000[W]	121,056 [W]	64,944 [W]
Temperatura	24,996 [°C]	37,054 [°C]	12,059 [°C]
SOC	89,130 [%]	0 [%]	89,130 [%]
Tiempo	0 [s]	3250 [s]	3250 [s]

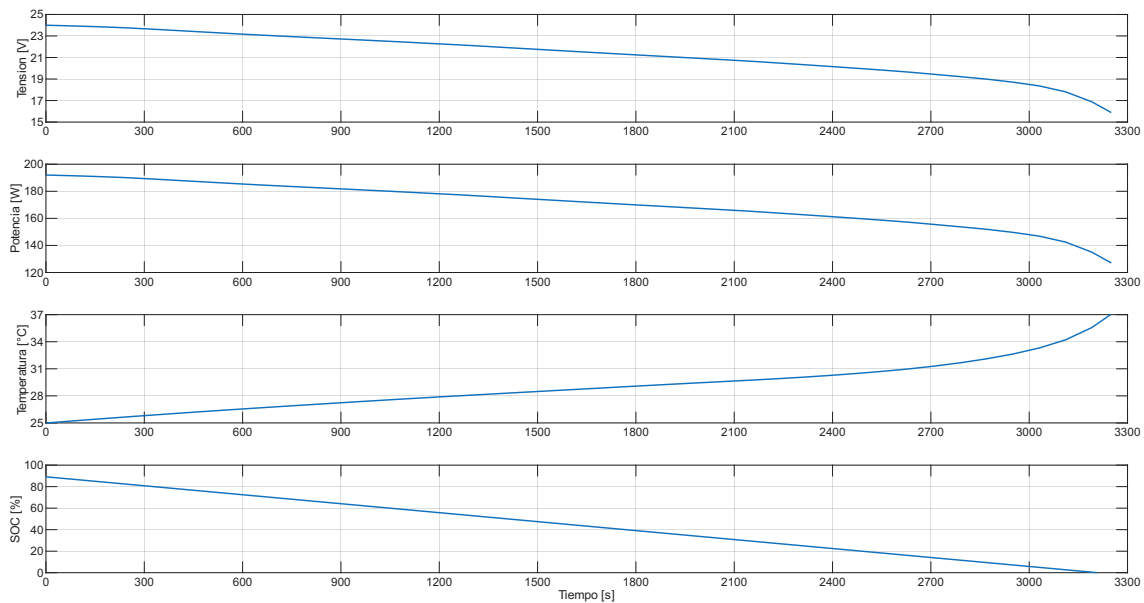


Figura 5.7. Resultados del ensayo de descarga a 1C.

El ensayo de descarga a 1C evidencia que durante la prueba no se le está exigiendo al máximo. La tensión de las celdas y del módulo disminuye progresivamente mientras se entrega energía, y el SOC alcanza 0% antes de que las celdas lleguen a su límite inferior de tensión, indicando que la batería se protege frente a una descarga excesiva.

La potencia del módulo se mantiene estable y proporcional a la tensión durante la zona lineal de descarga, hasta aproximadamente los 2.700 segundos, mostrando que el módulo puede entregar energía de manera segura en condiciones nominales. Posteriormente, en la

zona final de descarga, la potencia disminuye de forma exponencial, por lo que no es seguro exigir potencia en esta etapa, ya que la tensión de las celdas se aproxima a su límite inferior y la batería podría dañarse.

Por su parte, la temperatura del módulo aumenta de manera moderada y se mantiene dentro de rangos seguros durante la mayor parte de la descarga, esto es esperable dado que el módulo esta operando a una demanda típica. El tiempo total de descarga registrado fue menor al tiempo teórico de una hora que correspondería a una descarga completa a 1C, debido a que el ensayo se inició con un SOC inicial cercano al 90 %.

5.3.2. Descarga a Corriente máxima

La Tabla 5.6 y la Figura 5.8 muestran los valores iniciales y finales de los parámetros medidos, así como su evolución temporal durante todo el ensayo; dado que la corriente de descarga se incrementa gradualmente, las simulaciones de los niveles intermedios se presentan en el Anexo A.2.1.

Tabla 5.6
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A CORRIENTE MÁXIMA.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,500 [V]	1,500 [V]
Tensión Módulo	24,00 [V]	15,000 [V]	9,000 [V]
Potencia	2400,000 [W]	1500,000 [W]	900,000 [W]
Temperatura	24,996 [°C]	75,603 [°C]	50,607 [°C]
SOC	95,242 [%]	17,638 [%]	77,605 [%]
Tiempo	0 [s]	205 [s]	205 [s]

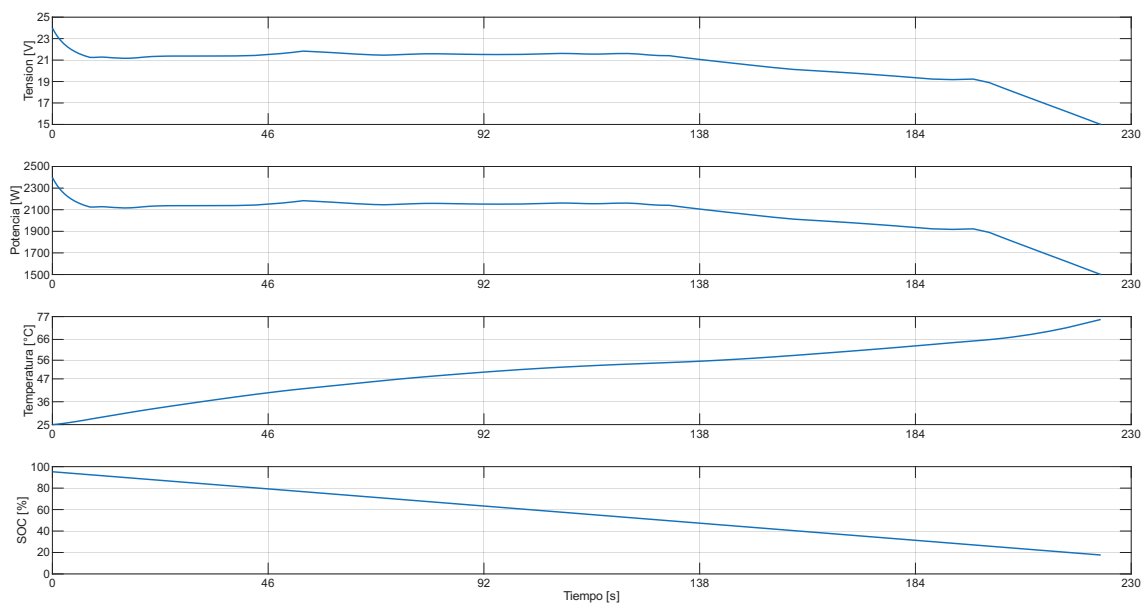


Figura 5.8. Resultados del ensayo de descarga a corriente máxima.

El ensayo de descarga a corriente máxima evidencia que el módulo de baterías presenta

un comportamiento más inestable en comparación con la descarga a 1C, dado que a las celdas se les está exigiendo su máxima capacidad. Durante la prueba, la tensión de las celdas y del módulo disminuye rápidamente, reflejando la alta demanda de potencia. La curva de descarga de la tensión muestra un comportamiento discontinuo, con pequeñas subidas y bajadas, lo que provoca que la entrega de potencia no sea siempre máxima.

A pesar de la alta exigencia y del comportamiento discontinuo, existe una zona lineal de descarga durante los primeros 132 segundos, en la que la potencia tiene comportamiento estable y puede ser entregada de manera segura. Posteriormente, la curva se vuelve exponencial, por lo que la entrega de potencia ya no es segura, ya que la tensión de las celdas se aproxima a su límite mínimo y el riesgo de daño aumenta.

La temperatura del módulo experimenta un aumento considerable a lo largo de la descarga, alcanzando valores cercanos a 78 [°C]. Durante la zona lineal, la temperatura se incrementa de manera gradual y controlada, reflejando la disipación de calor eficiente y la capacidad del módulo para manejar corrientes elevadas sin comprometer la seguridad. Sin embargo, al entrar en la zona exponencial de descarga, el incremento de temperatura se vuelve más rápido debido a la caída pronunciada de tensión y al esfuerzo máximo de las celdas. Este aumento térmico contribuye a que el comportamiento de la descarga sea más inestable, generando pequeñas subidas y bajadas en la tensión, lo cual está asociado al modelo de resistencia interna utilizado, que refleja cómo la resistencia de las celdas varía con la temperatura y con la corriente. A pesar de este incremento significativo, la temperatura no supera el límite crítico de las celdas.

El tiempo total de descarga registrado fue de 205 segundos, mucho menor que en condiciones nominales, debido a la elevada corriente aplicada y al SOC inicial de 95 [%]. En conjunto, los resultados muestran que, aunque el módulo puede entregar energía de forma segura durante la zona lineal, la descarga a corriente máxima genera condiciones inestables, con una caída pronunciada de tensión y un aumento rápido de temperatura, por lo que la entrega de potencia más allá de la zona lineal debe evitarse para proteger las celdas, esto se debe a que el modelo no es capaz de representar demandas exigentes de corriente.

5.3.3. Carga a Corriente nominal

La Tabla 5.7 resume los valores iniciales y finales de los parámetros monitoreados, así como sus variaciones durante el ensayo, mientras que la Figura 5.9 muestra cómo evolucionan estas variables a lo largo del tiempo.

Tabla 5.7
RESULTADOS DEL ENSAYO DE CARGA A 1C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	3,306 [V]	4,202[V]	0,896 [V]
Tensión Módulo	19,835 [V]	25,211 [V]	8,323 [V]
Potencia	158,679 [W]	201,692 [W]	43,013 [W]
Temperatura	24,996 [°C]	33,987 [°C]	8,991 [°C]
SOC	0,010 [%]	100,028 [%]	99,928 [%]
Tiempo	0 [s]	3598 [s]	3598 [s]

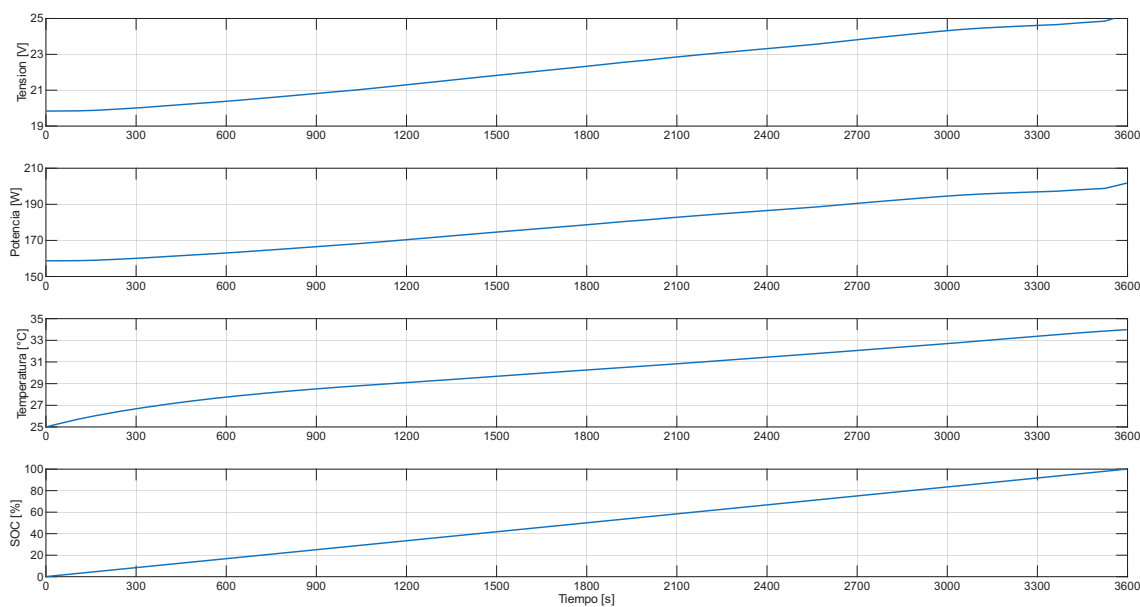


Figura 5.9. Resultados del ensayo de carga a 1C.

El ensayo de carga a 1C evidencia que el módulo de baterías presenta un comportamiento estable durante la recarga, ya que la corriente aplicada se encuentra dentro de los límites nominales del módulo. Las celdas parten de una tensión cercana a 3,3 [V], dado que, según las curvas características implementadas en el simulador, la celda descargada a SOC 0 no llega a su límite inferior de tensión. A medida que se suministra energía, la tensión de las celdas aumenta progresivamente, y la tensión del módulo también se incrementa de manera controlada, alcanzando los valores finales esperados sin presentar caídas ni variaciones, lo que refleja un comportamiento seguro del sistema.

La potencia durante la carga se incrementa de forma gradual y proporcional al aumento de tensión, mostrando que el módulo puede absorber energía de manera eficiente. Este comportamiento lineal asegura que las celdas se cargan de manera uniforme, evitando esfuerzos excesivos que podrían afectar su vida útil.

La temperatura del módulo aumenta moderadamente, pasando de aproximadamente 25[°C] a 34 [°C], reflejando el efecto térmico de la corriente de carga. El incremento térmico es controlado y se mantiene dentro de los límites seguros, indicando que la gestión térmica es adecuada durante la recarga a corriente nominal.

El SOC llega a un 100 [%] mostrando que el módulo fue cargado por completo y que la corriente aplicada permite una carga eficiente sin comprometer la seguridad de las celdas. El tiempo total de carga registrado fue de 3598 segundos, aproximadamente una hora, lo que concuerda con lo esperado para una recarga a 1C desde un SOC inicial.

5.3.4. Descarga con ventilación forzada

En este ensayo, se modifican los parámetros de área de contacto y coeficiente de convección en el bloque *Convective Heat Transfer* y se iteran distintos valores de corriente hasta alcanzar una temperatura de 60 [°C]. Se determina que con una corriente de 50 [A] se alcanza dicho valor, los resultados se presentan en la Tabla 5.8 y en la Figura 5.10.

Tabla 5.8
 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA CON VENTILACIÓN FORZADA.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,500 [V]	1,500 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	15,000 [V]	9,000 [V]
Potencia	1200 [W]	750 [W]	450 [W]
Temperatura	24,563 [°C]	59,881 [°C]	35,318 [°C]
SOC	90 [%]	12,791 [%]	77,209 [%]
Tiempo	0 [s]	445 [s]	445 [s]

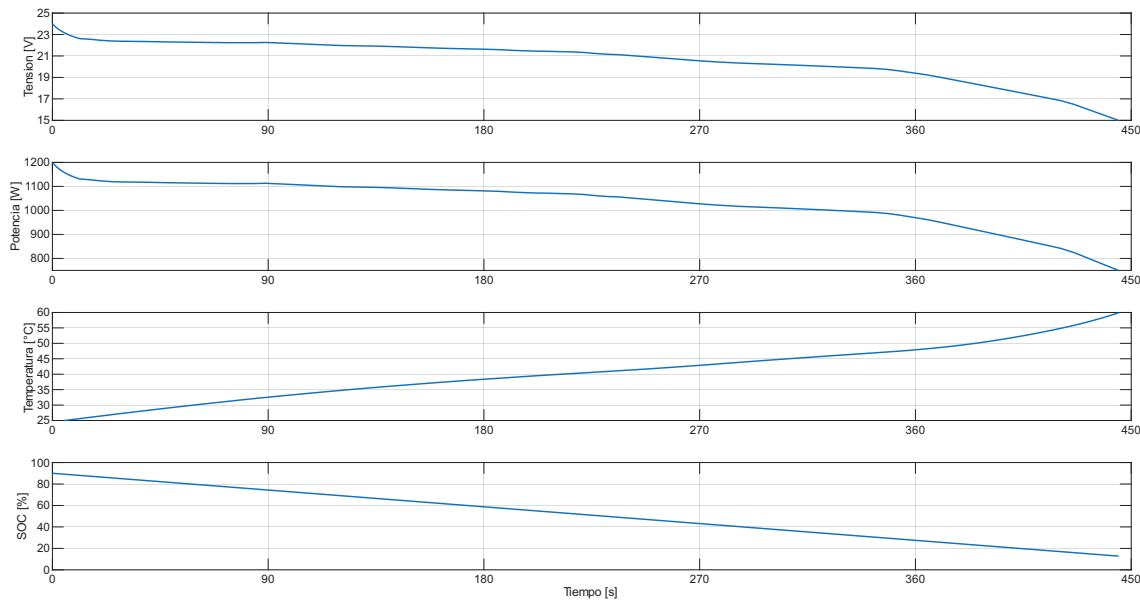


Figura 5.10. Resultados del ensayo de descarga con ventilación forzada.

El ensayo de descarga con ventilación forzada evidencia que la temperatura del módulo disminuye en comparación con la descarga bajo convección natural. El valor máximo alcanza 59,9[°C], aproximadamente 6 [°C] menor que en la descarga a 6C sin ventilación activa, como se observa en la Figura y Tabla 6 y 5 del Anexo, lo que demuestra que la ventilación forzada mejora la disipación de calor frente a la convección natural. Esto se debe a que el aire pasa entre las celdas, remueve el calor y disminuye la temperatura del módulo durante la operación.

Durante la descarga, el flujo de aire que circula entre las celdas tiene un caudal de 102 [m³/h], equivalente a aproximadamente 0,0283[m³/s]. Considerando un tiempo de ensayo de 496 [s], el volumen total de aire que pasa entre las celdas es de aproximadamente 14 [m³]. Este significativo flujo de aire remueve el calor generado durante la descarga, disminuye la temperatura del módulo y refuerza la disipación térmica en comparación con la convección natural, tal como se observa en la reducción de 6[°C] en la temperatura máxima.

5.3.5. Ciclo WLTP

La Figura 5.11 muestra la evolución temporal de los parámetros estudiados, mientras que las Tablas 5.9 y 5.10 resumen sus valores iniciales y finales, así como los valores mínimos y máximos registrados durante el ensayo.

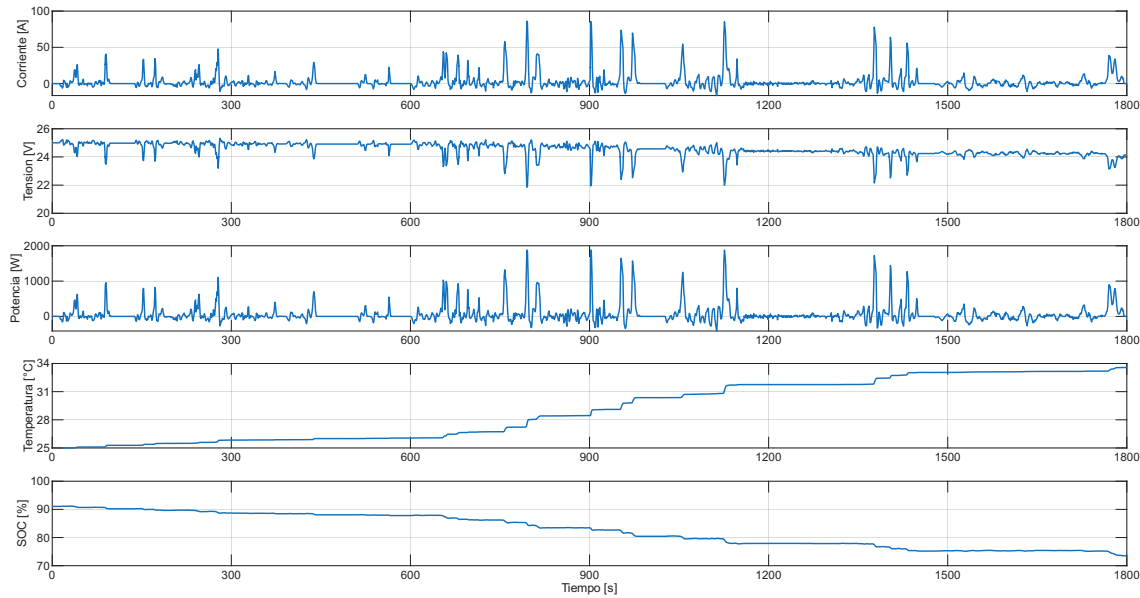


Figura 5.11. Resultados del ensayo del Ciclo WLTP.

Tabla 5.9

RESULTADOS DEL ENSAYO DEL CICLO WLTP.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión	24,846 [V]	24,622 [V]	0,224 [V]
Temperatura	25 [°C]	33,573 [°C]	7,77 [°C]
SOC	92,107 %	73,513 %	18,594 %

Tabla 5.10

VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DEL ENSAYO DEL CICLO WLTP.

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo
Corriente	-16,530 [A]	85,987 [A]
Potencia	- 413 [W]	1879 [W]
Tensión	21,850 [V]	24,640 [V]

El ensayo del ciclo WLTP evidencia que el módulo de baterías mantiene un comportamiento estable bajo convección natural durante un ciclo de conducción representativo. La tensión del módulo disminuye ligeramente mientras que el SOC desciende de manera progresiva, mostrando que la batería entrega energía de forma controlada y eficiente sin alcanzar niveles críticos de descarga. La temperatura del módulo aumenta de manera moderada, indicando que la convección natural es suficiente para disipar el calor generado durante un ciclo único y mantener las celdas dentro de rangos seguros.

Los valores máximos y mínimos de corriente y potencia muestran que el módulo soporta los *peaks* de demanda típicos del ciclo WLTP. La corriente y la tensión se mantienen dentro de sus rangos seguros, mientras que la potencia se ajusta proporcionalmente, confirmando que el módulo responde dinámicamente a las condiciones de conducción y mantiene un desempeño seguro y estable durante un ciclo normalizado. Cabe destacar que los valores mínimos de corriente y potencia presentan signo negativo, ya que representan momentos de carga del módulo durante el ciclo, los cuales ocurren cuando el vehículo desacelera o frena, mientras que los valores máximos presentan signos positivos, los cuales corresponden a momentos de descarga, cuando la batería entrega energía para acelerar o mantener la velocidad.

Sin embargo, la temperatura alcanzada sugiere que si se aplican múltiples ciclos consecutivos, la acumulación de calor podría superar los niveles alcanzados en un solo ciclo. Esto indica que la convección natural resulta insuficiente para mantener la temperatura bajo control en operación continua, y sería necesario aplicar refrigeración líquida para garantizar la seguridad del módulo en escenarios de uso prolongado.

5.3.6. Ciclos WLTP repetidos con refrigeración Líquida

Dado que en el ensayo inicial del ciclo WLTP el módulo de baterías no superó los límites térmicos establecidos, en esta etapa se busca simular el comportamiento térmico del sistema cuando se somete a múltiples repeticiones del mismo ciclo. Con este objetivo, se analiza la evolución de la temperatura del módulo bajo una secuencia continua de ciclos WLTP, intercalados con periodos de reposo con carga, a fin de evaluar la efectividad del sistema de refrigeración líquida frente a una acumulación progresiva de calor. De esta manera, se puede observar cómo responde la gestión térmica ante escenarios más exigentes y prolongados, aproximándose a condiciones de operación realistas donde el vehículo puede enfrentar ciclos intensivos de uso con pausas intermedias.

En este contexto, el sistema de refrigeración líquida permite mantener la temperatura del módulo de baterías dentro de rangos seguros y operativamente estables, incluso bajo condiciones de carga térmica acumulativa.

Para recrear este escenario, se implementa una secuencia de cuatro repeticiones consecutivas del ciclo WLTP. Entre cada repetición, se incluye un periodo de reposo de 600 segundos durante el cual el módulo de baterías no demanda tracción, pero recibe una carga constante de 172,8 [W], que corresponde a la potencia nominal del módulo. En total, el ensayo tiene una duración de 9.000 segundos. Este tiempo de carga se selecciona para equilibrar la duración de una pausa operativa, como una recarga o detención, y el objetivo de generar un efecto térmico apreciable sin alterar significativamente la dinámica energética del sistema. Así, esta pausa simula el efecto energético de la pila de combustible durante períodos de baja exigencia del vehículo, enfocándose en el comportamiento térmico y eléctrico del módulo de baterías.

La inclusión de estas fases de carga en reposo permite analizar el impacto térmico acumulado tanto por la descarga durante la conducción como por la disipación interna generada durante la recarga. En consecuencia, resulta fundamental para validar la eficacia del sistema de refrigeración líquida bajo condiciones prolongadas, repetitivas y representativas del uso real.

Finalmente, en la Figura 5.12 se presenta el perfil de carga junto con los resultados de

tensión, corriente, temperatura y SOC obtenidos en el ensayo.

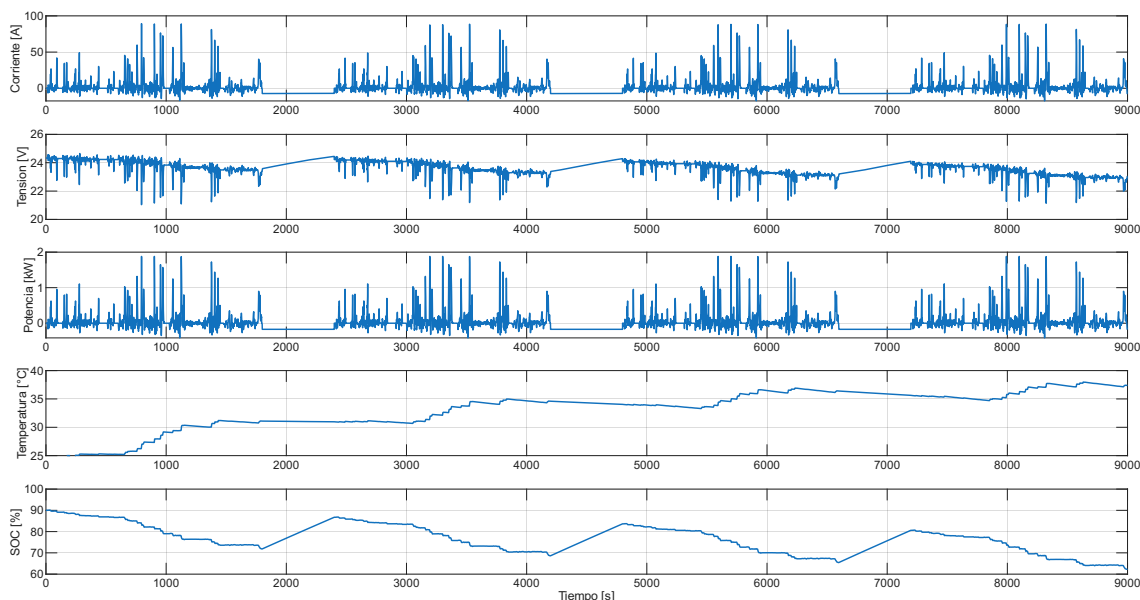


Figura 5.12. Resultados del ensayo del Ciclo WLTP con Refrigeración Líquida.

Tal como se mencionó anteriormente, el ensayo del ciclo WLTP con refrigeración líquida se realiza únicamente en el entorno de simulación mediante *Simulink*, con el objetivo de evaluar teóricamente la eficacia de esta estrategia bajo condiciones prolongadas de operación.

Durante las cuatro repeticiones consecutivas del ciclo WLTP, intercaladas con periodos de reposo y carga, se observa una evolución característica de las variables térmicas y eléctricas del módulo. En cada fase de conducción, la generación interna de calor debido al paso de corriente provoca un aumento progresivo de la temperatura del módulo. La refrigeración líquida, sin embargo, logra reducir la temperatura en aproximadamente $2,77$ $^{\circ}\text{C}$ durante la conducción, demostrando su efectividad para mantener la operación dentro de márgenes seguros.

En los periodos de reposo, la temperatura se mantiene relativamente constante, lo que es consistente con la ausencia de carga de conducción. Cuando se aplica carga durante estos intervalos, la temperatura comienza a descender, evidenciando la acción activa del sistema de refrigeración líquida. De este modo, el módulo logra mantenerse por debajo del límite térmico de 80 $^{\circ}\text{C}$ a lo largo de todo el ensayo, cumpliendo con los objetivos de control térmico.

El SOC muestra una dinámica esperada, disminuye durante las fases de conducción conforme se entrega energía al sistema y aumenta durante los periodos de carga. No obstante, al final de cada ciclo de descarga, el SOC no alcanza completamente su valor inicial, sino un nivel ligeramente inferior, lo que indica que el módulo podría requerir un aporte adicional de carga para recuperar completamente la energía utilizada.

La tensión y la corriente del módulo presentan variaciones coherentes con el perfil de potencia del ciclo WLTP, respondiendo de manera directa a las demandas energéticas de cada etapa.

En conjunto, los resultados confirman que la refrigeración líquida cumple su función principal de controlar la temperatura durante la operación en conducción y mantener condiciones seguras en periodos de carga, contribuyendo a la estabilidad térmica y al rendimiento del módulo bajo ciclos prolongados de operación.

Estos resultados permiten concluir que la refrigeración líquida contribuye de manera efectiva a disipar el calor generado, especialmente durante los periodos de reposo, en los que la temperatura puede descender hasta valores cercanos a 30 [°C] después del primer ciclo, bajando la temperatura en 3 [°C]. En comparación con el escenario de convección natural, donde la acumulación térmica es mayor, esta estrategia demuestra ser más eficiente para mantener el módulo dentro de condiciones térmicamente estables en escenarios prolongados y repetitivos.

Capítulo 6

Evaluación del desempeño en laboratorio

La validación experimental constituye una etapa fundamental para contrastar el desempeño del módulo de baterías con los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en *MATLAB/Simulink*. En este caso, se replican en laboratorio los ensayos de descarga y carga, excluyendo el ciclo WLTP por limitaciones de equipamiento, con el fin de evaluar el comportamiento térmico y eléctrico del sistema bajo condiciones controladas.

En primera instancia, se construye el módulo de baterías, detallando el proceso de ensamblaje, la disposición de las celdas y los esquemas de conexión empleados en cada ensayo. Posteriormente, se llevan a cabo las pruebas experimentales conforme a los lineamientos de seguridad establecidos en las normativas internacionales, lo que permite analizar la respuesta térmica y eléctrica del módulo bajo condiciones controladas y compararlas con los resultados de simulación.

Todos estos ensayos se ejecutan conforme a los lineamientos establecidos en las normativas internacionales IEC 62133 [11] e IEC 60086 [12] las cuales definen los criterios de seguridad, confiabilidad y desempeño aplicables a las pruebas de baterías. No obstante, en este trabajo se busca además llevar al módulo hacia condiciones de operación cercanas a su límite seguro, con el fin de analizar su respuesta térmica y eléctrica en escenarios exigentes y obtener información relevante para validar el diseño.

Durante las pruebas, se registra también el tiempo que tarda el módulo en enfriarse hasta alcanzar la temperatura ambiente después de haber alcanzado su máxima temperatura, evaluando la disipación tanto por convección natural como por ventilación forzada. El objetivo de esta metodología es comparar los resultados experimentales con los simulados y verificar la precisión del modelo, asegurando que las estrategias de gestión térmica implementadas sean efectivas.

Para garantizar la seguridad durante los ensayos, las corrientes de descarga se aplican de forma escalonada, comenzando con la corriente nominal y aumentando posteriormente a múltiplos de esta hasta alcanzar la corriente máxima, lo que permite observar la respuesta del módulo bajo distintos niveles de demanda. Estas pruebas permiten caracterizar el desempeño eléctrico y térmico del módulo bajo distintos escenarios de operación, desde demandas constantes hasta perfiles variables de carga, asegurando que el comportamiento del módulo sea consistente con el modelo simulado.

En los ensayos de laboratorio se mide la tensión, la corriente y la temperatura del módulo de baterías, ya que estos parámetros no solo reflejan su comportamiento eléctrico y térmico, sino que también son fundamentales para la seguridad para evitar que los equipos operen fuera de sus límites. A partir de la tensión y la corriente, se calcula la potencia en *MATLAB*, lo que permite analizar la energía suministrada o absorbida por el módulo durante cada fase del ensayo.

El SOC se estima utilizando una técnica combinada de *Coulomb Counting* y el método de OCV. El primer método integra la corriente de carga y descarga a lo largo del tiempo, ajustando la capacidad efectiva de la batería según las condiciones térmicas y eléctricas, lo que proporciona un seguimiento continuo del nivel de carga en tiempo real. Por otro lado, el método OCV corrige la estimación acumulada considerando la relación entre la tensión de la batería en reposo y su nivel de carga, permitiendo compensar errores acumulados por pequeñas desviaciones en la medición de corriente o cambios en la capacidad nominal debido a la temperatura y el envejecimiento de las celdas.

Para llevar a cabo las cargas y descargas del módulo de baterías se emplea la carga electrónica *Chroma* 63803 [60] y la fuente de alimentación *DC Laboratory Power Supply* E.A-PSI 9360-15 [61]. Sin embargo, el *Chroma* solo puede suministrar hasta 36 [A], por lo que, para descargar el módulo a corrientes mayores, se instalan resistencias en paralelo, logrando que el módulo se descargue a mayor corriente. Las resistencias disponibles en el laboratorio tienen un valor de 1 [Ω] y una corriente máxima de 40 [A], por lo que su disposición debe configurarse según la corriente deseada. Dado que la corriente que pasa por la resistencia depende de la tensión del módulo, la corriente de descarga no es constante; para ello, durante la descarga, la corriente suministrada por el *Chroma* se ajusta manualmente para mantener la corriente de descarga constante. En la Tabla 6.1 se muestra la corriente asociada al módulo, la *Chroma* y las resistencias, así como la disposición de estas últimas y sus valores correspondientes.

Tabla 6.1

DISPOSICIÓN DE LAS RESISTENCIAS PARA DESCARGAR EL MÓDULO A MAYOR CORRIENTE.

C-rate	Corriente Módulo [A]	Disposición resistencias	Resistencia [Ω]	Corriente resistencia [A]	Corriente inicial Chroma [A]
5C	40	Solo una	1,00	24	16
6C	48	Solo una	1,00	24	24
7C	56	Solo una	1,00	24	32
8C	64	2 en paralelo	0,50	48	16
9C	72	2 en paralelo	0,50	48	24
10C	80	2 en paralelo	0,50	48	32
11C	88	3 en paralelo	0,33	72	16
12C	96	3 en paralelo	0,33	72	24
12,5C	100	3 en paralelo	0,33	72	28

De manera complementaria, el BMS (Battery Management System) se conecta a los terminales de cada celda del módulo, registrando continuamente los valores de tensión y temperatura. Su función principal es garantizar la seguridad del sistema, evitando que las celdas operen fuera de los límites establecidos y protegiendo la integridad del módulo durante los ciclos de carga y descarga. Asimismo, el BMS realiza el balanceo pasivo de las celdas, equilibrando la carga entre ellas mediante la disipación de energía en las celdas con mayor tensión, lo que asegura un SOC uniforme y prolonga la vida útil del módulo.

Además, permite el monitoreo en tiempo real de la tensión y la temperatura mediante el software *Battery Management Studio* de Texas Instruments, conectado al computador a través de un conversor USB-TTL. La configuración del equipo se realiza siguiendo la guía *Getting Started with the BQ79606A-Q1GUI* de Texas Instruments [62], la cual proporciona un procedimiento detallado para ajustar los parámetros de protección, establecer umbrales críticos de tensión y temperatura, y activar el balanceo pasivo. Esta guía asegura que el módulo de baterías funcione de manera segura y eficiente, adaptando el comportamiento del BMS a las características específicas del diseño del módulo 6s2p utilizado en los ensayos.

6.1. Construcción del módulo

El módulo de baterías 6s2p se construye con celdas EVE INR21700/40, disponiendo las celdas en paralelo y serie, es decir, seis celdas en serie y dos en paralelo. Las celdas se conectan mediante láminas de cobre capaces de soportar corrientes de hasta 100 [A]. En la Figura 6.1 se presenta el módulo construido.



Figura 6.1. Módulo de baterías 6s2p.

6.2. Esquemas de conexión

El esquema de conexión está compuesto por el módulo de baterías, al cual se conectan en sus terminales la carga electrónica *Chroma*, para los ensayos de descarga, o la fuente de alimentación *DC Laboratory Power Supply*, para los ensayos de carga. En paralelo al módulo se instalan resistencias fijas, incorporando un interruptor entre ambos que permite conectarlas únicamente cuando se requiera su utilización. Finalmente, se incluyen amperímetros y voltímetros con el fin de supervisar las magnitudes eléctricas y garantizar que el circuito opere bajo condiciones seguras. En la Figura 6.2 se presenta el esquema de conexión.

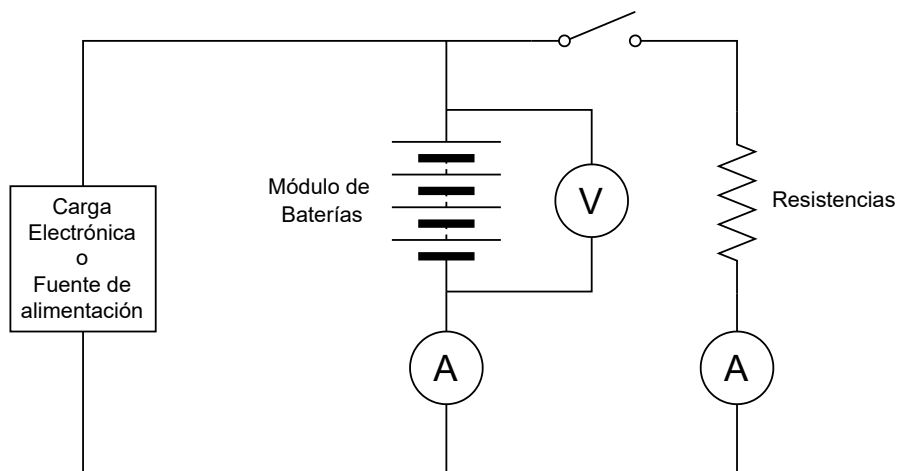


Figura 6.2. Esquema del circuito experimental del módulo de baterías.

Este esquema de conexión permite realizar los ensayos de descarga y carga de las baterías siguiendo las directrices establecidas en las normas IEC 62133 e IEC 60086, asegurando que las pruebas se ejecuten dentro de límites seguros y respetando los procedimientos de caracterización y protección de celdas de ion-litio.

6.3. Resultados

6.3.1. Descarga a Corriente nominal

En la Tabla 6.2 se presentan los valores iniciales y finales de cada parámetro. Por su parte, las Figuras 6.3 y 6.4 muestran los resultados del ensayo de descarga a corriente nominal, la primera refleja la variación de tensión de cada celda individual en función del tiempo, mientras que la segunda incluye la evaluación de parámetros como tensión, potencia, temperatura y SOC del módulo a lo largo del tiempo.

Tabla 6.2
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 1C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,012 [V]	2,504 [V]	1,508 [V]
Tensión Celda 2	4,009 [V]	2,508 [V]	1,501 [V]
Tensión Celda 3	4,007 [V]	2,508 [V]	1,499 [V]
Tensión Celda 4	3,995 [V]	2,497 [V]	1,498 [V]
Tensión Celda 5	3,989 [V]	2,490 [V]	1,499 [V]
Tensión Celda 6	3,994 [V]	2,490 [V]	1,504 [V]
Tensión Módulo	24,006 [V]	14,997 [V]	9,009 [V]
Potencia Módulo	192,048 [W]	119,976 [W]	72,072 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	37,022 [°C]	12,022 [°C]
SOC Módulo	89,180 [%]	0 [%]	89,180 [%]
Tiempo	0 [s]	3206 [s]	3206 [s]

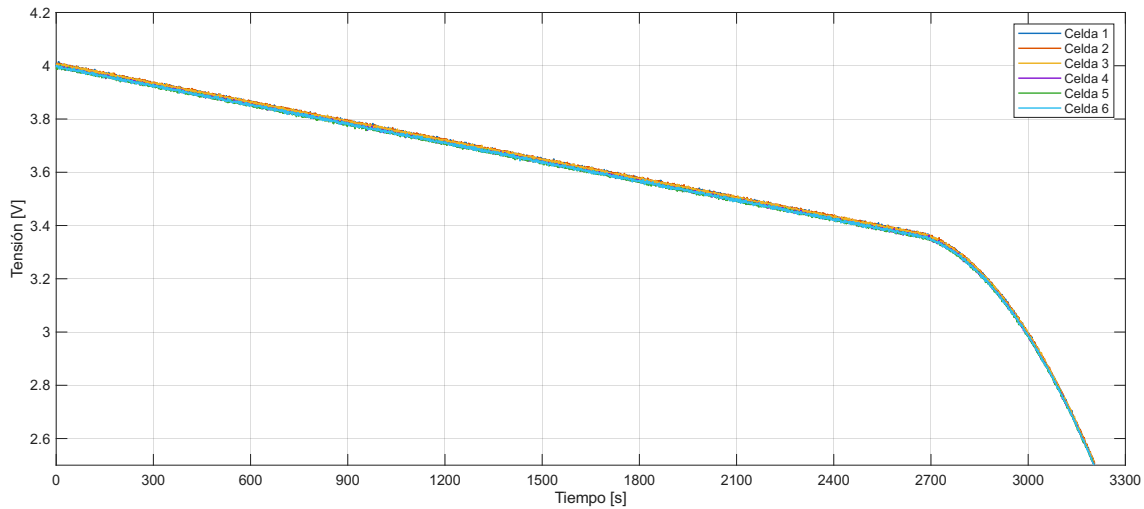


Figura 6.3. Descarga de cada celda a 1C en el laboratorio.

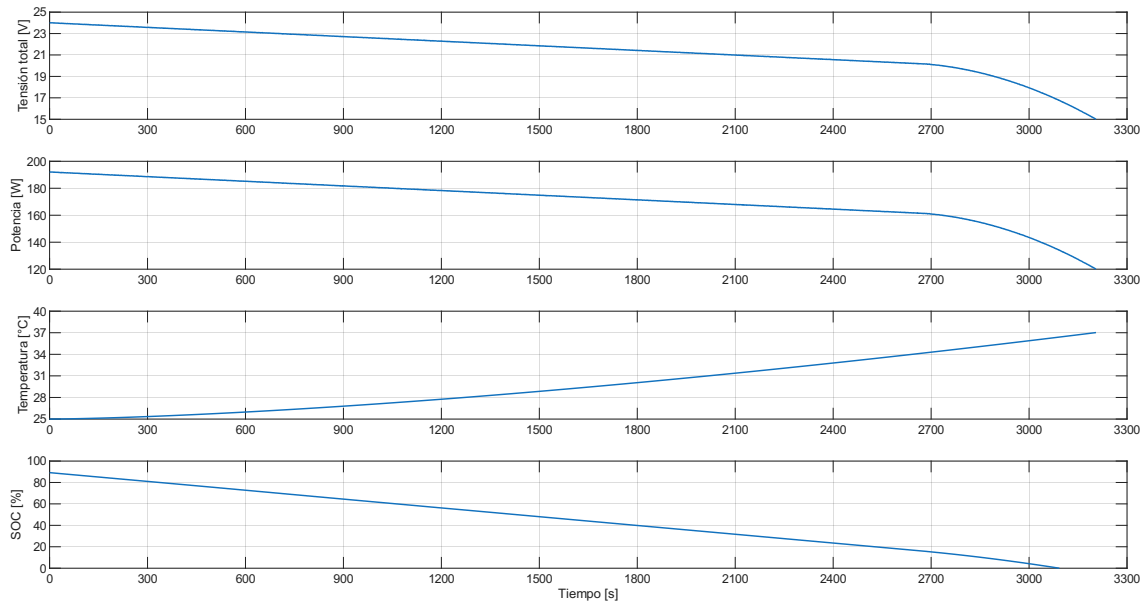


Figura 6.4. Resultados del ensayo de descarga a 1C en el laboratorio.

Durante el ensayo de descarga a 1C en el laboratorio, se observa que las celdas mantienen diferencias en el orden de los milivolt, garantizando un comportamiento uniforme entre ellas. Cada celda sigue de manera consistente la curva característica de descarga, aunque el SOC alcanza el 0 [%] antes de llegar a su tensión mínima; esto se debe al tiempo que se ha mantenido cargando las baterías, lo que degrada gradualmente el material activo y aumenta la resistencia interna, provocando una caída de tensión más pronunciada en la zona final de descarga, cayendo más rápido.

Además, la temperatura del módulo aumenta durante el ensayo, lo que intensifica la resistencia interna y acelera la caída de tensión, pero aún se mantiene lejos de sus límites térmicos. Esto indica que, aunque la resistencia interna aumenta con la temperatura, el módulo todavía opera dentro de condiciones seguras. Sin embargo, el incremento térmico

podría afectar ligeramente la eficiencia y la uniformidad de descarga si los ensayos se prolongan o se repiten de manera continua.

Como las celdas no se cargaron completamente al 100 [%], el tiempo de descarga resulta menor al esperado. Esto también explica por qué el tiempo de descarga no cumple con lo indicado por los **C-rate** nominales, ya que la energía disponible es menor. Este comportamiento resalta la importancia de controlar la temperatura y asegurar condiciones de carga completas para obtener mediciones precisas de rendimiento y eficiencia del módulo.

6.3.2. Descarga a Corriente máxima

Al igual que en la simulación, los ensayos de descarga se realizarán de forma progresiva, incrementando gradualmente la corriente con el objetivo de evaluar el comportamiento del módulo en condiciones controladas y garantizar la seguridad durante las pruebas, en el A.2.2 se presenten los ensayos intermedios entre corriente nominal y máxima.

Tabla 6.3
DESCARGA DE CADA CELDA A CORRIENTE MÁXIMA EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,012 [V]	2,509 [V]	1,503 [V]
Tensión Celda 2	4,007 [V]	2,505 [V]	1,502 [V]
Tensión Celda 3	3,993 [V]	2,496 [V]	1,497 [V]
Tensión Celda 4	3,994 [V]	2,490 [V]	1,504 [V]
Tensión Celda 5	4,014 [V]	2,490 [V]	1,509 [V]
Tensión Celda 6	3,997 [V]	2,506 [V]	1,497 [V]
Tensión Módulo	24,017 [V]	15,006 [V]	9,012 [V]
Corriente Módulo	100,000 [A]	90,922 [A]	9,078 [A]
Potencia Módulo	2401,732 [W]	1364,339[W]	1037,393[W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	80,643 [°C]	55,643 [°C]
SOC Módulo	89,200 [%]	15,650 [%]	73,550 [%]
Tiempo	0 [s]	195 [s]	195 [s]

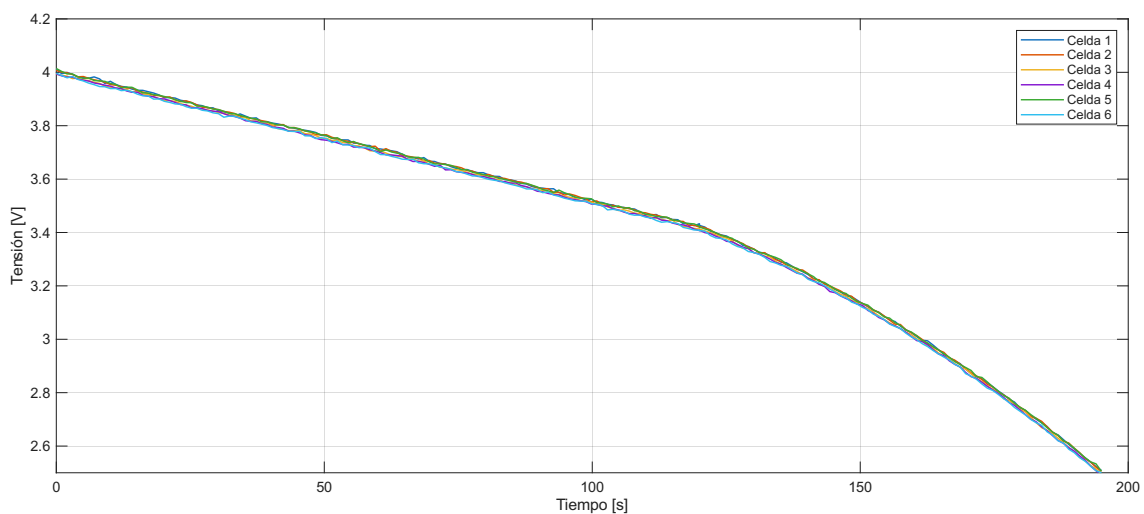


Figura 6.5. Descarga de cada celda a corriente máxima en el laboratorio.

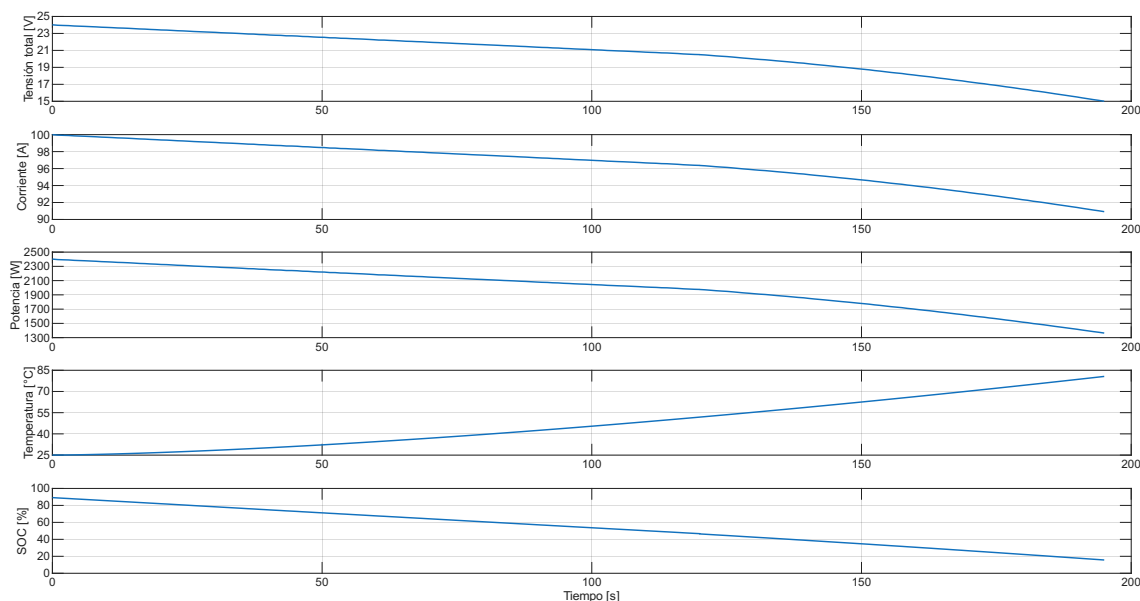


Figura 6.6. Resultados del ensayo de descarga a corriente máxima en el laboratorio.

Durante el ensayo de descarga a corriente máxima en el laboratorio, se observa que las celdas mantienen diferencias en el orden de milivoltios, garantizando un comportamiento uniforme entre ellas y cumpliendo el objetivo de mantener un equilibrio tanto en condiciones nominales como en situaciones extremas. Esto es esperable, dado que el BMS no mide la corriente que circula entre las celdas, sino que regula y controla la tensión de cada una de ellas de forma individual.

Además, la curva de descarga de tensión de cada celda mantiene el mismo comportamiento que la curva característica de descarga, es decir, que presenta una zona estable y una inestable, donde la zona inestable no es tan pronunciada como en el ensayo de corriente nominal, dado que se está descargando con la corriente máxima, por lo que la tensión cae rápidamente hasta el límite inferior sin mostrar un tramo prolongado de caída progresiva como en la descarga a corriente nominal.

Se aprecia que cuando se llega a la tensión mínima, el SOC no llega al 0 [%], esto se debe a que el módulo se expone a una corriente extrema, lo que provoca que la tensión decaiga más rápido y la descarga se complete en un tiempo menor. Como consecuencia, la zona final de la curva de descarga se reduce y la eficiencia temporal del módulo disminuye debido al aumento de la resistencia interna bajo altas corrientes. Esto significa que la celda no pudo entregar toda su energía disponible debido a sus limitaciones eléctricas. Además, no se está entregando una corriente máxima constante, sino que a medida que pasa el tiempo la corriente disminuye, lo que contribuye a que quede energía disponible sin ser utilizada.

En cuanto a la temperatura, se observa que el módulo alcanza valores cercanos a su límite térmico, lo que incrementa la resistencia interna y acelera la caída de tensión en las celdas. A pesar de este incremento, el módulo aún opera dentro de condiciones seguras, aunque se encuentra muy cerca de su límite. Por esta razón, se recomienda evitar mantener corrientes extremas durante periodos prolongados y emplear una estrategia de refrigeración, ya que si se desea entregar potencia máxima, es necesario operar a corrientes elevadas.

En cuanto al tiempo de descarga, se observa que no cumple con lo esperado según los C -rate nominales. Esto se debe a que, al igual que en el ensayo de corriente nominal, el módulo no se encuentra cargado al 100 [%], lo que reduce la energía disponible y disminuye el tiempo total de descarga. Por lo tanto, aunque la corriente aplicada sea máxima, el tiempo de descarga se ve acortado y no refleja la duración completa que correspondería a la capacidad nominal del módulo.

6.3.3. Carga a Corriente nominal

La Tabla 6.4 resume los valores iniciales y finales obtenidos para cada parámetro durante el ensayo. Las Figuras 6.7 y 6.8 presentan la evolución temporal de las variables medidas, la primera ilustra la variación de la tensión en cada celda individual, mientras que la segunda integra el análisis de la tensión, potencia, temperatura y SOC del módulo a lo largo de la descarga a corriente nominal.

Tabla 6.4
RESULTADOS DEL ENSAYO DE CARGA A 1C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	3,001 [V]	4,197 [V]	1,196 [V]
Tensión Celda 2	3,000 [V]	4,198 [V]	1,198 [V]
Tensión Celda 3	3,002 [V]	4,196 [V]	1,194 [V]
Tensión Celda 4	2,998 [V]	4,200 [V]	1,202 [V]
Tensión Celda 5	2,995 [V]	4,199 [V]	1,204 [V]
Tensión Celda 6	3,000 [V]	4,198 [V]	1,198 [V]
Tensión Módulo	17,996 [V]	25,189 [V]	7,803 [V]
Potencia Módulo	143,996 [W]	201,509 [W]	7,193 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	34,027 [°C]	9,027 [°C]
SOC Módulo	0 [%]	100 [%]	100 [%]
Tiempo	0 [s]	3600 [s]	3600 [s]

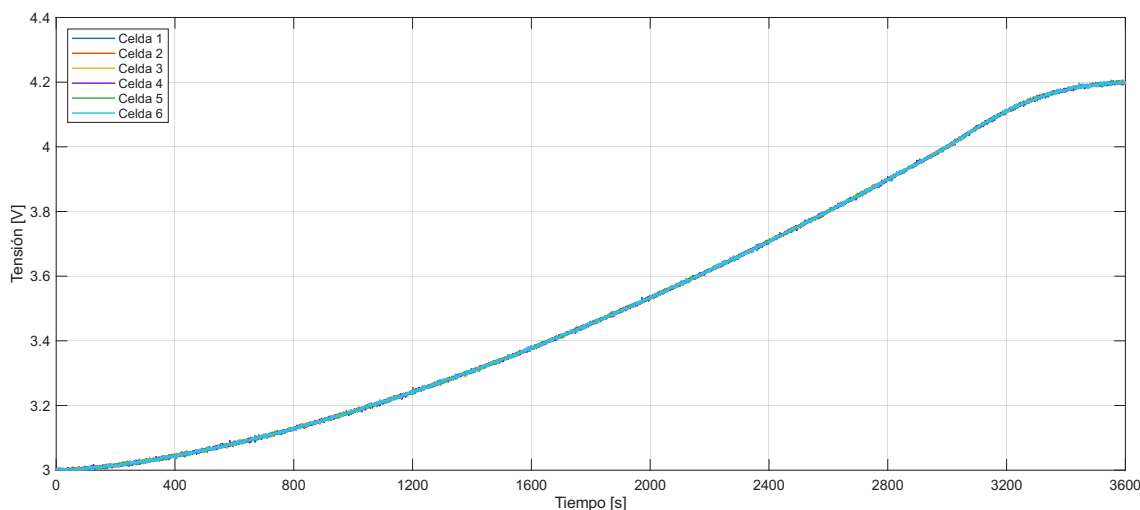


Figura 6.7. Carga de cada celda a 1C en el laboratorio.

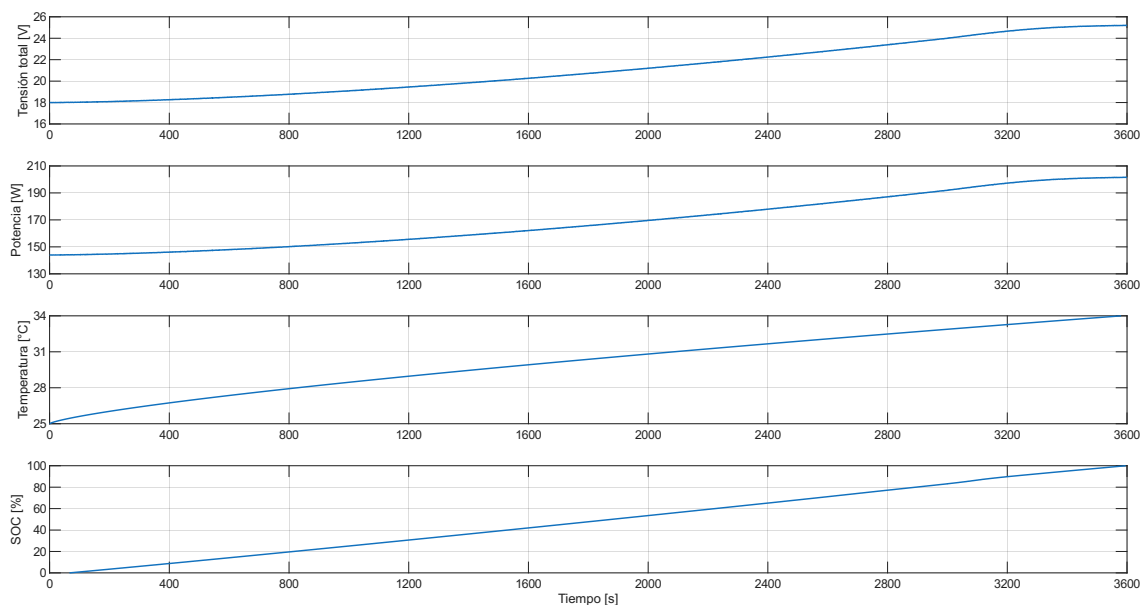


Figura 6.8. Resultados del ensayo de carga a 1C en el laboratorio.

En el ensayo de carga a 1C se realiza después de haber descargado las baterías hasta 2,5 [V]. Sin embargo, debido a la estabilización de tensión de las celdas, estas se ajustan naturalmente hasta aproximadamente 3 [V]. Por lo tanto, la tensión inicial del ensayo es 3 [V] y, dado que las celdas fueron previamente descargadas, se asume un SOC de 0, dado que fueron previamente descargadas. Luego estas se cargan a corriente nominal hasta llegar a su límite superior.

Se aprecia que en la curva de tensión no se presenta el tramo exponencial que va de 2,5 [V] a 3 [V]; esto se debe a que la curva característica de SOC vs OCV nominal de la celda utilizada no incluía dichos valores, es decir, la curva característica solo está definida desde 3 [V] hasta 4,2 [V]. Este comportamiento se complementa con el fenómeno de estabilización de la tensión, donde las celdas, después de descargarse hasta su límite inferior y permanecer en reposo, elevan su tensión. A pesar de que no se observa el primer tramo en la curva experimental, la descarga mantiene la misma dinámica en el resto del gráfico, es decir, en el tramo lineal y en el tramo exponencial final cuando la tensión alcanza su valor máximo.

En cuanto al rendimiento del BMS, se observa que las celdas mantienen un margen de diferencia en el orden de milivoltios. Además, la temperatura del módulo aumenta, aunque se mantiene lejos de su límite superior, lo cual es esperable dado que el ensayo corresponde a una condición de carga nominal, sin exigencias extremas. Respecto al tiempo de carga, las celdas alcanzan su límite superior en aproximadamente una hora, ya que la carga se realizó desde el límite inferior natural hasta el límite superior de tensión.

6.3.4. Descarga con ventilación forzada

El montaje realizado para someter las baterías a ventilación forzada durante la descarga consiste en un ventilador, un tubo con forma de codo y el módulo de baterías. En la Figura 6.9 se muestra el montaje implementado en el laboratorio.



Figura 6.9. Montaje del sistema de refrigeración por convección forzada.

El módulo se descarga a una corriente de 50 [A] con ventilación forzada, donde se busca reproducir la condición observada en la simulación, en el cual, el módulo alcanzaba una temperatura cercana a 60 [°C] bajo este régimen de corriente. Dado que la carga electrónica *Chroma* no es capaz de suministrar por sí sola dicho nivel de corriente, se complementa el sistema de descarga con resistencias. En particular, se emplea una resistencia de 1 [Ω], la cual consume inicialmente 24 [A], mientras que el *Chroma* se configura para extraer 26 [A], alcanzando en conjunto la descarga total de 50 [A].

En la Tabla 6.5 se presentan los valores iniciales y finales de cada parámetro medido, mientras que en las Figuras 6.10 y 6.11 se presenta la descarga de tensión de cada celda y la dinámica de cada parámetro del módulo.

Tabla 6.5

DESCARGA DE CADA CELDA A 50 [A] CON VENTILACIÓN FORZADA EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	\Delta
Tensión Celda 1	4,002 [V]	2,505 [V]	1,497 [V]
Tensión Celda 2	3,996 [V]	2,501 [V]	1,495 [V]
Tensión Celda 3	3,990 [V]	2,492 [V]	1,498 [V]
Tensión Celda 4	3,996 [V]	2,499 [V]	1,497 [V]
Tensión Celda 5	4,002 [V]	2,500 [V]	1,503 [V]
Tensión Celda 6	3,996 [V]	2,503 [V]	1,493 [V]
Tensión Módulo	23,982 [V]	15,000 [V]	8,983 [V]
Corriente Módulo	50,000 [A]	39,481 [A]	10,519 [A]
Potencia Módulo	1199,115 [W]	592,201 [W]	606,914 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	62,365 [°C]	37,365 [°C]
SOC Módulo	89,140 [%]	12,010 [%]	77,130 [%]
Tiempo	0 [s]	433 [s]	433 [s]

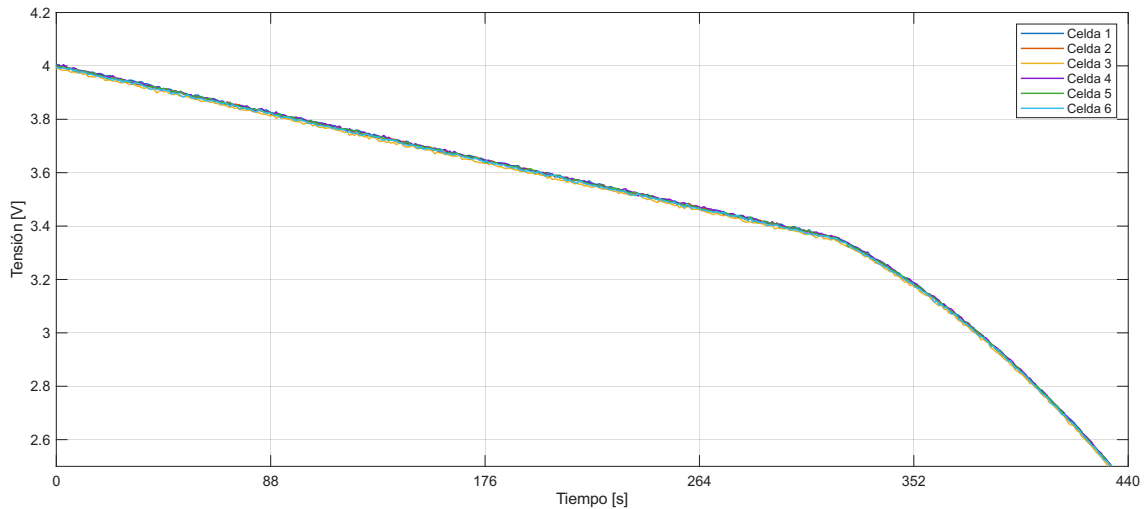


Figura 6.10. Descarga de cada celda a corriente máxima en el laboratorio.

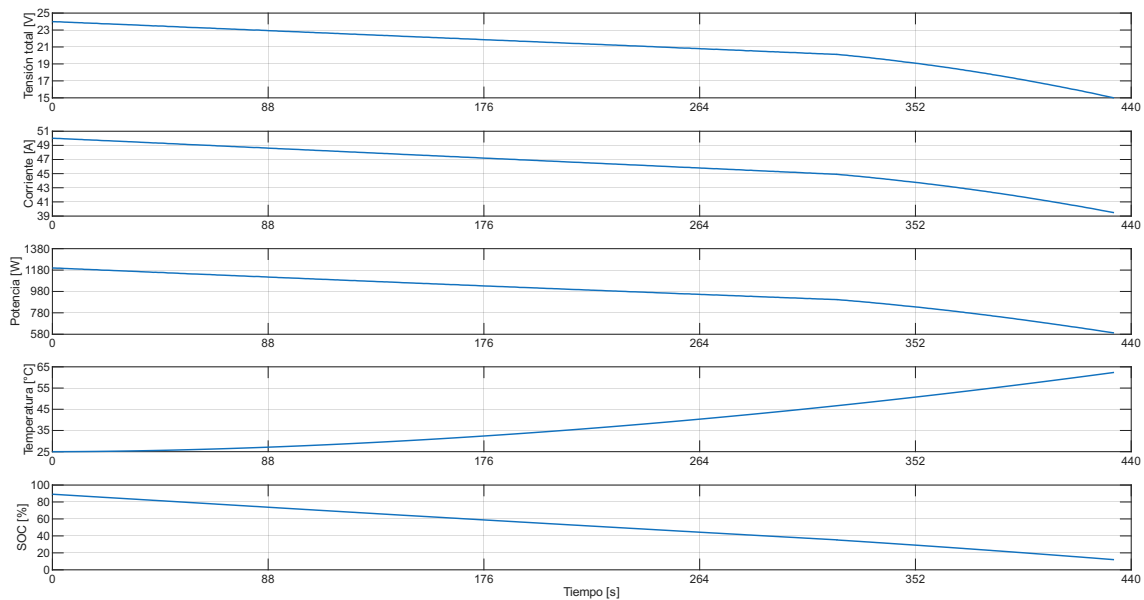


Figura 6.11. Resultados del ensayo de descarga a corriente máxima en el laboratorio.

Durante el ensayo de descarga a 50 [A] con ventilación forzada, se observa que la temperatura del módulo alcanza un valor final de 62,4 [°C]. Esta regulación térmica se logra gracias al intercambio de aire frío proveniente del ventilador con el aire caliente generado en las celdas, lo que facilita la disipación del calor por convección forzada. Desde el punto de vista termodinámico, este proceso reduce la acumulación de energía térmica en el interior del módulo y mejora el gradiente de temperatura entre la superficie de las celdas y el ambiente. Como consecuencia, la resistencia interna no aumenta de forma tan pronunciada, lo que influye directamente en la dinámica de descarga y se traduce en un mayor tiempo total, alcanzando 433 segundos. Además, al disminuir las pérdidas resistivas internas, el sistema logra una mayor eficiencia energética, permitiendo aprovechar mejor la capacidad disponible de las celdas.

Se aprecia que el comportamiento de la curva de temperatura presenta un inicio lento y luego comienza a incrementarse de manera más rápida. Esto se debe a que, al inicio, el flujo de aire es capaz de disipar eficazmente el calor generado por las celdas, manteniendo la temperatura relativamente estable. Sin embargo, a medida que avanza la descarga, la generación de calor supera la capacidad de enfriamiento del aire, lo que provoca un aumento más acelerado de la temperatura hasta llegar a la tensión mínima. Este comportamiento está asociado tanto a los procesos químicos internos de las celdas, que incrementan la resistencia interna a medida que disminuye la tensión, como a la acumulación de energía térmica dentro del módulo, que reduce la eficiencia de la transferencia de calor y acelera la caída de tensión en la fase final de la descarga.

La potencia inicial del módulo es de aproximadamente 1.200 [W], lo cual corresponde a los parámetros iniciales de tensión y corriente establecidos en el ensayo. A lo largo de la descarga, la corriente disminuye gradualmente, pero el valor final medido resulta mayor, lo que indica una mejor conservación del rendimiento eléctrico.

Este comportamiento se relaciona directamente con el control térmico proporcionado por la ventilación forzada. La disipación de calor mediante el intercambio de aire frío con el aire caliente de las celdas limita el incremento de la resistencia interna y contribuye a mantener más estable la entrega de potencia. En términos prácticos, esta regulación térmica reduce las pérdidas resistivas y permite un mayor aprovechamiento de la energía almacenada en las celdas.

En la Tabla 6.6 se comparan los ensayos de descarga a 50 [A] con y sin ventilación forzada. Se observa que el tiempo de descarga se incrementa, lo que refleja una dinámica más estable del módulo. Además, se valida que la ventilación permite mantener una temperatura más baja y que se alcanza una mayor potencia final, dado que la corriente no disminuye tan rápidamente durante el ensayo. Dado que la resistencia interna de las celdas depende directamente de la temperatura, la disminución térmica proporcionada por la ventilación reduce las pérdidas resistivas, permitiendo que las celdas entreguen energía de manera más eficiente y uniforme durante todo el periodo de descarga.

Tabla 6.6
COMPARACIÓN DE POTENCIA, TEMPERATURA Y TIEMPO CUANDO SE DESCARGA
EL MÓDULO A 50 [A] CON Y SIN VENTILACIÓN FORZADA.

	Sin refrigeración	Con refrigeración	Δ
Potencia máxima [W]	1199,115	1200,029	0,914
Potencia mínima [W]	592,201	600,173	7,972
Temperatura [°C]	67,572	62,365	5,207
Tiempo [s]	425	433	8

6.3.5. Enfriamiento mediante convección natural

Este ensayo tiene como objetivo evaluar el tiempo que tarda el módulo de baterías en enfriarse hasta alcanzar la temperatura ambiente, partiendo desde su límite térmico superior, mediante un proceso de convección natural. En este tipo de convección, el intercambio de calor ocurre de manera pasiva: el aire caliente que rodea al módulo se eleva por diferencia de densidad y es reemplazado por aire más frío del entorno, generando un flujo que facilita la disipación del calor sin necesidad de otros mecanismos forzados. Durante el

ensayo, las baterías se mantienen en reposo, sin corriente de carga ni descarga, de manera que la única fuente de calor proviene del calor acumulado previamente en el módulo. El análisis permite determinar la eficacia del enfriamiento pasivo del sistema y estimar los tiempos de recuperación térmica del módulo bajo condiciones ambientales controladas.

El tiempo de enfriamiento del módulo se determina inicialmente de manera teórica mediante la ley de enfriamiento de Newton [63], la cual establece que la variación de la temperatura de un cuerpo es proporcional a la diferencia entre su temperatura y la del ambiente. A partir de esta formulación, la temperatura del módulo en función del tiempo se describe en la Ecuación (6.1). El cálculo del tiempo de enfriamiento se realiza con el fin de obtener una estimación previa del intervalo necesario para que el módulo disminuya su temperatura, proporcionando una referencia inicial sobre el tiempo que podría demorarse en condiciones reales de reposo y convección natural.

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a) \cdot e^{-kt} \quad (6.1)$$

Donde:

- $T(t)$: Temperatura del módulo en el instante t .
- T_a : Temperatura ambiente, 25 [°C].
- T_0 : Temperatura inicial, 80 [°C].
- t : Tiempo transcurrido desde el inicio del enfriamiento.
- k : Constante de enfriamiento definida como

$$k = \frac{h \cdot A}{m \cdot c} = 3,64 \cdot 10^{-5} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (6.2)$$

Con:

- h : Coeficiente convectivo, 5 [W/m²·K] para convección natural.
- A : Área superficial del módulo, 6,356 · 10⁻³ [m²].
- m : Masa del módulo, 0,84 [kg].
- c : Calor específico de las celdas de ion-litio NMC, 1040 [J/kg·K] [64].

El datasheet de las celdas EVE-INR21700/40P no indica el valor del calor específico, por lo que para los cálculos térmicos del módulo se asume $c = 1.040$ [J/Kg·K], correspondiente a celdas de ion-litio con química NMC (Níquel-Manganeso-Cobalto). Este tipo de celdas se utiliza ampliamente en vehículos eléctricos debido a su alta densidad energética y estabilidad [65].

El tiempo de enfriamiento teórico del módulo se obtiene expresando t a partir de la ecuación 6.1 en función de las temperaturas y de la constante de enfriamiento. De esta forma, se determina el intervalo necesario para que la temperatura del módulo descienda desde su valor inicial hasta un nivel próximo al ambiental, que en este caso se considera 27 [°C], correspondiente a la temperatura registrada durante los días en que se realizaron los experimento.

$$t = -\frac{1}{k} \cdot \ln \left(\frac{T(t) - T_a}{T_0 - T_a} \right) = -\frac{1}{3,64 \cdot 10^{-5}} \cdot \ln \left(\frac{27 - 25}{80 - 25} \right) = 91100 \text{ [s]} = 25,3 \text{ [h]} \quad (6.3)$$

El cálculo teórico del tiempo de enfriamiento del módulo mediante la ley de enfriamiento de Newton indica que, bajo condiciones de convección natural, el módulo tarda aproximadamente 25 horas en disminuir su temperatura desde 80 [°C] hasta 27 [°C], cercano a la temperatura ambiente. Este resultado refleja la influencia de factores como la masa del módulo, su área superficial relativamente reducida y el bajo intercambio de calor característico de la convección pasiva. Si bien el tiempo estimado es largo, concuerda con la teoría, ya que la temperatura se aproxima asintóticamente al valor ambiental y nunca lo alcanza exactamente en un tiempo finito.

No obstante, en la realidad la temperatura ambiente no permanece estrictamente constante y otros factores, como la convección inducida por corrientes de aire o la transferencia de calor hacia estructuras adyacentes, pueden modificar la disipación de calor. Por ello, se espera que los resultados experimentales difieran del valor teórico, mostrando generalmente un enfriamiento más rápido o con variaciones respecto al modelo ideal.

Dado que el valor teórico indica que el módulo tarda aproximadamente un día en enfriarse, el registro experimental se inicia a las 17:00 horas y se realiza con una frecuencia de un dato por segundo hasta el día siguiente, obteniendo el gráfico de la Figura 6.12

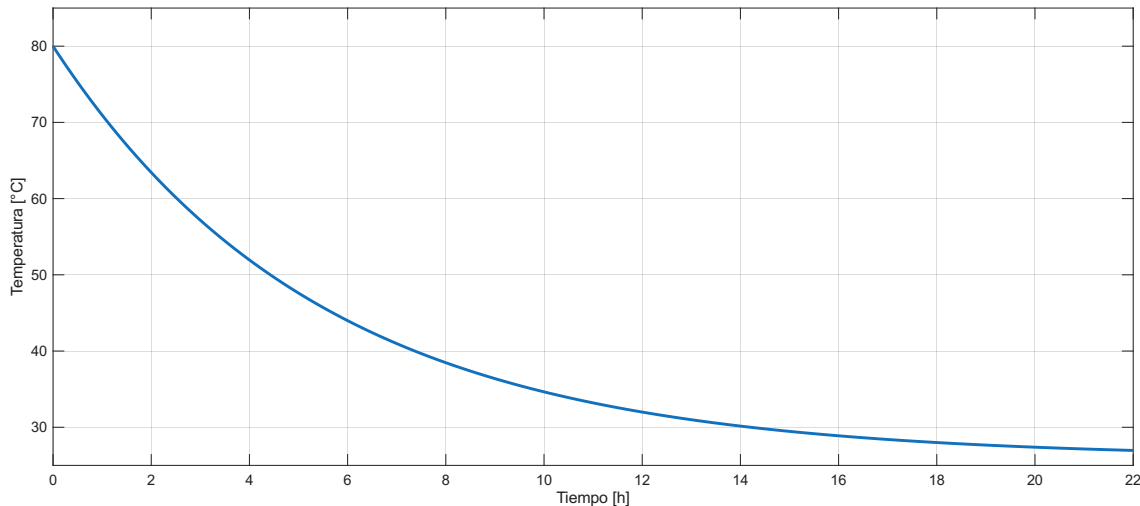


Figura 6.12. Evolución de la temperatura del módulo de baterías en función del tiempo durante el enfriamiento desde 80 [°C] mediante convección natural.

El gráfico muestra que la temperatura del módulo disminuye de manera exponencial desde 80 [°C] hasta aproximarse a 26 [°C] en aproximadamente 22 horas. Tal como se mencionó anteriormente, el tiempo final es menor al calculado teóricamente, debido a que la temperatura ambiente variaba a lo largo del día y la noche, lo que generó diferencias en la disipación de calor y provocó que la aproximación a la temperatura final ocurriera de manera más rápida y con ligeras variaciones respecto al modelo ideal.

6.3.6. Enfriamiento mediante ventilación forzada

El ensayo tiene como objetivo evaluar la eficacia del enfriamiento activo, exponiendo el módulo de baterías a un flujo de aire forzado generado por ventiladores. Durante la prueba, las baterías se mantienen en reposo, sin corriente de carga ni descarga, de manera que la disipación de calor proviene únicamente del calor acumulado en el módulo. A diferencia de la convección natural, la transferencia de calor se acelera al incrementar la velocidad del aire alrededor de las celdas, mejorando el gradiente térmico y permitiendo reducir la temperatura del módulo más rápidamente.

Al igual que en el caso de la convección natural, se calcula el tiempo de enfriamiento del módulo bajo condiciones de enfriamiento activo utilizando la ley de Newton. A partir de la ecuación que describe la temperatura en función del tiempo, se determina el intervalo necesario para que el módulo disminuya su temperatura desde el valor inicial hasta un nivel cercano al ambiental. Para representar el efecto del flujo de aire forzado, se ajusta el valor del coeficiente convectivo a $36,2 \text{ [W/m}^2\cdot\text{K]}$, valor que fue previamente calculado para reflejar la mayor eficiencia de la transferencia de calor. Se consideren las mismas condiciones ambientales.

$$k = \frac{36,2 \cdot 6,356 \cdot 10^{-3}}{0,84 \cdot 1040} = 2,63 \cdot 10^{-4} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (6.4)$$

$$t = -\frac{1}{2,63 \cdot 10^{-4}} \cdot \ln\left(\frac{27 - 25}{80 - 25}\right) = 12605 \text{ [s]} = 3,5 \text{ [h]} \quad (6.5)$$

Se aprecia que, al aplicar enfriamiento activo mediante flujo de aire forzado, el tiempo de enfriamiento teórico del módulo disminuye significativamente en comparación con el caso de convección natural. Se espera que el tiempo de enfriamiento experimental sea similar al valor teórico, dado que el intervalo estimado es menor y la temperatura ambiente durante el ensayo se mantiene relativamente constante, en la Figura 6.13 se presenta la evolución de la temperatura en función del tiempo.

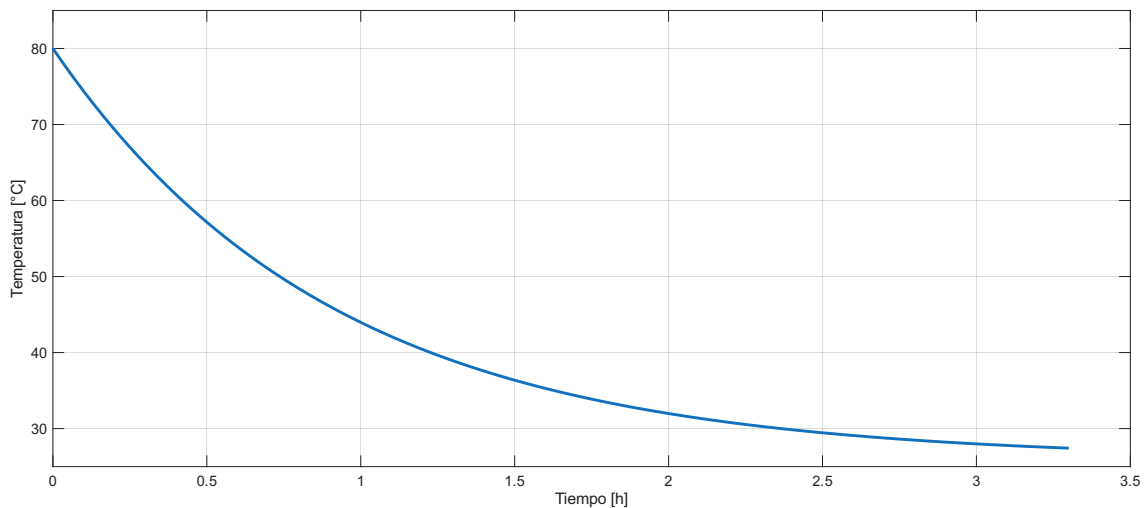


Figura 6.13. Evolución de la temperatura del módulo de baterías en función del tiempo durante el enfriamiento desde $80 \text{ [}^\circ\text{C]}$ mediante convección forzada.

Durante el ensayo de enfriamiento activo, el módulo alcanza una temperatura de aproximadamente 26 [°C] en 3,3 horas. Este resultado muestra que la disipación de calor se acelera significativamente gracias al flujo de aire forzado, reflejando la mayor eficiencia del enfriamiento activo frente al pasivo y confirmando la validez del modelo teórico bajo condiciones controladas de temperatura ambiente. La masa de aire en movimiento contribuye a aumentar la transferencia de calor desde las celdas hacia el entorno, favoreciendo un enfriamiento más rápido y uniforme del módulo.

Capítulo 7

Análisis

El análisis de resultados tiene como finalidad evaluar el desempeño del módulo de baterías y validar la coherencia entre los datos simulados y los obtenidos experimentalmente. El estudio se centra en contrastar los valores obtenidos en ambas etapas, identificando las principales desviaciones térmicas y eléctricas mediante el cálculo del error comparativo. En particular, se analizan las variables de potencia, tiempo y temperatura, que permiten caracterizar el comportamiento dinámico del módulo bajo diferentes condiciones de operación.

La potencia representa el parámetro principal de evaluación eléctrica, ya que permite determinar la capacidad del módulo para suministrar y absorber energía en función de la demanda. El tiempo constituye una variable de referencia para analizar la respuesta transitoria del sistema, identificando la duración en la que el módulo mantiene una entrega estable de potencia y evaluando su rendimiento a lo largo de los ciclos de ensayo. Finalmente, la temperatura refleja el comportamiento térmico del conjunto, siendo un indicador directo de las pérdidas internas, la eficiencia energética y la efectividad del sistema de gestión térmica, aspectos fundamentales para garantizar la seguridad y la durabilidad del módulo.

Una vez verificada la concordancia entre los resultados simulados y experimentales, el análisis se orienta a la validación de los objetivos de diseño asociados a una configuración de alta potencia y baja energía. En esta etapa se evalúa la capacidad del módulo para entregar potencia máxima de forma sostenida y segura, considerando tanto su estabilidad eléctrica como térmica durante el proceso.

El comportamiento de la batería, observado en las curvas teóricas de descarga, se caracteriza por la presencia de dos zonas diferenciadas. La zona estable corresponde al tramo en que la tensión presenta un comportamiento lineal, con una disminución lenta y progresiva a medida que avanza la descarga. En esta región, la resistencia interna se mantiene baja y las reacciones electroquímicas ocurren de manera eficiente, lo que permite una entrega de potencia controlada y con un incremento térmico moderado. Operar dentro de esta zona resulta favorable, ya que se garantiza una respuesta predecible del sistema, una mayor eficiencia energética y una menor degradación de las celdas debido a la reducción del esfuerzo eléctrico y térmico.

En contraste, la zona inestable aparece cuando el sistema se aproxima a la tensión mínima de descarga, donde el comportamiento de la tensión adquiere una tendencia ex-

ponencial descendente, con caídas abruptas frente a pequeñas variaciones de corriente. En este estado, la resistencia interna aumenta significativamente y las reacciones electroquímicas se vuelven menos eficientes, provocando un incremento de las pérdidas por efecto Joule y una mayor generación de calor. Operar en esta zona implica un riesgo de sobrecalentamiento, desequilibrio entre celdas y aceleración del envejecimiento electroquímico, por lo que debe evitarse en aplicaciones donde se prioriza la entrega sostenida de potencia.

Mantener el funcionamiento del módulo dentro de la zona estable permite aprovechar su capacidad de alta potencia útil, garantizando un equilibrio entre rendimiento, seguridad y durabilidad, aspectos esenciales para validar el cumplimiento de los objetivos de diseño establecidos.

En línea con este enfoque de alta potencia y baja energía, se cuantifican los principales indicadores de desempeño, la densidad de potencia, que permite evaluar la cantidad de potencia que el módulo puede entregar por unidad de volumen, la potencia específica, que relaciona la potencia con la masa total del módulo; la densidad energética y la energía específica, que caracterizan la capacidad del sistema para almacenar energía en relación con su volumen y masa. Estos indicadores permiten determinar la capacidad del módulo para entregar potencia máxima de manera sostenida y comparar sus resultados con los indicados en vehículos FCEV actuales, contextualizando su desempeño dentro de los estándares de la industria y evaluando sus valores frente a FCEV comerciales.

Tras validar la entrega sostenida de potencia, el análisis se centra en el comportamiento térmico del módulo bajo diferentes estrategias de enfriamiento. Se evalúa de manera experimental la respuesta térmica ante refrigeración pasiva, basada en convección natural, y ventilación forzada, mediante flujo de aire generado por ventiladores. Adicionalmente, se estudia de manera teórica la efectividad de un sistema de refrigeración líquida, considerando sus ventajas potenciales en términos de control de temperatura y capacidad de disipación de calor. El objetivo es determinar la eficacia de cada método para mantener la temperatura del módulo dentro de rangos seguros durante distintos ensayos de operación y entregas máximas de potencia, evaluando cómo cada estrategia de enfriamiento impacta en la estabilidad térmica, la eficiencia energética y la capacidad de entrega sostenida de potencia.

De manera complementaria, el BMS se encarga de la supervisión y protección eléctrica del sistema. Aunque el diseño original buscaba un BMS activo capaz de medir el SOC y ofrecer balanceo avanzado, no se encontró una opción económicamente viable que cumpliera con todos los requerimientos. Por ello, se utilizó un BMS alternativo, que cumple con las funciones mínimas necesarias: balanceo pasivo de celdas, supervisión de temperatura y medición de tensión por celda, garantizando que el módulo opere dentro de rangos seguros durante los ensayos.

La información obtenida en los ensayos, junto con la gestión térmica y la supervisión eléctrica mediante el BMS, permite evaluar cómo el módulo podría proyectarse hacia un pack con características similares a los utilizados en la industria, manteniendo los objetivos de alta potencia y baja energía. En este análisis, la escalabilidad se estudia considerando parámetros clave como el tamaño físico del pack, la potencia total que puede entregar, la energía almacenada y la densidad de potencia y energía. De este modo, los resultados obtenidos en el módulo individual sirven como referencia para proyectar el comportamiento de un pack escalable acorde a estándares industriales, optimizando la relación entre potencia, energía y seguridad, y permitiendo comparar su desempeño con los requerimientos de

baterías utilizadas en FCEV.

7.1. Comparación entre resultados simulados y experimentales

La comparación de resultados se aborda desde dos enfoques complementarios. El primero se centra en el comportamiento de las curvas, evaluando la evolución temporal de variables de potencia y temperatura a lo largo de los ensayos. El objetivo principal es verificar si las dinámicas observadas en la simulación se mantienen en el experimento y si la forma de las curvas se asemeja a la característica esperada del módulo, permitiendo identificar desviaciones en la respuesta transitoria y el comportamiento dinámico del sistema. Para ello, se interponen los gráficos de potencia y temperatura de los ensayos de descarga a corriente nominal, máxima y con ventilación. Este enfoque permite evaluar la consistencia del modelo en situaciones representativas de uso real, identificar diferencias en la respuesta de potencia y temperatura, analizar la influencia de la resistencia interna y la disipación térmica en la dinámica del módulo, y determinar si la simulación reproduce con suficiente precisión el comportamiento esperado bajo distintos escenarios de carga. En la Figuras 7.1, 7.2 y 7.3 se presentan las curvas comparativas de temperatura y potencia.

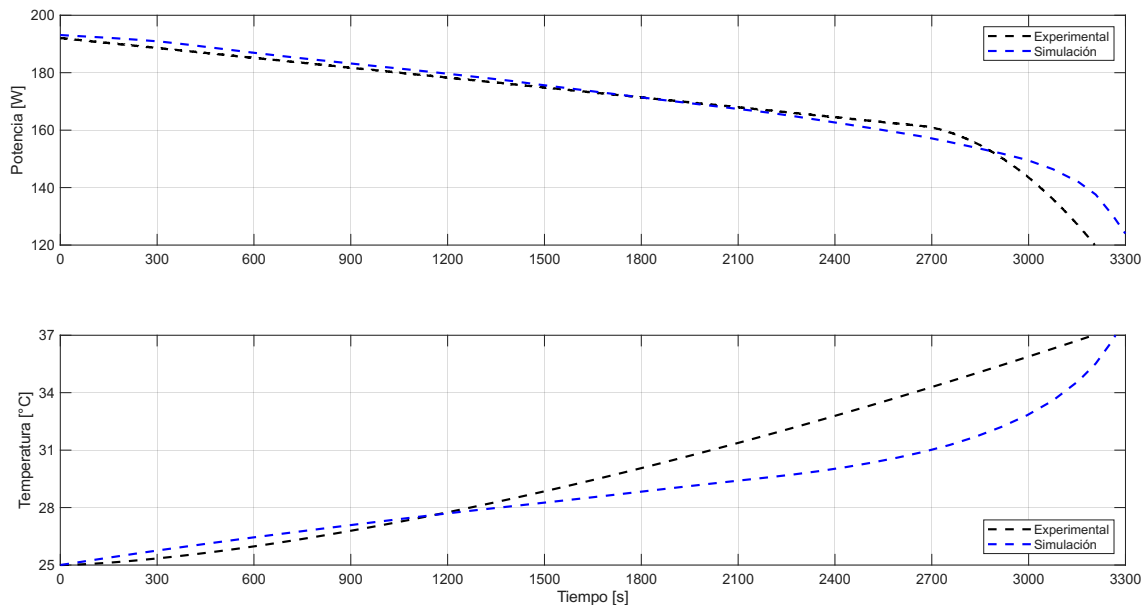


Figura 7.1. Comparación entre simulación y experimento de la evolución de la potencia y la temperatura durante el ensayo de descarga a 1C.

En la Figura 7.1, se aprecia que la evolución de la potencia mantiene un comportamiento similar entre simulación y experimento. Sin embargo, al momento de pasar a la zona exponencial, la curva experimental cae ligeramente antes que la simulada. Esto se debe principalmente a efectos no modelados en la simulación, como la resistencia interna variable de las celdas, pequeñas diferencias en la característica de las celdas individuales, la generación de calor localizada y la disipación térmica real, que afectan la tensión bajo altas demandas de corriente. En cuanto a la temperatura, inicialmente se observa un comportamiento similar entre simulación y experimento, indicando que el modelo repro-

duce adecuadamente la tendencia térmica del módulo durante los primeros instantes de operación. Sin embargo, a medida que avanza el ensayo, la curva experimental muestra un incremento menos pronunciado que el mostrado por la simulación. Esta diferencia se atribuyen a efectos de disipación de calor no considerados completamente en el modelo, como la convección natural adicional, radiación, conducción hacia elementos adyacentes y la influencia de factores externos, como corrientes de aire o viento, que favorecen la evacuación de calor.

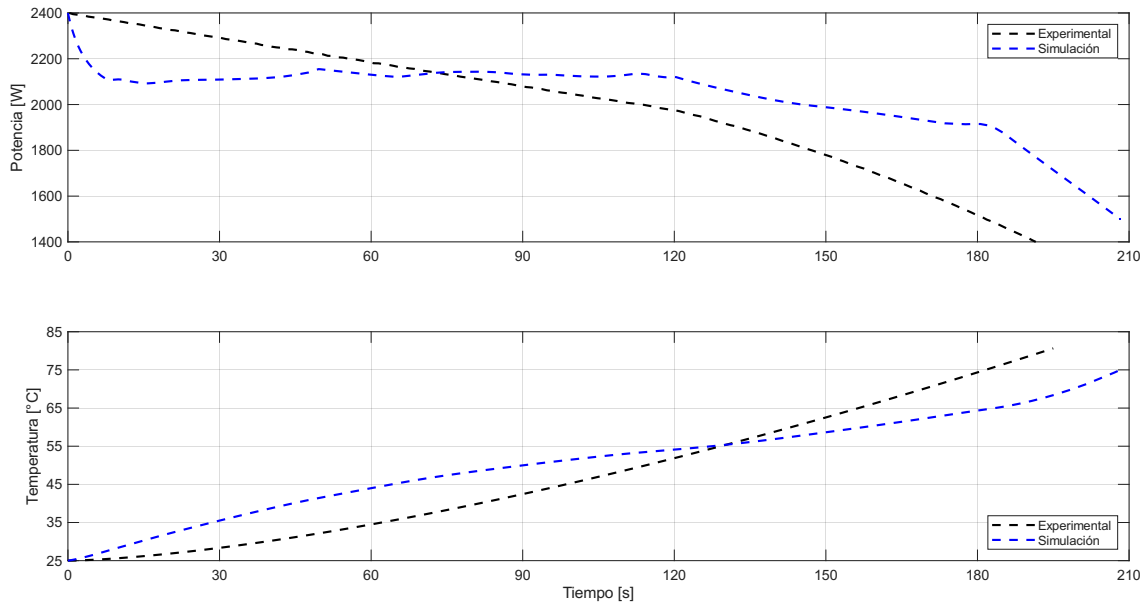


Figura 7.2. Comparación entre simulación y experimento de la evolución de la potencia y la temperatura durante el ensayo de descarga a corriente máxima.

El comportamiento de la potencia en simulación y en el ensayo experimental, cuando se descarga a corriente máxima, muestra la misma dinámica general. Sin embargo, la simulación presenta un comportamiento más inestable, mientras que el ensayo experimental mantiene una respuesta más estable, y además se observan diferencias en los valores absolutos de potencia alcanzados. Estas diferencias se deben, a que en el ensayo se utilizaron resistencias conectadas en paralelo, provocando variabilidad en la corriente real que circula por el módulo. Otros factores que causan diferencias, son las simplificaciones y limitaciones del modelo de simulación, como la representación simplificada de la resistencia interna, la ausencia de efectos complejos de disipación térmica y la no consideración de interacciones con factores externos. Adicionalmente, dado que el módulo se está llevando casi al límite de operación, la simulación puede no reflejar completamente este comportamiento extremo, lo que provoca variaciones de potencia y un comportamiento más inestable en el modelo en comparación con el ensayo experimental.

En cuanto a la temperatura, las dinámicas observadas en simulación y experimento difieren notablemente. La simulación presenta un comportamiento exponencial convexo al inicio y luego cóncavo, mientras que en el ensayo experimental la temperatura sigue un patrón exponencial más uniforme. Esta diferencia puede atribuirse a simplificaciones en el modelo térmico, como la representación de la transferencia de calor entre celdas, la resistencia térmica constante y la ausencia de efectos de disipación externa, incluyendo

corrientes de aire o convección ambiental, que en la práctica modulan la evolución de la temperatura del módulo.

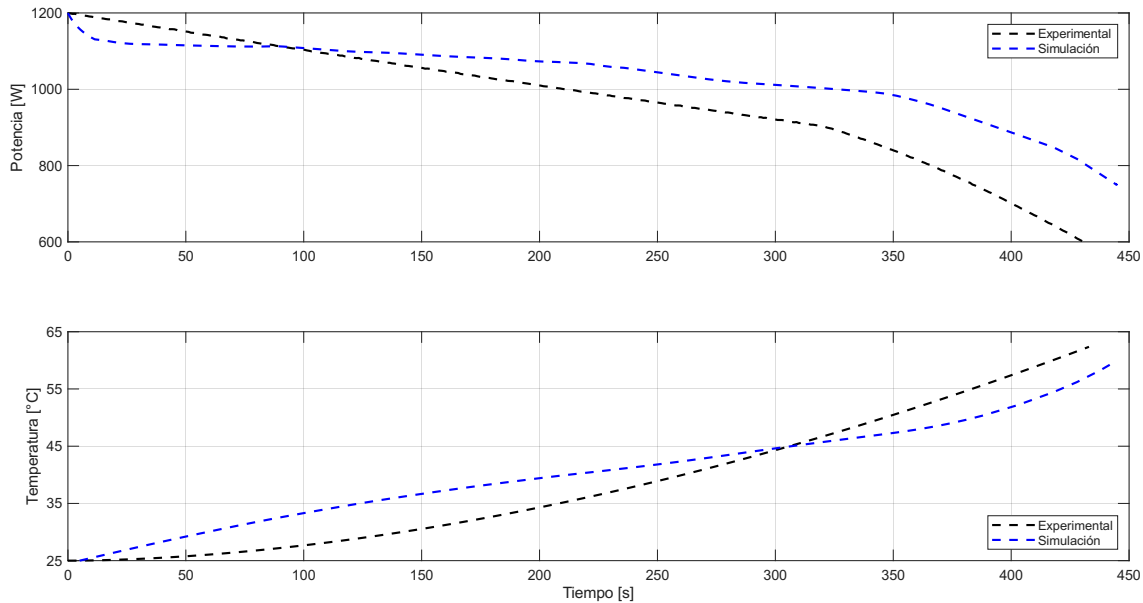


Figura 7.3. Comparación entre simulación y experimento de la evolución de la potencia y la temperatura durante el ensayo de descarga a 50 [A] con refrigeración forzada.

Al utilizar ventilación forzada, se observa que la potencia mantiene la misma dinámica tanto en la simulación como en el ensayo experimental, lo que indica que el comportamiento general del módulo frente a la descarga se conserva. No obstante, se aprecian diferencias en los valores absolutos de potencia, que pueden atribuirse a las mismas causas observadas en la descarga a corriente máxima: en el ensayo experimental se utilizaron resistencias conectadas en paralelo para alcanzar altas corrientes, y la simulación presenta simplificaciones del modelo.

En cuanto a la temperatura, también se observan diferencias entre simulación y ensayo experimental. La simulación presenta un comportamiento inicialmente convexo que luego se vuelve cóncavo, mientras que en el ensayo experimental la temperatura sigue un patrón exponencial uniforme, de manera similar a lo observado en el ensayo de descarga a corriente máxima. Estas diferencias reflejan la influencia de efectos térmicos reales, como la disipación por corrientes de aire y convección, que no se incluyen en el modelo.

El segundo enfoque consiste en la comparación cuantitativa de los resultados mediante el cálculo del error comparativo. Este análisis se centra en los valores iniciales y finales de las variables medidas, específicamente potencia, tiempo y temperatura, permitiendo evaluar la diferencia global entre los datos simulados y experimentales. La potencia se considera porque refleja directamente la capacidad del módulo para suministrar energía y cumplir los objetivos de alta potencia. El tiempo se incluye ya que, permite evaluar la duración durante la cual el módulo mantiene un desempeño estable y consistente, identificando posibles desviaciones en la respuesta transitoria. La temperatura, por su parte, es fundamental para valorar la efectividad del sistema de gestión térmica y su impacto en la eficiencia y seguridad del módulo. El error comparativo sobre estas tres variables proporciona una medida objetiva de la precisión del modelo, identificando desviaciones

sistemáticas o acumulativas y facilitando la interpretación de la confiabilidad del módulo bajo diferentes condiciones de operación. En las Tablas 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4 se presentan los valores iniciales y finales de la potencia, así como la temperatura final y tiempo total de la simulación y del ensayo experimental, junto con el error comparativo correspondiente para los ensayos con convección natural y ventilación forzada.

Tabla 7.1

VALORES INICIALES Y FINALES DE LA POTENCIA, TEMPERATURA FINAL Y TIEMPO DE DESCARGA DE LA SIMULACIÓN Y DEL ENSAYO EXPERIMENTAL POR CONVECCIÓN NATURAL.

C-rate	Corriente [A]	Simulación				Laboratorio			
		Potencia [W]		Temperatura [°C]	Tiempo [s]	Potencia [W]		Temperatura [°C]	Tiempo [s]
		Inicial	Final			Inicial	Final		
1C	8	192	121	37,054	3250	192,048	119,976	37,022	3206
2C	16	384	239,555	47,778	1632	383,788	239,842	47,926	1605
3C	24	576	359,88	55,457	1061	576,045	359,574	55,466	1038
4C	32	768	480	60,224	776	767,937	479,95	60,859	757
5C	40	960	599,989	63,437	606	960,474	554,896	64,202	588
6C	48	1152	720	65,914	496	1152,029	604,162	66,796	480
7C	56	1344	840	68,105	419	1344,905	710,786	69,245	404
8C	64	1536	958,414	70,175	362	1538,212	829,022	72,198	348
9C	72	1728	1079,85	71,809	319	1727,727	929,796	74,009	305
10C	80	1920	1199,998	73,424	285	1921,888	1024,935	76,522	271
11C	88	2112	1320	74,483	257	2110,618	1183,274	78,347	244
12C	96	2304	1440	75,268	234	2303,396	1308,605	80,155	222
12,5C	100	2400	1500	75,603	206	2401,73	1364,339	80,643	195

Tabla 7.2

ERROR COMPARATIVO DE LA POTENCIA, TEMPERATURA Y TIEMPO ENTRE LA SIMULACIÓN Y EL ENSAYO EXPERIMENTAL POR CONVECCIÓN NATURAL.

Potencia [%]		Temperatura [%]	Tiempo [%]
Inicial	Final		
0,025	0,846	0,086	1,354
0,055	0,120	0,310	1,654
0,008	0,085	0,016	2,168
0,008	0,010	1,054	2,448
0,049	7,516	1,206	2,970
0,003	16,089	1,338	3,226
0,067	15,383	1,674	3,580
0,144	13,501	2,883	3,867
0,016	13,896	3,064	4,389
0,098	14,589	4,219	4,912
0,065	10,358	5,188	5,058
0,026	9,125	6,493	5,128
0,072	9,044	6,666	5,340

En cuanto a la potencia inicial, se observa un error menor al 1 [%], esto se debe a que simulación y el ensayo comenzaron bajo las mismas condiciones iniciales, asegurando una correspondencia cercana. Sin embargo, al analizar las potencias finales desde las descargas sobre 4C, el error aumenta a más del 1 [%]. Esto se debe a que, para alcanzar esta alta corriente, fue necesario conectar resistencias en paralelo, provocando una pérdida de control preciso sobre la corriente. Dado que la corriente que circula por las resistencias depende directamente de la tensión del módulo, causando que cualquier variación en esta genera

diferencias entre los resultados experimentales y la simulación, incrementando el error comparativo al final del ensayo.

En cuanto a la temperatura y el tiempo, se observa que, a medida que la descarga se realiza con mayores corrientes, el error comparativo aumenta. Esto se debe a la degradación interna de las celdas, que afecta tanto a la resistencia interna como a la capacidad efectiva, provocando diferencias en la generación de calor y en la duración del ciclo de descarga respecto a los valores simulados. A mayores corrientes, estos efectos se acentúan, generando incrementos en la temperatura más pronunciados en el ensayo experimental y reducciones en el tiempo de entrega de potencia, lo que explica el aumento del error comparativo en estas condiciones extremas.

Tabla 7.3

VALORES INICIALES Y FINALES DE LA POTENCIA Y TEMPERATURA EN CONJUNTO DEL TIEMPO DE DESCARGA POR VENTILACIÓN FORZADA.

Corriente [A]	Simulación				Laboratorio			
	Potencia [W]		Temperatura [°C]	Tiempo [s]	Potencia [W]		Temperatura [°C]	Tiempo [s]
	Inicial	Final			Inicial	Final		
8	1200	750	59,881	445	1200,029	600,173	67,572	425

Tabla 7.4

ERROR COMPARATIVO DE LA POTENCIA, TEMPERATURA Y TIEMPO ENTRE LA SIMULACIÓN Y EL ENSAYO EXPERIMENTAL POR CONVECCIÓN FORZADA.

Potencia [%]		Temperatura [%]	Tiempo [%]
Inicial	Final		
0,002	19,977	4,494	4,494

Al utilizar ventilación forzada durante la descarga del módulo con una corriente de 50 [A], se observa que, al igual que en los ensayos con convección natural, la potencia inicial presenta un error bajo, debido a que simulación y ensayo comenzaron bajo las mismas condiciones iniciales. Sin embargo, para descargar el módulo a esta corriente, es necesario utilizar resistencias adicionales, lo que provoca que la potencia final difiera, ya que la corriente que circula por el módulo no se mantiene constante y disminuye progresivamente a medida que avanza la descarga.

En cuanto a la temperatura, se aprecia una diferencia aproximada de 3 [°C] entre simulación y ensayo experimental, lo que indica que el objetivo de disminuir la temperatura mediante ventilación forzada se cumple, confirmando la eficacia de esta estrategia de refrigeración frente a la convección natural. Si bien el error de temperatura supera el 1 [%], el objetivo principal del ensayo es evaluar si el módulo puede entregar potencia manteniéndose dentro de una cota segura de 60 [°C]. Aunque al final del ensayo esta cota se superó ligeramente, la temperatura permanece dentro de rangos que no comprometen la integridad del módulo, lo que evidencia que la ventilación forzada sigue siendo efectiva para controlar la temperatura durante la descarga.

Al comparar ambos enfoques, es decir, la evolución de la potencia y la temperatura en función del tiempo junto con sus valores iniciales y finales, se aprecia que el modelo para corrientes cercanas a la nominal reproduce adecuadamente el comportamiento observado en los ensayos experimentales realizados en laboratorio. Sin embargo, al incrementar la corriente de descarga, las diferencias entre simulación y experimento se hacen más evidentes,

principalmente debido a las simplificaciones presentes en el modelo térmico y eléctrico, que limitan su capacidad para representar con precisión los fenómenos no lineales asociados a condiciones de alta demanda.

A pesar de estas diferencias en los valores absolutos, se observa que las curvas simuladas y experimentales mantienen las mismas dinámicas generales, mostrando una tendencia coherente con las curvas características del módulo. Esto confirma que el modelo logra representar de manera consistente la respuesta global del sistema, reflejando la relación entre potencia, temperatura y tiempo bajo distintas condiciones de operación, aunque con ciertas variaciones en magnitud debidas a las condiciones reales de ensayo y a las aproximaciones inherentes al proceso de modelado.

7.2. Validación de los objetivos de alta potencia y baja energía

Lo que determina si un módulo es capaz de entregar alta potencia es el tiempo durante el cual puede mantener una entrega sostenida de potencia al ser sometido a descargas con corrientes elevadas. Por esta razón, resulta fundamental analizar el gráfico de potencia en función del tiempo cuando el módulo se descarga a corriente máxima, ya que permite identificar su comportamiento bajo condiciones de máxima exigencia.

Es importante considerar que la potencia depende directamente de la tensión del módulo, lo que da origen a dos zonas de operación. La primera es la zona estable, donde la descarga presenta un comportamiento lineal y controlado, con alta eficiencia, pérdidas moderadas y buena estabilidad térmica y eléctrica. Por otro lado, esta la zona inestable que se caracteriza por una caída exponencial de la tensión a medida que se alcanza el límite inferior de operación. En esta región, la resistencia interna y las pérdidas por efecto Joule aumentan, lo que reduce la eficiencia y acelera la degradación de las celdas. En este contexto, la curva de potencia respecto al tiempo se segmenta en dos regiones de operación: una estable y otra inestable o transitoria, representadas en la Figura 7.4.

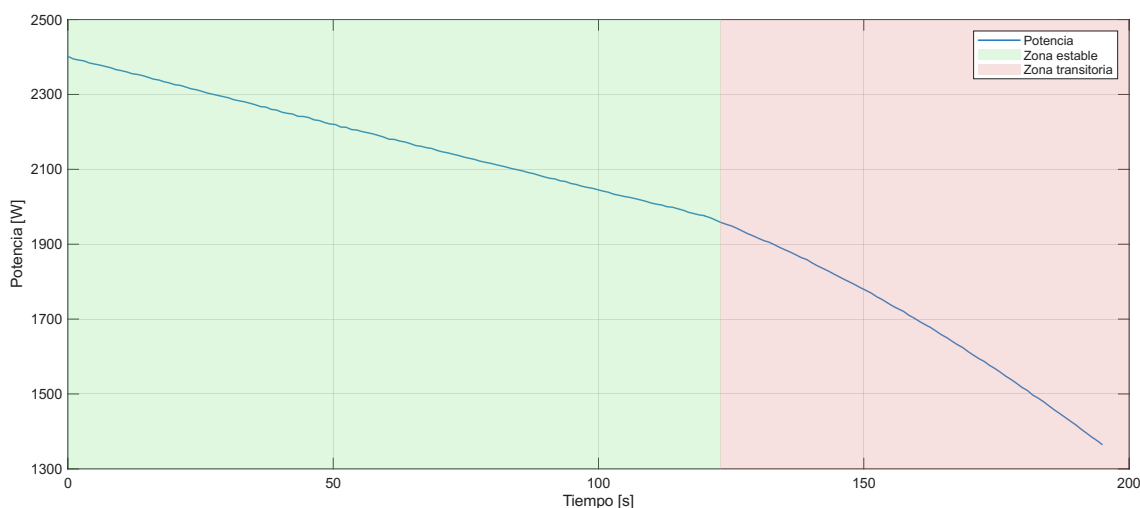


Figura 7.4. Evolución de la potencia cuando se descarga el módulo a corriente máxima en el laboratorio.

La operación del módulo debe mantenerse dentro de la zona estable, ya que al conservar el funcionamiento en la región lineal es posible aprovechar la capacidad de alta potencia del sistema de manera controlada, garantizando un equilibrio entre rendimiento, seguridad y vida útil. Por esta razón, se mide el tiempo de operación dentro de esta zona para determinar la energía inicial y final del ensayo. Además, se calculan la densidad de potencia y de energía, junto con la potencia y la energía específica, con el fin de evaluar el desempeño global del módulo. En la Tabla 7.5 se presenta el valor inicial y final de la potencia y energía.

Tabla 7.5

VALORES DE POTENCIA, ENERGÍA, DENSIDAD DE POTENCIA, DENSIDAD ENERGÉTICA, POTENCIA ESPECÍFICA Y ENERGÍA ESPECÍFICA OBTENIDOS DURANTE LA DESCARGA A CORRIENTE MÁXIMA EN EL TIEMPO ESTABLE.

Parámetro	Mínimo	Máximo
Potencia [kW]	1,96	2,40
Energía [Wh]	66,90	82,07
Potencia Específica [kW/kg]	2,33	2,86
Energía Específica [Wh/kg]	79,64	97,73
Densidad de Potencia [kW/L]	6,63	8,14
Densidad Energética [Wh/L]	227	278
Tiempo estable [s]	123	

Los parámetros más relevantes para evaluar el desempeño del módulo de baterías son la densidad energética y de potencia, junto con la potencia y energía específica, ya que estos indicadores reflejan el rendimiento máximo del módulo de forma independiente, sin importar la cantidad de módulos conectados en serie que conformen el pack. Esto permite realizar una comparación directa con los valores reportados para el Toyota Mirai. El estudio *Machine learning modeling for fuel cell-battery hybrid power system dynamics in a Toyota Mirai 2 vehicle under various drive cycles* [66] presenta las especificaciones técnicas del Toyota Mirai, que sirven como referencia para el análisis comparativo. En la Tabla 7.6 se resumen los valores más relevantes utilizados en esta evaluación.

Tabla 7.6

ESPECIFICACIONES DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO DE CELDA DE COMBUSTIBLE (FCEV) TOYOTA MIRAI [66]

Parámetro	Valor
Potencia Específica [kW/kg]	2,87
Energía Específica [Wh/kg]	27,60
Densidad de Potencia [kW/L]	5,40
Densidad Energética [Wh/L]	52,45

Al comparar la potencia específica y la densidad de potencia del módulo de baterías con los valores reportados para el pack del Toyota Mirai, se observa que la potencia específica del módulo, con un rango de 2,33 a 2,86 [kW/kg], es similar al valor del Mirai de 2,87 [kW/kg], indicando que ambos entregan potencia comparable por unidad de masa. En cuanto a la densidad de potencia, el módulo, con valores entre 6,63 y 8,14 [kW/L], es mayor que los 5,40 [kW/L] del Mirai, evidenciando que puede proporcionar más potencia por unidad de volumen.

En lo que respecta a la energía específica y la densidad energética, el módulo presenta valores superiores a los del pack del Mirai. La energía específica del módulo, con un rango de 79,64 a 97,73 [Wh/kg], supera los 27,60 [Wh/kg] del Mirai, mostrando que almacena más energía por unidad de masa. De manera similar, la densidad energética, que varía entre 227 y 278 [Wh/L], es mayor que los 52,45 [Wh/L] del Mirai, indicando una capacidad de almacenamiento superior por unidad de volumen.

A partir de estos resultados, se estima que el módulo logra operar a alta potencia, dado que sus valores de potencia específica y densidad de potencia son comparables o superiores a los del Toyota Mirai. Sin embargo, la energía específica y densidad energética del módulo son mucho mayores, reflejando un almacenamiento superior al necesario para la configuración de alta potencia y baja energía buscada. Esto sugiere que el módulo podría estar sobredimensionado en términos de capacidad de almacenamiento respecto a los requerimientos de este estudio.

7.3. Evaluación del desempeño térmico del módulo

La gestión térmica es un aspecto relevante al someter las baterías a descargas, por lo que resulta importante evaluar su comportamiento cuando no existe ningún elemento activo que favorezca la disipación de calor, es decir, bajo convección natural. A medida que se incrementaba la corriente de descarga, se observaba un aumento en la temperatura del módulo, lo cual se debe al mayor flujo de corriente que genera pérdidas internas por efecto Joule y al limitado intercambio de calor con el ambiente.

Al llevar el módulo a la descarga máxima, se evidencia que la temperatura alcanza niveles cercanos a la crítica para las celdas, lo que resalta la necesidad de contar con un sistema de refrigeración. Aunque el módulo haya llegado al límite operativo, es recomendable establecer una cota superior de seguridad para evitar riesgos de sobrecalentamiento que puedan comprometer la integridad de las celdas, la eficiencia del módulo y la seguridad general del sistema. Dado que las celdas son altamente inflamables, cualquier exceso térmico aumenta significativamente el riesgo de ignición o fallo térmico, por lo que mantener la temperatura dentro de rangos seguros resulta esencial para garantizar la operación confiable y segura del módulo de baterías.

Es por ello que se opta por implementar ventilación forzada, buscando generar un flujo de aire que permita mantener la temperatura del módulo por debajo de los 60 [°C] durante las descargas. Esta estrategia de enfriamiento activa contribuye a disipar el calor de manera más eficiente que la convección natural, garantizando un funcionamiento seguro, estable y prolongando la vida útil de las celdas bajo condiciones de alta potencia. Sin embargo, aunque la ventilación forzada logra reducir la temperatura de las celdas, esta medida por sí sola no es suficiente para garantizar la seguridad en todas las condiciones de operación. Llega un punto en que la generación de calor supera la capacidad de disipación del flujo de aire, y no es posible aumentar indefinidamente el tamaño del ventilador debido a las restricciones de espacio propias de un vehículo. Por lo tanto, aunque la ventilación mejora la gestión térmica, existen limitaciones prácticas que impiden mantener la temperatura bajo control únicamente con este método.

Es precisamente debido a estas limitaciones que en los FCEV se implementan sistemas de refrigeración líquida, que permiten un control térmico más eficiente y uniforme del pack de baterías. Este tipo de sistema está diseñado para soportar altos ciclos de carga y descarga

continuos, garantizando que las celdas se mantengan dentro de rangos seguros incluso bajo demandas prolongadas de potencia. A diferencia de la ventilación forzada, la refrigeración líquida puede disipar mayores cantidades de calor de manera constante, adaptándose a variaciones de carga y condiciones extremas de operación, lo que resulta fundamental para asegurar la seguridad, estabilidad y durabilidad de las celdas en entornos automotrices con restricciones de espacio y altas exigencias energéticas.

Para evaluar el comportamiento térmico del módulo de baterías se abordan tres estrategias de gestión de manera complementaria, lo que permite analizar la eficacia de cada método y su contribución a mantener la seguridad, estabilidad y desempeño del sistema bajo distintas condiciones de operación. La primera, la convección natural, permite evaluar cómo disipan calor las celdas sin la intervención de ningún sistema activo, proporcionando una referencia del comportamiento térmico pasivo del módulo. La segunda, la ventilación forzada, analiza la efectividad de un flujo de aire controlado para mantener la temperatura bajo límites seguros durante descargas de corriente específicas, identificando sus ventajas y limitaciones en condiciones reales de operación. Finalmente, la refrigeración líquida, implementada de manera teórica, permite estimar el rendimiento de un sistema más elaborado, capaz de soportar altos ciclos de carga continuos y disipar mayores cantidades de calor de forma constante, garantizando la seguridad, estabilidad y durabilidad de las celdas incluso en aplicaciones automotrices con restricciones de espacio y demandas energéticas elevadas.

7.4. Integración y desempeño del BMS en el sistema experimental

La selección del BMS se basa en la necesidad de contar con un sistema de supervisión capaz de garantizar la seguridad, estabilidad y correcto funcionamiento del módulo de baterías durante los ensayos experimentales. Si bien en los objetivos iniciales se plantea la implementación de un sistema con medición de SOC y balanceo activo, se opta finalmente por un BMS pasivo, cuya función principal es proteger el módulo y mantener el equilibrio entre las celdas mediante balanceo resistivo. Este tipo de balanceo, aunque efectivo para corregir pequeñas diferencias de tensión entre celdas, presenta una limitación térmica y energética relevante: la energía excedente se disipa en forma de calor, lo que incrementa la temperatura del módulo y puede afectar la uniformidad térmica del sistema. Esto se vuelve especialmente significativo durante las descargas a alta corriente, donde las pérdidas resistivas y el calor generado por el balanceo se suman al propio calentamiento interno de las celdas. Desde un punto de vista analítico, este comportamiento reduce la eficiencia térmica global del sistema y evidencia la necesidad de emplear estrategias de refrigeración complementarias o, en futuras etapas, implementar un balanceo activo que permita redistribuir la energía entre celdas en lugar de disiparla.

En cuanto a la estimación del SOC, esta se realiza de forma independiente al BMS mediante el procesamiento de los datos experimentales de tensión, corriente y temperatura. Para ello, se emplea una estrategia híbrida basada en el *Coulomb Counting* y la normalización de curvas características de SOC-OCV, lo que permite obtener un cálculo más preciso y representativo del comportamiento real del módulo durante los distintos regímenes de carga y descarga. Esta metodología resulta especialmente útil en configuraciones donde el BMS no dispone de medición directa del SOC, ya que combina la respuesta eléctrica instantánea de las celdas con su comportamiento histórico y térmico. En los gráficos ob-

tenidos se observa que, a medida que aumenta la corriente de descarga, En los gráficos obtenidos se observa que, a medida que se incrementa la corriente de descarga, el SOC alcanza valores mayores dentro de un rango de 0% a 15%, lo que indica que el sistema interpreta una mayor disponibilidad de carga remanente bajo condiciones de alta demanda. Este comportamiento se explica porque, a corrientes elevadas, las caídas de tensión internas y las limitaciones electroquímicas temporales afectan la respuesta instantánea de las celdas, haciendo que el cálculo del SOC no refleje completamente la energía realmente utilizable. Como consecuencia, la tensión terminal disminuye más rápidamente y el método de cálculo del SOC indica que queda más carga disponible de la real, ya que parte de la energía permanece almacenada pero no puede entregarse debido a las limitaciones electroquímicas asociadas a la alta demanda de corriente. Esto se puede contrastar con métodos más avanzados para estimar el SOC, como los filtros de Kalman, que permiten considerar la dinámica interna de la celda y ofrecer una estimación más precisa de la carga disponible bajo condiciones de alta corriente.

A pesar de las limitaciones del balanceo pasivo y la ausencia de medición directa de SOC, el BMS seleccionado cumple con las funciones básicas de supervisión, midiendo de manera confiable la tensión por celda y la temperatura del módulo durante los ensayos. Estas mediciones permiten monitorear el estado eléctrico y térmico del sistema, detectar posibles desbalances o sobrecalentamientos y asegurar que las condiciones de operación se mantengan dentro de rangos seguros. De este modo, el BMS garantiza la protección del módulo y el control de sus parámetros críticos, cumpliendo con los objetivos planteados para la supervisión del sistema.

7.5. Escalabilidad pack de baterías

Los experimentos realizados sobre el módulo de baterías tienen como objetivo evaluar su rendimiento bajo distintas condiciones de operación. Estos ensayos permiten determinar los tiempos de descarga, analizar la evolución de la temperatura y estudiar la efectividad de la gestión térmica mediante convección natural y forzada, así como examinar las curvas de carga y descarga del módulo. La información obtenida proporciona una visión integral de su comportamiento dinámico, eficiencia y capacidad de entrega de potencia, sirviendo como base para proyectar el desempeño de un pack de mayor escala y evaluar parámetros críticos como potencia, energía, densidad y seguridad operativa en configuraciones más complejas.

A partir de estos resultados, es posible proyectar la escalabilidad del módulo hacia un pack completo, evaluando su desempeño en configuraciones de mayor capacidad y potencia total. Este análisis permite estudiar distintas estrategias de conexión en serie y paralelo para optimizar el comportamiento eléctrico y térmico del sistema, así como considerar la implementación de sistemas de gestión más avanzados, incluyendo BMS con balanceo activo y estimación directa del SOC. Asimismo, se pueden explorar métodos de refrigeración más eficientes, como la refrigeración líquida, especialmente para aplicaciones de ciclos de carga y descarga continuos o de alta intensidad. Estas proyecciones facilitan el diseño de packs adaptados a vehículos de pila de combustible u otras aplicaciones de alta potencia, maximizando la eficiencia, seguridad y vida útil de la batería.

Capítulo 8

Conclusiones

La presente memoria describe el proceso de diseño, desarrollo, simulación y validación experimental de un módulo de baterías de litio, cuyo Objetivo General es servir como pack de alta potencia y baja capacidad energética para vehículos eléctricos con pila de combustible FCEV. El diseño y la configuración del módulo 6s2p, utilizando celdas EVE-INR21700/40P, logra la alta potencia con valores de potencia específica que varían entre 2,33 y 2,86 [kW/kg], que resultan comparables al valor de referencia del Toyota Mirai, que es de 2,87 [kW/kg]. Sin embargo, el objetivo de baja capacidad se cumple parcialmente, puesto que la energía específica del módulo, en el rango de 79,64 a 97,73 [Wh/kg], y la densidad energética, entre 227 y 278 [Wh/L], superan significativamente los 27,60 [Wh/kg] y 52,45 [Wh/L] reportados para el Mirai, lo que sugiere un sobredimensionamiento en la capacidad de almacenamiento.

El estudio cubre el estado del arte asociado a las tecnologías de alta potencia en FCEV, identificando la necesidad de que la batería complemente la pila de combustible al suministrar potencia instantánea en los *peaks* de demanda. El modelado y la simulación del rendimiento del módulo se realizan en *MATLAB/Simulink*, siguiendo las directrices metodológicas de Javier Gazzarri y el marco teórico de Gregory L. Plett. Los ensayos simulados incluyen, la descarga a corriente nominal, que permite evaluar el comportamiento del módulo en condiciones de operación sostenida; la descarga a corriente máxima, diseñada para determinar la capacidad de la batería de responder a *peaks* de demanda y su efecto sobre la temperatura y la eficiencia del sistema; y la respuesta dinámica bajo el ciclo de conducción normalizado WLTP, que reproduce escenarios de uso real combinando tramos urbanos, suburbanos y de carretera, permitiendo analizar la operación de la batería durante aceleraciones, frenadas y cambios de velocidad. Cada uno de estos ensayos proporciona información clave para validar el diseño del módulo, garantizar la entrega de potencia requerida y asegurar la estabilidad térmica y eléctrica del sistema en condiciones de operación variadas.

El dimensionamiento se concreta en un módulo con una tensión nominal de 21.6 [V], una capacidad nominal de 8 [Ah], y una potencia máxima de 2.52 [kW], buscando un equilibrio entre tensión y corriente mediante la configuración en serie y paralelo. La evaluación en laboratorio se lleva a cabo mediante la construcción física del módulo 6s2p y la realización de pruebas de carga y descarga a distintas corrientes, asegurando que los ensayos se ejecuten bajo los lineamientos de seguridad de las normativas internacionales IEC 62133 e IEC 60086. Además, se implementa un ensayo de ventilación forzada, mediante flujo de aire

controlado sobre el módulo, con el fin de evaluar la eficacia de la disipación térmica y el comportamiento del sistema frente a incrementos de temperatura durante operaciones de alta potencia.

El análisis comparativo entre los resultados simulados y los experimentales revela que en regímenes de corriente nominal las dinámicas de potencia y temperatura son coherentes, compartiendo tendencias y comportamientos generales, aunque sus valores absolutos presentan diferencias debido a las condiciones reales de laboratorio y las limitaciones del modelo. Sin embargo, a altas corrientes, especialmente sobre 4C, el error comparativo aumenta en la potencia final y la temperatura, lo cual se atribuye a las simplificaciones del modelo térmico utilizado en la simulación y a la necesidad de emplear resistencias externas en el laboratorio para alcanzar la corriente máxima, provocando variaciones en la corriente real durante la descarga. La operación en laboratorio valida que el módulo mantiene una entrega de potencia estable en la zona lineal por 123 segundos a corriente máxima, lo cual es fundamental para el objetivo de alta potencia.

Respecto a la selección del BMS, el sistema pasivo BQ79606EVM-897 se emplea para garantizar la seguridad al monitorizar la tensión y la temperatura por celda y realizar balanceo pasivo. Sin embargo, el BMS no cumple con la implementación de balanceo activo ni con la medición directa del SOC, objetivos planteados originalmente, debido a restricciones de viabilidad y costo. El balanceo pasivo funciona manteniendo el equilibrio en milivoltios entre las celdas, pero disipa el exceso de carga en forma de calor, lo que reduce la eficiencia térmica del módulo. La estimación del SOC se realiza de forma externa al BMS mediante una estrategia híbrida Coulomb Counting y OCV, observándose que a altas corrientes el cálculo tiende a indicar una mayor disponibilidad de carga remanente que la realmente utilizable. A pesar de estas limitaciones, el BMS permite cumplir con los requerimientos mínimos de seguridad y balanceo, aunque su desempeño puede ser mejorado mediante la implementación de un sistema activo y medición directa del SOC en futuras versiones del pack.

En la gestión térmica, el estudio evalúa el desempeño de la convección natural, la ventilación forzada y la refrigeración líquida. Se demuestra que la convección natural resulta insuficiente, ya que la temperatura alcanza niveles cercanos al límite crítico de 80 [°C] durante la descarga máxima. La ventilación forzada mejora la disipación de calor, logrando reducir la temperatura máxima en aproximadamente 5 [°C] durante la descarga a 50 [A] y acelerando significativamente el tiempo de enfriamiento del módulo de 22 horas a 3.3 horas. No obstante, esta estrategia sigue siendo limitada, ya que no logra mantener la temperatura dentro de un rango óptimo durante operaciones prolongadas o ciclos de alta potencia repetidos. Por su parte, la simulación teórica de refrigeración líquida en ciclos WLTP repetidos confirma que esta es la estrategia más eficiente, manteniendo la temperatura dentro de un rango seguro y logrando descensos hasta 30 [°C] en reposo con carga, lo que garantiza la estabilidad térmica del módulo en condiciones exigentes.

En síntesis, la memoria valida el concepto de alta potencia para el módulo FCEV, lo que confirma la capacidad del diseño modular para operar de forma segura y estable durante *peaks* de potencia. Aunque el módulo se encuentra sobredimensionado en términos de capacidad energética, los resultados experimentales y la simulación establecen una base robusta y verificada que sirve para proyectar la escalabilidad del pack hacia configuraciones más complejas, garantizando que el diseño cumple con la estabilidad térmica y eléctrica requerida para su futura integración en un sistema de propulsión FCEV.

Bibliografía

- [1] Ministerio de Energía. *Estrategia Nacional de Electromovilidad*. 2021. URL: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia-nacional-electromovilidad_ministerio-de-energia.pdf.
- [2] Ministerio de Energía and Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. *Hoja de ruta para el avance de la electromovilidad en Chile: Acciones concretas al 2026*. 2023. URL: <https://www.mtt.gob.cl/wp-content/uploads/2023/08/documento-electromovilidad.pdf>.
- [3] Ministerio de Energía. *Transición Energética de Chile: Política Energética Nacional, Actualización 2022*. 2022. URL: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pen_2050_-_actualizado_marzo_2022_0.pdf.
- [4] Manuel Parola. *Chile reduce un 8,3 % consumo energético, tras aumento de las ventas de vehículos eléctricos*. <https://mobilityportal.lat/chile-reduccion-consumo-energetico-ventas>. Accedido el 22 de septiembre de 2025. 2025.
- [5] Ministerio de Energía. *Vehículos Eléctricos*. <https://energia.gob.cl/electromovilidad/vehiculos-electricos>. Accedido el 22 de septiembre de 2025. 2025.
- [6] Toyota Chile. *Del Prius al Mirai: Toyota expone su ruta hacia la Carbononeutralidad en seminario de la UNAB sobre hidrógeno*. Toyota Chile (Noticias).
- [7] Toyota España. *Componentes del coche de hidrógeno de Toyota*. Toyota España (World of Toyota).
- [8] Triana Wulandari Derek Fawcett Subhasish B. Majumder Gerrard E. J. Poinern. “Lithium-based batteries: history, current status, challenges, and future perspectives.” En: *Gerrard E. J. Poinern, Murdoch Applied Nanotechnology Research Group, School of Engineering and Energy, School of Mathematics, Statistics, Chemistry and Physics, Murdoch University, Murdoch, WA 6150, Australia*. (2023). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bte2.20230030>.
- [9] Hafeez Ajibade Chika Oliver Ujah Kingsley C. Nnakwo Daramy V. V Kallon. “Improvement in battery technologies as panacea for renewable energy crisis.” En: (2024). URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-024-06021-x>.
- [10] Javier Gazzarri. *Battery Modeling and Parameter Estimation for Simulink*. MATLAB Central File Exchange. 2012. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36019-battery-modeling>.

- [11] British Standards Institution (BSI) / International Electrotechnical Commission (IEC). *Draft BS EN IEC 62133-2 ED2: Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary lithium cells. Part 2: Lithium systems*. Borrador para Comentario Público. BSI Group Headquarters (DPC: 25/30513126 DC). 2025.
- [12] British Standards Institution (BSI) / International Electrotechnical Commission (IEC). *Primary batteries - Part 4: Safety of lithium batteries*. Tracked Changes. Compara BS EN IEC 60086-4:2025 con BS EN IEC 60086-4:2019. BSI Standards Publication / IEC 60086-4:2025. 2025.
- [13] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). *Emisiones de CO₂ Equivalente en Chile: Una mirada regional y sectorial*. Inf. téc. Informe Final. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), 2024. URL: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/35863/1/BCN_Emisiones_CO2_eq-Chile_2024_FINAL.pdf.
- [14] Ministerio del Medio Ambiente (MMA). *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero*. Gobierno de Chile. URL: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/emisiones>.
- [15] Expansión / datosmacro.com. *Emisiones de CO₂ en Chile*. datosmacro.com (Expansión).
- [16] Ministerio del Medio Ambiente (MMA). *HuellaChile: Documento de Cálculo - Factores de emisión nivel básico*. Documento Técnico (Versión 3). Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Gobierno de Chile, 2024. URL: https://huellachile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/11/HuellaChile-DCC-Factores-de-emision-nivel-basico_v3.pdf.
- [17] Ministerio del Medio Ambiente (MMA). *Huella de Carbono*. Gobierno de Chile. URL: <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono>.
- [18] Centro Nacional del Hidrógeno (CNH2). *Pilas de Combustible*. Centro Nacional del Hidrógeno (CNH2). s.f.
- [19] Alternative Fuels Data Center (AFDC) / U.S. Department of Energy. *How Do Fuel Cell Electric Cars Work?* Alternative Fuels Data Center (AFDC). s.f.
- [20] Gregory L. Plett. *Battery Management Systems, Battery Modeling*. Vol. 1. Artech House, 2015.
- [21] Gregory L. Plett. *Battery Management Systems, Equivalent-Circuit Methods*. Vol. 2. Artech House, 2016.
- [22] Alina Araceli Contreras Sillero Nimrod Vázquez Nava Claudia Verónica Hernández Gutiérrez Jeziel Vázquez Nava Joaquín Vaquero López. *Revisión de métodos para la estimación de los estados de carga y salud de una batería*. Tecnológico Nacional de México en Celaya, 2024.
- [23] Ángel Iván Rodríguez Cea. “Modelo para la batería de ion de litio de un vehículo eléctrico”. Tesis de mtría. Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, 2017.
- [24] Panasonic. *Datasheet Panasonic NCR18650BF:Lithium-ion Batteries*. 2023. URL: <https://energy.panasonic.com/na/business/products/lithium-ion/models/NCR18650BF%7D>.

- [25] Diego Steven Salazar Calahorra. *Caracterización, modelación y comparación de baterías empleadas en electromovilidad en base a su carga y descarga*. Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Carrera de Electricidad, 2022.
- [26] EverExceed. *Las características y análisis de principios de la resistencia interna de la batería de litio*. 2024. URL: https://es.everexceed.com/blog/the-characteristics-and-principle-analysis-of-internal-resistance-of-lithium-battery_b606%7D.
- [27] EverExceed. *Análisis y aplicación de curva de carga y descarga de batería de litio*. 2024. URL: https://es.everexceed.com/blog/analysis-and-application-of-charge-and-discharge-curve-of-lithium-battery_b601%7D.
- [28] Ines Baccouche et al. "Implementation of an Improved Coulomb-Counting Algorithm Based on a Piecewise SOC-OCV Relationship for SOC Estimation of Li-Ion Battery". En: *International Journal of Renewable Energy Research* (2017). arXiv:1803.10654v1.
- [29] J Xie et al. "State of charge estimation of lithium-ion battery based on extended Kalman filter algorithm". En: *Frontiers in Energy Research* 11 (2023), pág. 1180881. DOI: 10.3389/fenrg.2023.1180881.
- [30] M. F. Hossain S. A. Khan M. A. Hossain y M. R. Islam. "A Review of Passive and Active Battery Balancing based on MATLAB/Simulink". En: *International Journal of Engineering and Technology (IJET)* 2.4 (2012), págs. 662-669. URL: https://www.researchgate.net/publication/231169729_A_Review_of_Passive_and_Active_Battery_Balancing_based_on_MATLABSimulink.
- [31] Monolithic Power Systems (MPS). *Active Balancing: How it Works and its Advantages*. Monolithic Power Systems (MPS). URL: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/active-balancing-how-it-works-and-its-advantages> (visitado 27-09-2025).
- [32] Shuai Maa Modi Jianga Peng Taoa Chengyi Songa Jianbo Wua Jun Wangb Tao Deng Wen Shanga. "Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review". En: *School of Materials Science and Engineering, and State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, 800 Dongchuan Rd, Shanghai 200240, PR China* (2020). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007118307536>.
- [33] CFD Land. *Natural Convection: Understanding Heat Transfer in Fluid Systems*. CFD Land. s.f. URL: <https://cfdland.com/natural-convection-understanding-heat-transfer-in-fluid-systems>.
- [34] Z. Li et al. "A numerical investigation on heat and mass transfer characteristics of cathode and anode in proton exchange membrane fuel cell considering dynamic humidity and temperature distribution". En: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 212 (2023), pág. 124312. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001793102300176X>.
- [35] Toyota Argentina. *Toyota Mirai FCEV: ¿Cómo funciona el vehículo a hidrógeno de Toyota?* Toyota Argentina.
- [36] Hyundai Nexo Fuel Cell Vehicle. "Hyundai Motor Company". En: *Hyundai* (2023). URL: <https://www.hyundainews.com/assets/documents/original/52348-2023NEXOProductSpecifications20220720.pdf>.

- [37] Clarity Fuel Cell. “Honda Motor Co., Ltd.” En: *Honda* (2021). URL: <https://www.hondainfocenter.com/2021/Clarity-Fuel-Cell/Feature-Guide/Specifications/>.
- [38] Jane Liu Molly Zhang Spencer Xu. *Lithium-ion rechargeable cell for power tools Model: EVE-INR21700/40P*. 2020.
- [39] Jason Fan / Wenzhou Jason Fan Manufacturer Co., Ltd. *Ficha Técnica FJK6623PB230: Ventilador c/ Filtro de 204.5x204.5mm*. Ficha Técnica / Datasheet. Modelo: FJK6623PB230. Wenzhou Jason Fan Manufacturer Co., Ltd., s.f.
- [40] Mathworks. *EV Battery Cooling System Design*. 2024. URL: <https://la.mathworks.com/help/hydro/ug/EVBatteryCoolingSystemDesign.html>.
- [41] Texas Instruments. *BQ79606EVM-897 Evaluation Module*. Última consulta: 2025. 2023. URL: <https://www.mouser.cl/ProductDetail/Texas-Instruments/BQ79606EVM-897?qs=55YtniHzbhBfebQb1FccCw%3D%3D%7D>.
- [42] Vishay BC Components. *NTCLE100E3 NTC Thermistor, 10k*. 2023. URL: <https://www.mouser.cl/ProductDetail/Vishay-BC-Components/NTCLE100E3?qs=2KHn0Rt0k6ynz0wIE1tL2Q%3D%3D%7D>.
- [43] Molicel. *Datasheet Molicel INR21700-P45B*. 2023. URL: <https://www.molicel.com/inr-21700-p45b%7D>.
- [44] Dassault Systèmes / SOLIDWORKS. *Coeficiente de transferencia de calor por convección*. Documentación Oficial en Línea. 2011. URL: https://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm.
- [45] ScienceDirect Topics / Elsevier. *Dittus-Boelter Correlation*. ScienceDirect. s.f. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/dittus-boelter-correlation>.
- [46] SimScale. *What is the Reynolds Number?* SimScale Documentation (SimWiki), s.f. URL: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/numerics-background/what-is-the-reynolds-number/>.
- [47] John German Peter Mock Jörg Kühlwein Uwe Tietge Vicente Franco Anup Bandivadekar. *The WLTP: How a new test procedure for cars will affect fuel consumption values in the EU*. International Council on Clean Transportation, 2014.
- [48] RACE. *Ciclo WLTP de emisiones: ¿qué es y cuál es la normativa?* RACE, 2023. URL: <https://www.race.es/ciclo-wltp-emisiones-coche>.
- [49] Mauro Carignano y Ramon Costa-Castello. *Toyota Mirai: powertrain model and assessment of the energy management*. project MAFALDA, 2014.
- [50] Daniel J. Auger. *Driving Cycle (Simulink Block)*. MathWorks, 2025. URL: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46777-driving-cycle-simulink-block>.
- [51] Felipe Morales Flores. *Desarrollo e Implementación de un tren de propulsión subactuado compuesto por Pila de Combustible y Supercondensador, regulado con técnica de control no lineal*. Universidad Técnica Federico Santa María, 2024.
- [52] Toyota Motor Corporation. “Toyota Mirai FCV $Posters_{LR_{tcm}}$ ”. En: *Toyota* (2024). URL: <https://es.scribd.com/document/338288425/Toyota-Mirai-FCV-Posters-LR-Tcm-11-564265-1>.

- [53] coches.net. *Al volante del Mirai, el coche de hidrógeno*. Toyota Mirai, 2021. URL: <https://www.coches.net/videos/toyota-mirai-hidrogeno-pila-combustible-prueba%7D>.
- [54] Toyota Mirai. *Nuevo Toyota Mirai: así se presenta la segunda generación de la berlina de pila de combustible de Toyota*. Toyota Mirai, 2021. URL: <https://prensa.toyota.es/nuevo-toyota-mirai-asi-se-presenta-la-segunda-generacion-de-la-berlina-de-pila-de-combustible-de-toyota/%7D>.
- [55] Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). *Sistema Internacional de Unidades (SI)*. 8ª edición del SI, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). 2006. URL: <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure%7D>.
- [56] International Organization for Standardization. *Standard Atmosphere*. ISO 2533:1975. International Standard Atmosphere (ISA). 1975. URL: <https://www.iso.org/standard/7475.html%7D>.
- [57] Jordi Riera Diego Feroldi Maria Serra. *Control de Sistemas Basados en Pilas de Combustible Tipo PEM*. Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2024.
- [58] AMOT Staff. *El funcionamiento de la gestión térmica de las pilas de combustible*. AMOT Staff, 2023.
- [59] Abel Rubio Roldán. *Un Novel Modelo Dinámico de la Pila de Combustible Tipo PEM en un Contexto Estratégico*. Universidad Nacional de Cuyo Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, 2023.
- [60] Chroma. *Programmable AC/DC Electronic Load 63800 Series Operation Programming Manual*. 2009.
- [61] Elektro Automatik. *DC Laboratory Power Supply*. 2009.
- [62] Texas Instruments (TI). *Getting Started with the BQ79606A-Q1 GUI*. SLUUBQ2C. Guía de Usuario. Texas Instruments. Abr. de 2019.
- [63] Unify Physics. *Newton's Law of Cooling*. Unify Physics.
- [64] Battery Design. *Specific Heat Capacity of Lithium-ion Cells*. Battery Design.
- [65] CM Batteries. *Guía de baterías NMC: Ventajas y desventajas*. CM Batteries. s.f.
- [66] Adithya Legala et al. "Machine learning modeling for fuel cell-battery hybrid power system dynamics in a Toyota Mirai 2 vehicle under various drive cycles". En: *Energy and AI* 17 (2024), pág. 100415. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2666546824000818>.

Anexos

A.1. Circuito de refrigeración

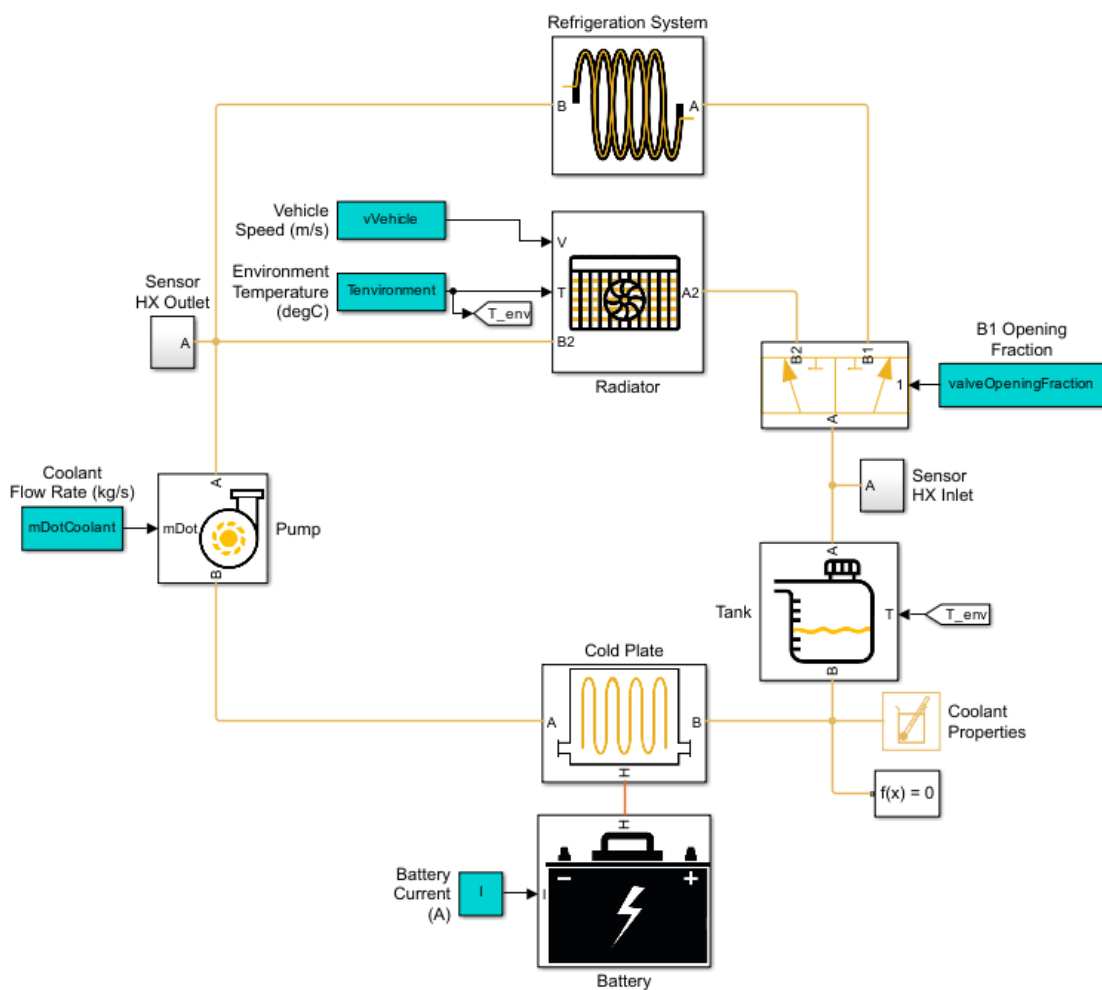


Figura 1. Circuito de Refrigeración Líquida [40]

A.2. Ensayos Adicionales

A.2.1. Simulink

Tabla 1
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 2C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,495 [V]	1,505 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	14,972 [V]	9,028 [V]
Potencia Módulo	384,000 [W]	239,555 [W]	144,445 [W]
Temperatura Módulo	24,996 [°C]	47,778 [°C]	22,782 [°C]
SOC Módulo	93,951 [%]	3,281 [%]	90,670 [%]
Tiempo	0 [s]	1632 [s]	1632 [s]

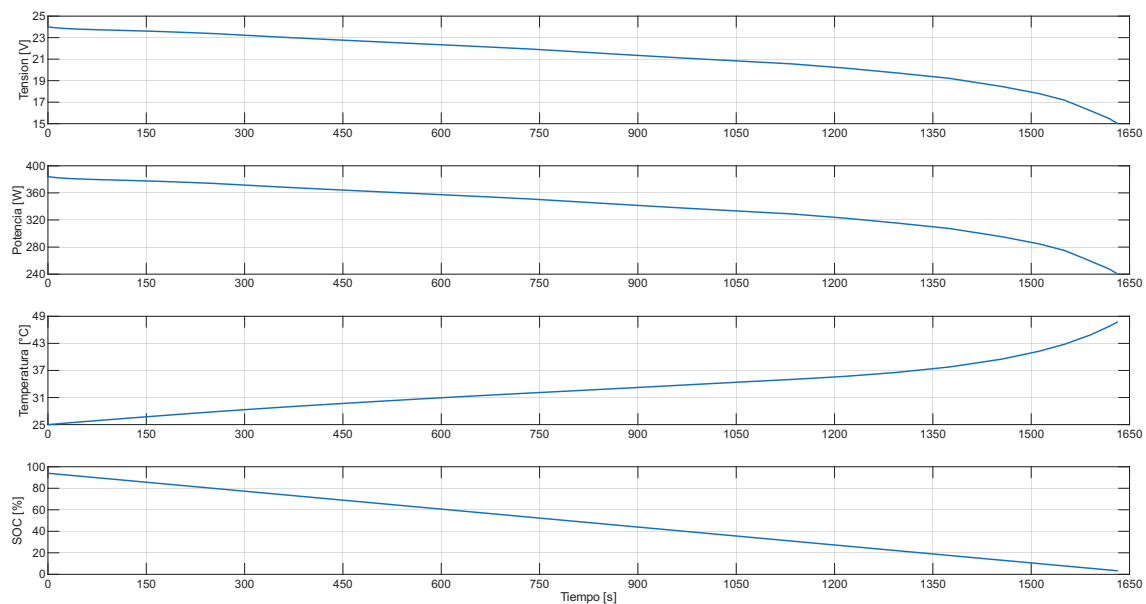


Figura 2. Resultados del ensayo de descarga a 2C.

Tabla 2
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 3C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,498 [V]	1,498 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	14,995 [V]	9,005 [V]
Potencia Módulo	576,000 [W]	359,880 [W]	216,120 [W]
Temperatura Módulo	24,996 [°C]	55,457 [°C]	30,461 [°C]
SOC Módulo	94,336 [%]	5,887 [%]	88,449 [%]
Tiempo	0 [s]	1061 [s]	1061 [s]

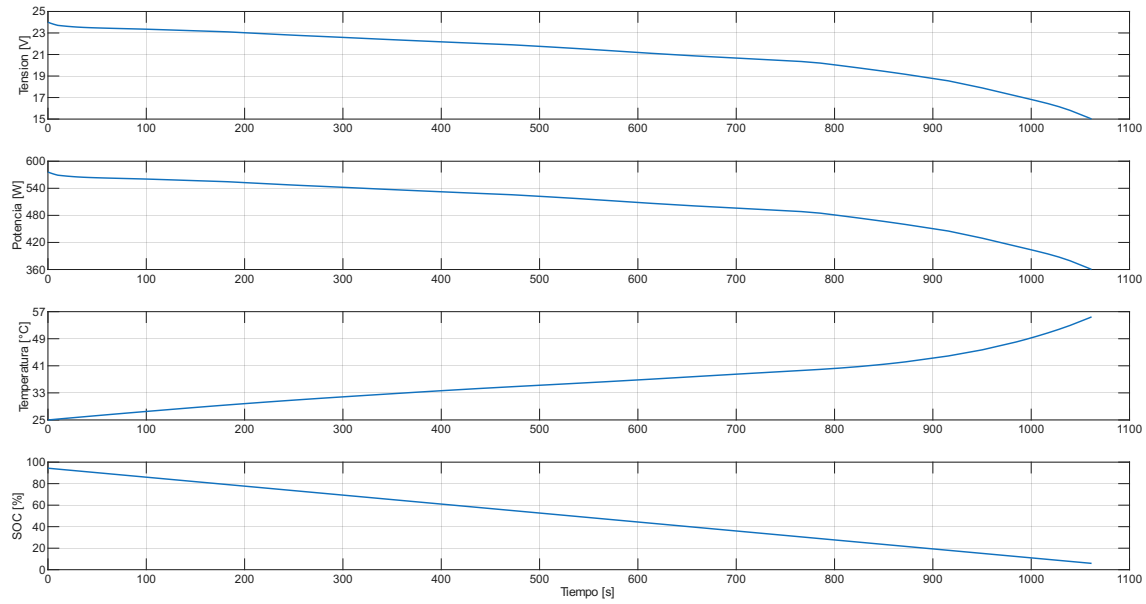


Figura 3. Resultados del ensayo de descarga a 3C.

Tabla 3

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 4C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,500 [V]	1,500 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	15,000 [V]	9,000 [V]
Potencia Módulo	768,000 [W]	480,000 [W]	288,000 [W]
Temperatura Módulo	24,996 [°C]	60,224 [°C]	35,228 [°C]
SOC Módulo	94,575 [%]	8,404 [%]	86,171 [%]
Tiempo	0 [s]	776 [s]	776 [s]

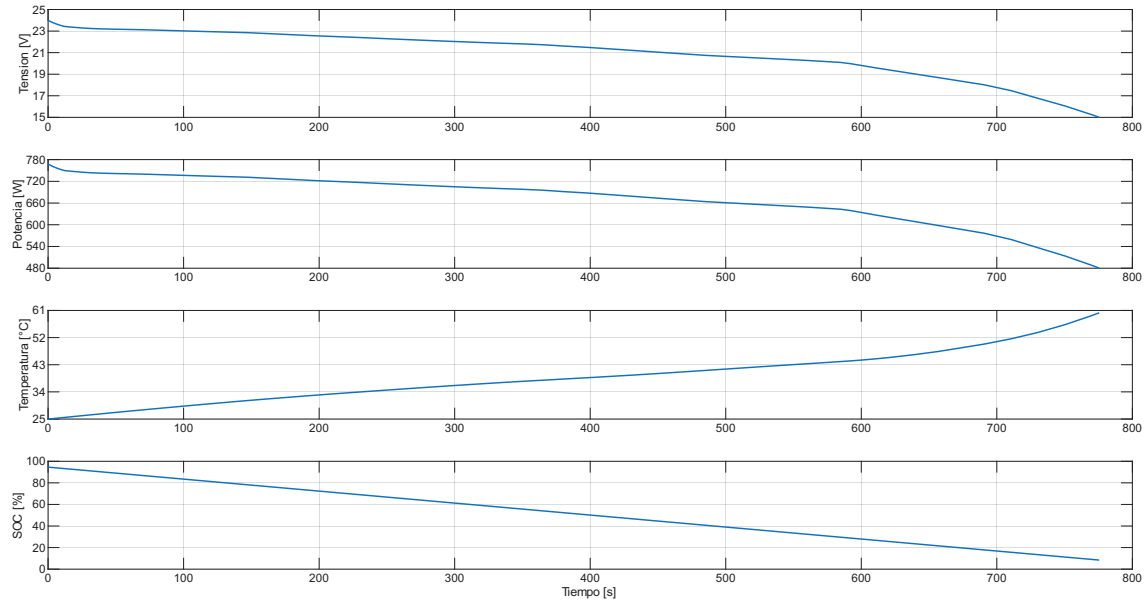


Figura 4. Resultados del ensayo de descarga a 4C.

Tabla 4

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 5C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,500 [V]	1,500 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	15,000 [V]	9,000 [V]
Potencia Módulo	960,000 [W]	599,989 [W]	360,011 [W]
Temperatura Módulo	24,996 [°C]	63,437 [°C]	38,441 [°C]
SOC Módulo	94,742 [%]	10,543 [%]	84,199 [%]
Tiempo	0 [s]	606 [s]	606 [s]

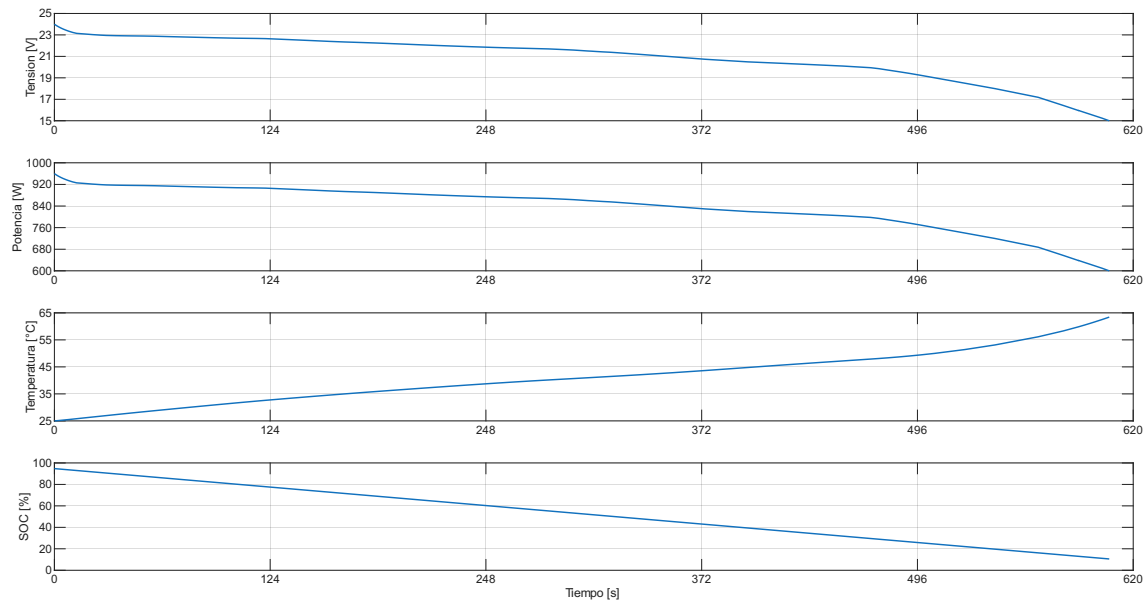


Figura 5. Resultados del ensayo de descarga a 5C.

Tabla 5

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 6C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,500 [V]	1,500 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	15,000 [V]	9,000 [V]
Potencia Módulo	1152,000 [W]	720,000 [W]	432,000 [W]
Temperatura	24,996 [°C]	65,914 [°C]	40,918 [°C]
SOC Módulo	94,864 [%]	12,265 [%]	82,599 [%]
Tiempo	0 [s]	496 [s]	496 [s]

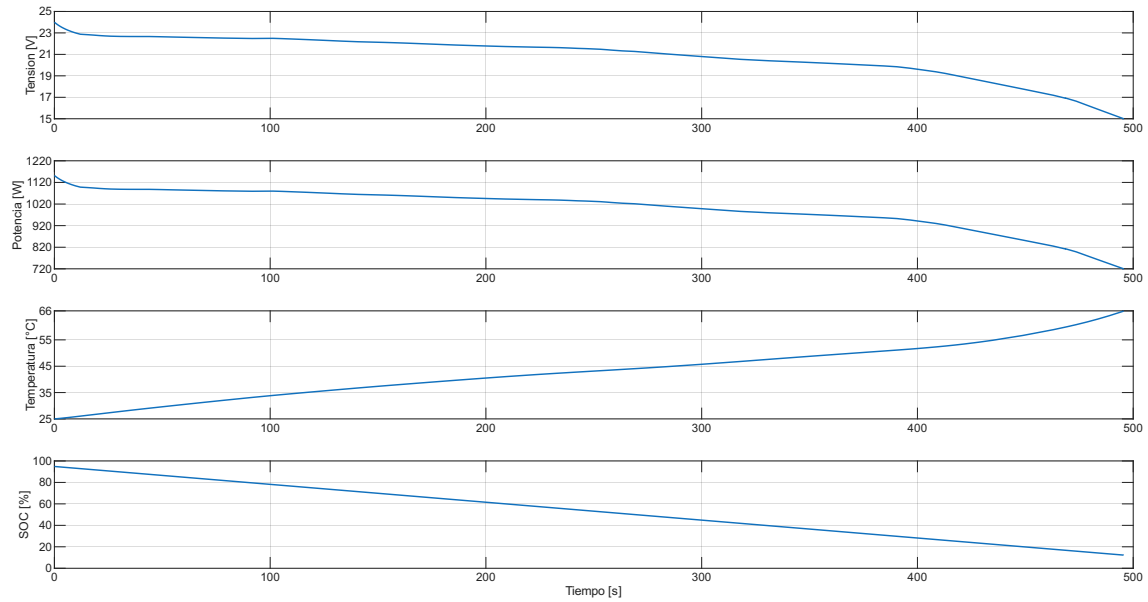


Figura 6. Resultados del ensayo de descarga a 6C.

Tabla 6

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 7C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,500 [V]	1,500 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	15,000 [V]	9,000 [V]
Potencia Módulo	1344,000 [W]	840,000 [W]	504,000 [W]
Temperatura	24,996 [°C]	68,105 [°C]	43,109 [°C]
SOC Módulo	94,958 [%]	13,563 [%]	81,396 [%]
Tiempo	0 [s]	419 [s]	419 [s]

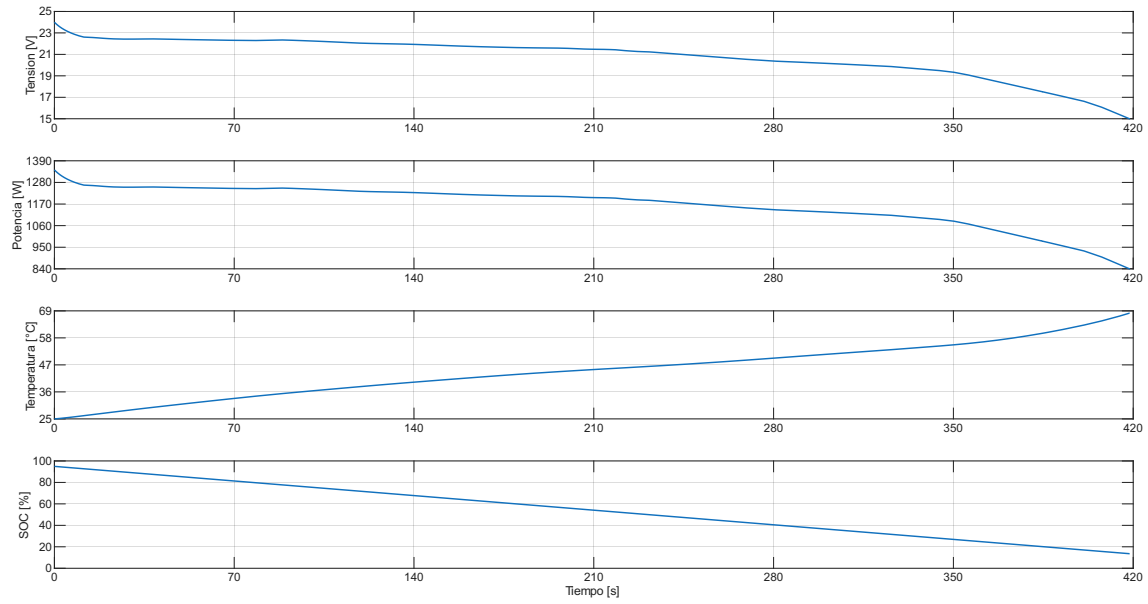


Figura 7. Resultados del ensayo de descarga a 7C.

Tabla 7

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 8C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,496 [V]	1,504 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	14,975 [V]	9,025 [V]
Potencia Módulo	1536,000 [W]	958,414 [W]	577,586 [W]
Temperatura	25,996 [°C]	70,175 [°C]	45,180 [°C]
SOC Módulo	95,033 [%]	14,498 [%]	80,535 [%]
Tiempo	0 [s]	362 [s]	362 [s]

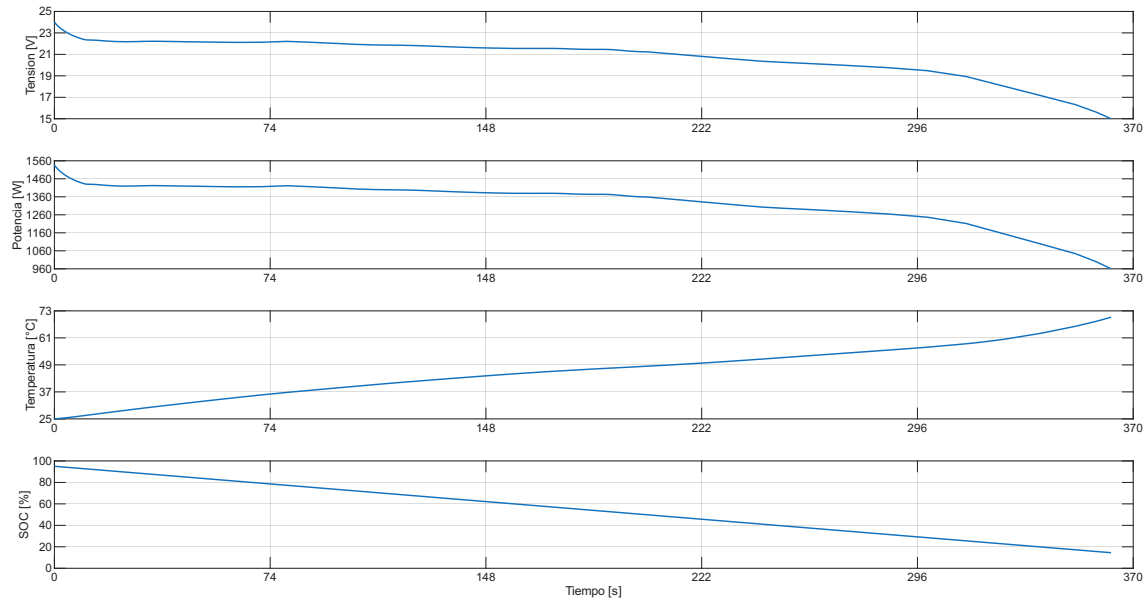


Figura 8. Resultados del ensayo de descarga a 8C.

Tabla 8

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 9C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,499 [V]	1,501 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	14,998 [V]	9,002 [V]
Potencia Módulo	1728,000 [W]	1079,850 [W]	648,150 [W]
Temperatura	24,996 [°C]	71,809 [°C]	46,813 [°C]
SOC Módulo	95,095 [%]	15,305 [%]	79,789 [%]
Tiempo	0 [s]	319 [s]	319 [s]

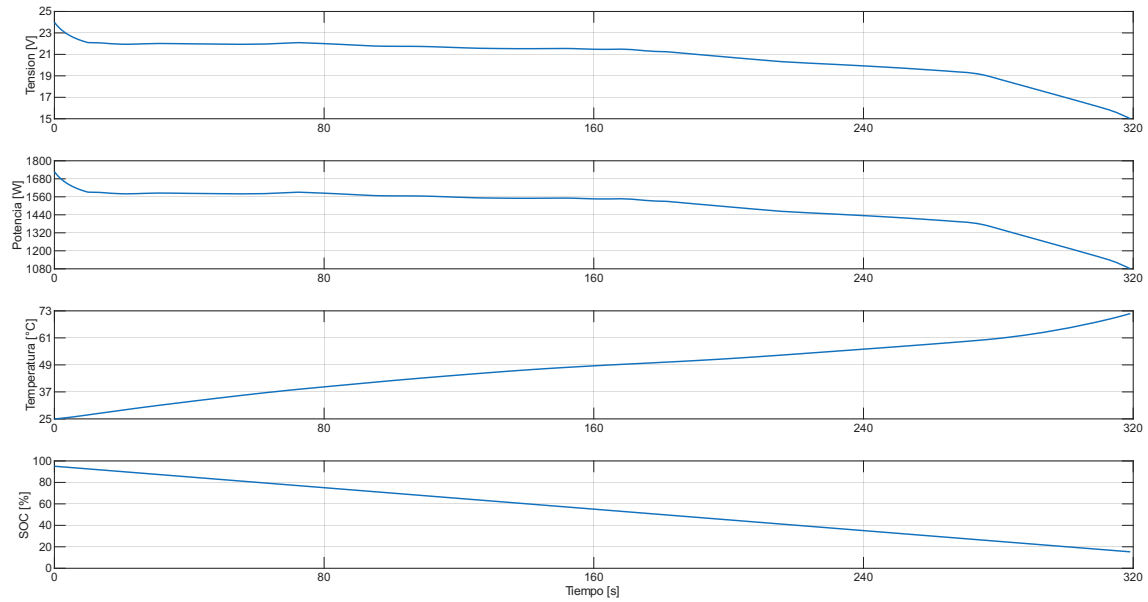


Figura 9. Resultados del ensayo de descarga a 9C.

Tabla 9

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 10C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,500 [V]	1,500 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	15,000 [V]	9,000 [V]
Potencia Módulo	1920,000 [W]	1199,998 [W]	720,002 [W]
Temperatura	24,996 [°C]	73,424 [°C]	48,428 [°C]
SOC Módulo	95,146 [%]	15,914 [%]	79,232 [%]
Tiempo	0 [s]	285 [s]	285 [s]

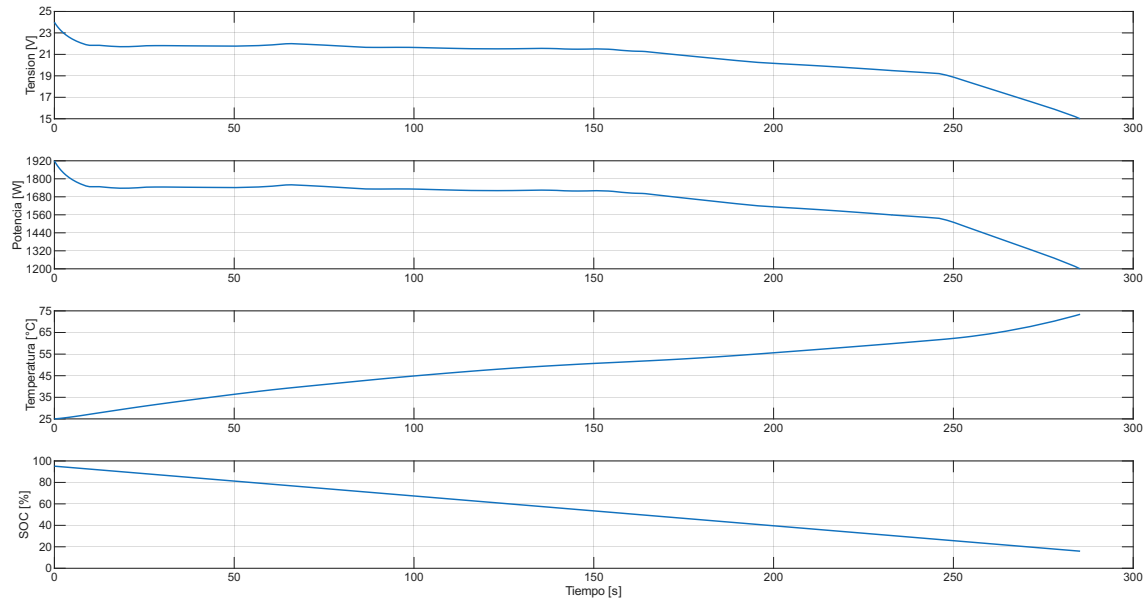


Figura 10. Resultados del ensayo de descarga a 10C.

Tabla 10

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 11C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,500 [V]	1,500 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	15,000 [V]	9,000 [V]
Potencia Módulo	2112,000 [W]	1320,000 [W]	792,000 [W]
Temperatura	24,996 [°C]	74,483 [°C]	49,487 [°C]
SOC Módulo	95,189 [%]	16,625 [%]	78,564 [%]
Tiempo	0 [s]	257 [s]	257 [s]

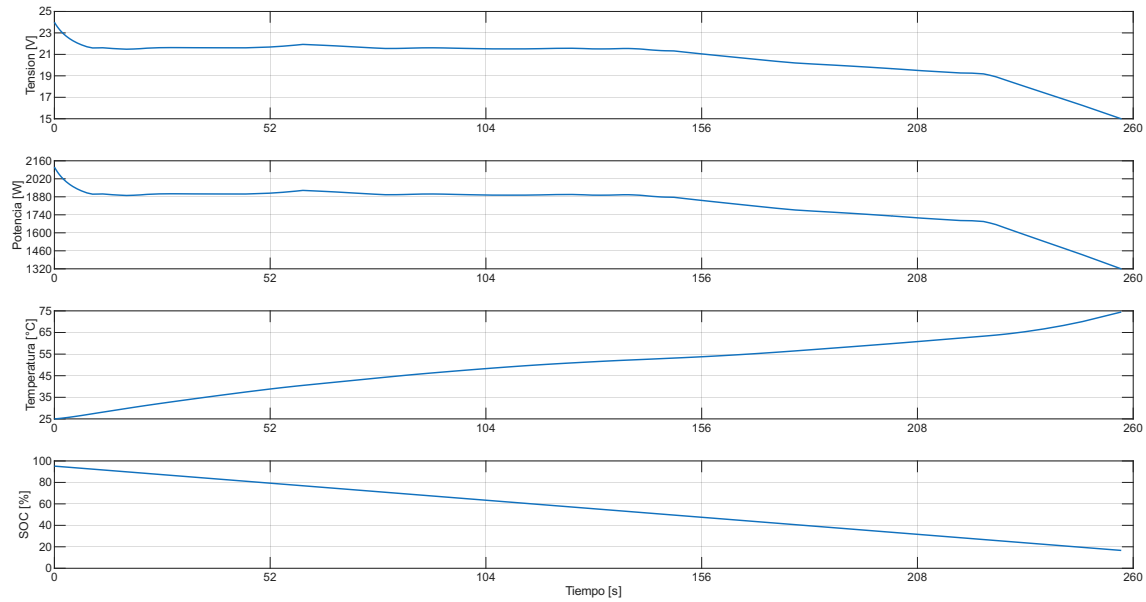


Figura 11. Resultados del ensayo de descarga a 11C.

Tabla 11

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 12C.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda	4,000 [V]	2,500 [V]	1,500 [V]
Tensión Módulo	24,000 [V]	15,000 [V]	9,000 [V]
Potencia Módulo	2304,000 [W]	1440,000 [W]	864,000 [W]
Temperatura	24,996 [°C]	75,268 [°C]	50,272 [°C]
SOC Módulo	95,226 [%]	17,311 [%]	77,915 [%]
Tiempo	0 [s]	234 [s]	234 [s]

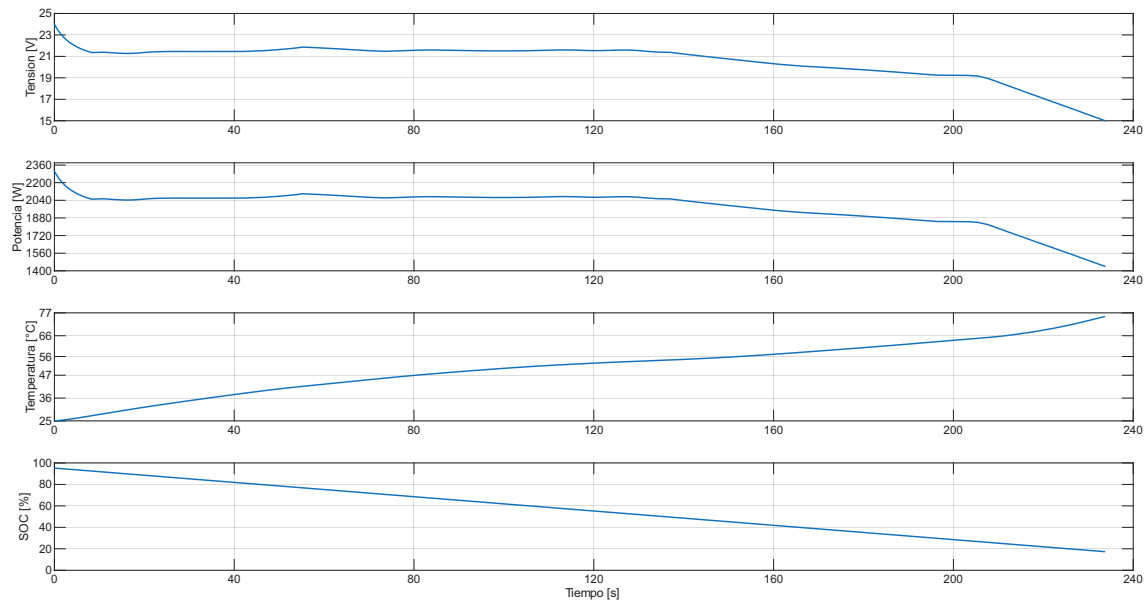


Figura 12. Resultados del ensayo de descarga a 12C.

A.2.2. Laboratorio

Tabla 12

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 2C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,010 [V]	2,508 [V]	1,501 [V]
Tensión Celda 2	4,002 [V]	2,500 [V]	1,502 [V]
Tensión Celda 3	3,993 [V]	2,494 [V]	1,499 [V]
Tensión Celda 4	3,992 [V]	2,493 [V]	1,499 [V]
Tensión Celda 5	3,989 [V]	2,494 [V]	1,495 [V]
Tensión Celda 6	4,001 [V]	2,500 [V]	1,501 [V]
Tensión Módulo	23,987 [V]	14,990 [V]	8,997 [V]
Potencia Módulo	383,788 [W]	239,842 [W]	143,946 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	47,926 [°C]	22,926 [°C]
SOC Módulo	89,150 [%]	0 [%]	89,150 [%]
Tiempo	0 [s]	1599 [s]	1605 [s]

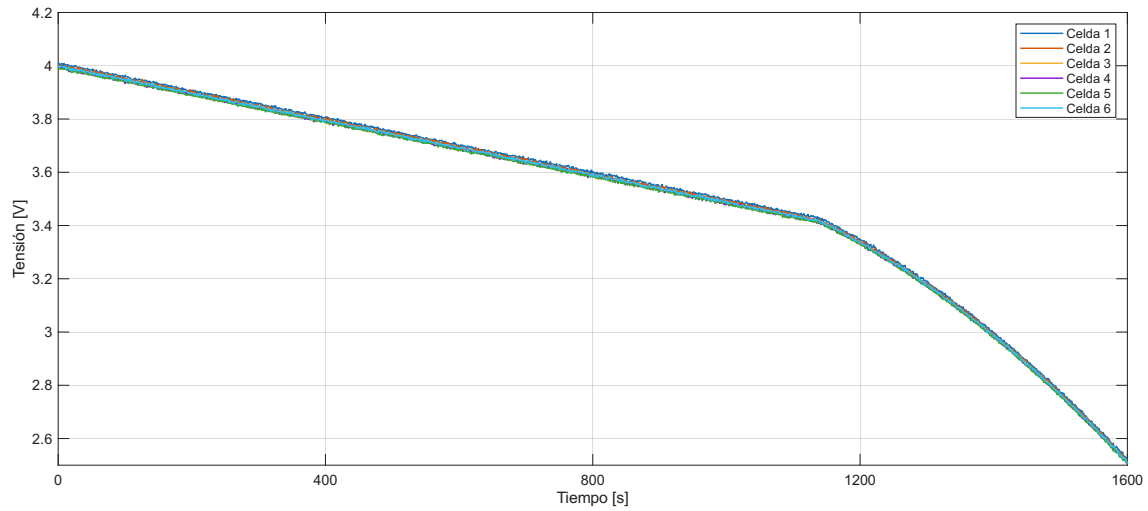


Figura 13. Descarga de cada celda a 2C en el laboratorio.

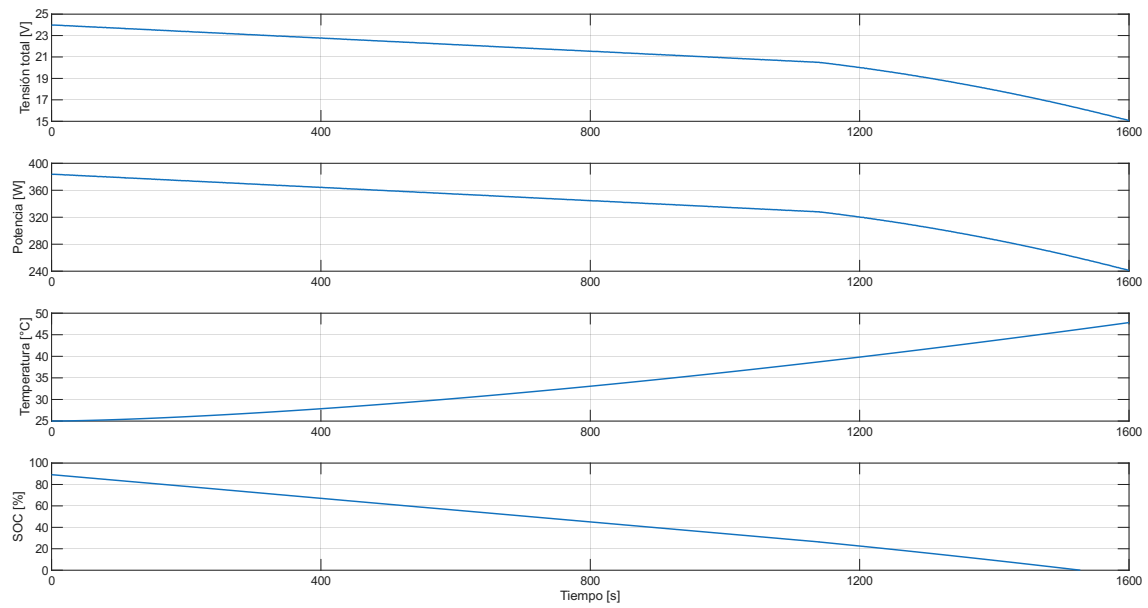


Figura 14. Resultados del ensayo de descarga a 2C en el laboratorio.

Tabla 13
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 3C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,006 [V]	2,500 [V]	1,493 [V]
Tensión Celda 2	3,996 [V]	2,492 [V]	1,500 [V]
Tensión Celda 3	3,991 [V]	2,491 [V]	1,501 [V]
Tensión Celda 4	4,009 [V]	2,503 [V]	1,497 [V]
Tensión Celda 5	4,001 [V]	2,499 [V]	1,493 [V]
Tensión Celda 6	3,999 [V]	2,498 [V]	1,495 [V]
Tensión Módulo	24,002 [V]	14,982 [V]	8,979 [V]
Potencia Módulo	576,045 [W]	359,574 [W]	216,470 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	55,466 [°C]	30,466 [°C]
SOC Módulo	89,170 [%]	0 [%]	89,170 [%]
Tiempo	0 [s]	1038 [s]	1038 [s]

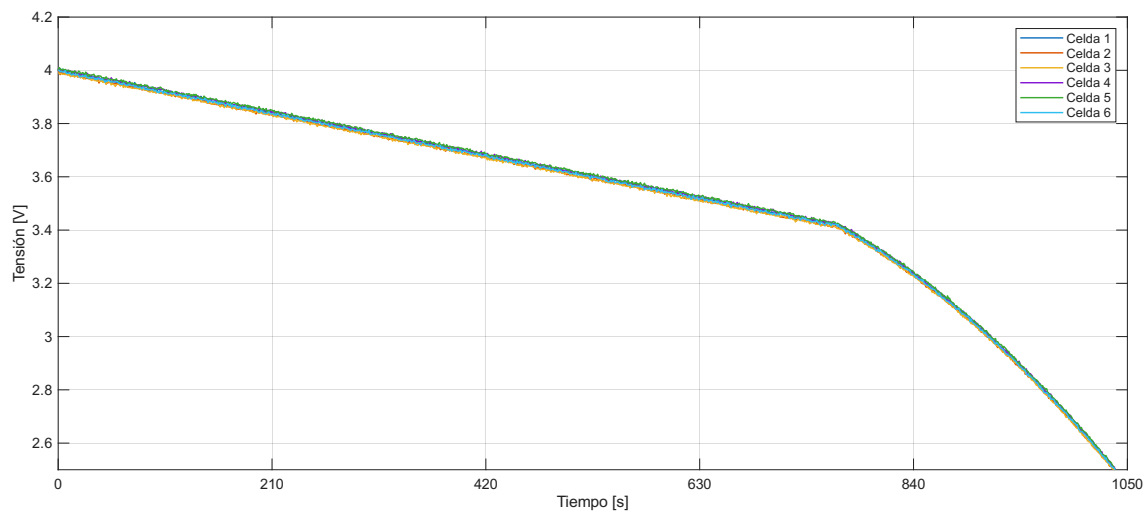


Figura 15. Descarga de cada celda a 3C en el laboratorio.

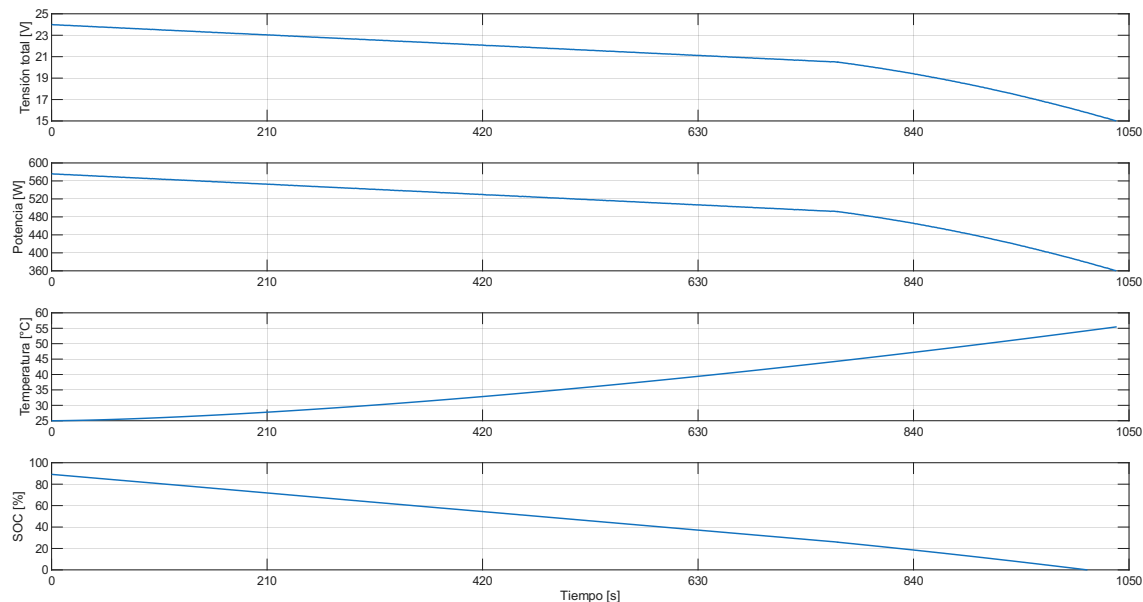


Figura 16. Resultados del ensayo de descarga a 3C en el laboratorio.

Tabla 14

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 4C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,002 [V]	2,498 [V]	1,504 [V]
Tensión Celda 2	4,001 [V]	2,507 [V]	1,495 [V]
Tensión Celda 3	4,009 [V]	2,502 [V]	1,507 [V]
Tensión Celda 4	3,992 [V]	2,491 [V]	1,501 [V]
Tensión Celda 5	3,998 [V]	2,498 [V]	1,500 [V]
Tensión Celda 6	4,006 [V]	2,513 [V]	1,493 [V]
Tensión Módulo	23,998 [V]	14,998 [V]	9,000 [V]
Potencia Módulo	767,937 [W]	479,950 [W]	287,987 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	60,859 [°C]	35,859 [°C]
SOC Módulo	89,170 [%]	0 [%]	89,170 [%]
Tiempo	0 [s]	757 [s]	757 [s]

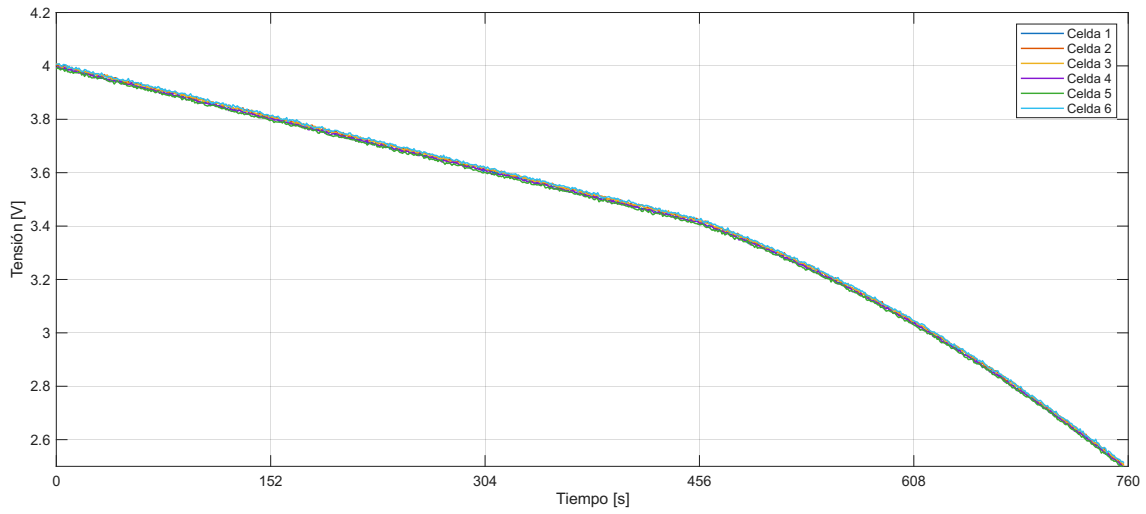


Figura 17. Descarga de cada celda a 4C en el laboratorio.

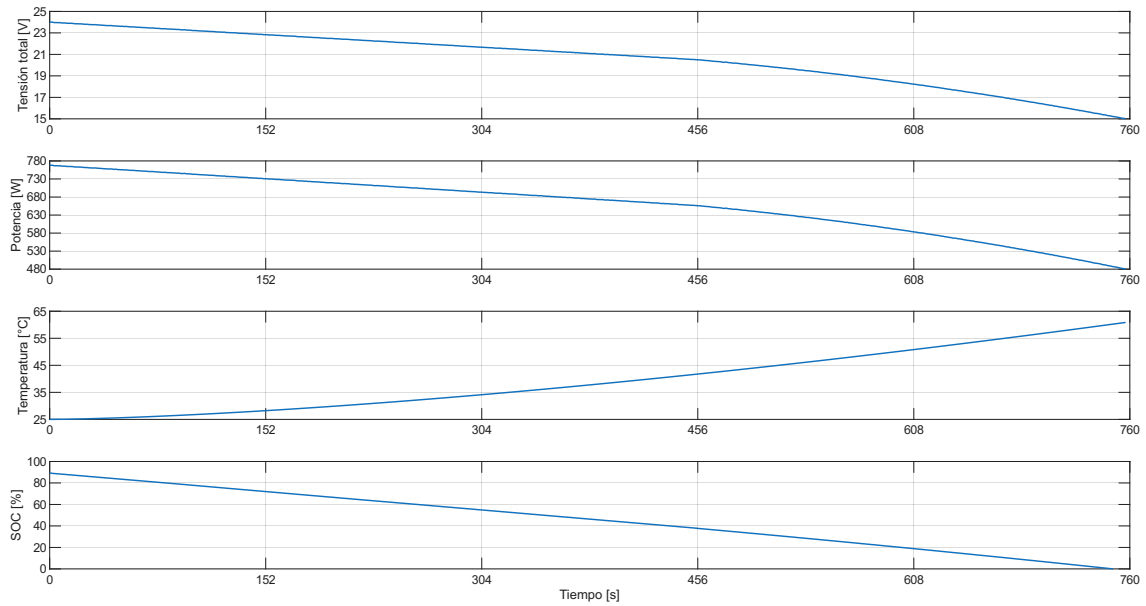


Figura 18. Resultados del ensayo de descarga a 4C en el laboratorio.

Tabla 15
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 5C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,000 [V]	2,495 [V]	1,506 [V]
Tensión Celda 2	3,999 [V]	2,500 [V]	1,499 [V]
Tensión Celda 3	4,001 [V]	2,501 [V]	1,501 [V]
Tensión Celda 4	4,007 [V]	2,511 [V]	1,496 [V]
Tensión Celda 5	4,001 [V]	2,505 [V]	1,497 [V]
Tensión Celda 6	4,003 [V]	2,505 [V]	1,498 [V]
Tensión Módulo	24,012 [V]	15,016 [V]	8,996 [V]
Corriente Módulo	40,000 [A]	36,995 [A]	3,005 [A]
Potencia Módulo	960,474 [W]	554,896 [W]	406,453 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	64,202 [°C]	39,202 [°C]
SOC Módulo	89,190 [%]	2,280 [%]	86,890 [%]
Tiempo	0 [s]	588 [s]	588 [s]

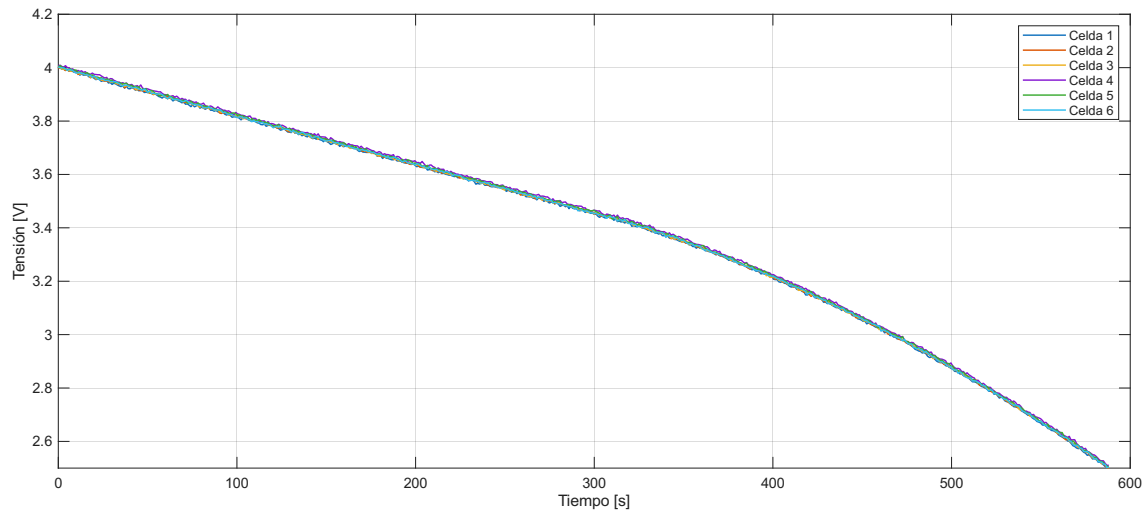


Figura 19. Descarga de cada celda a 5C en el laboratorio.

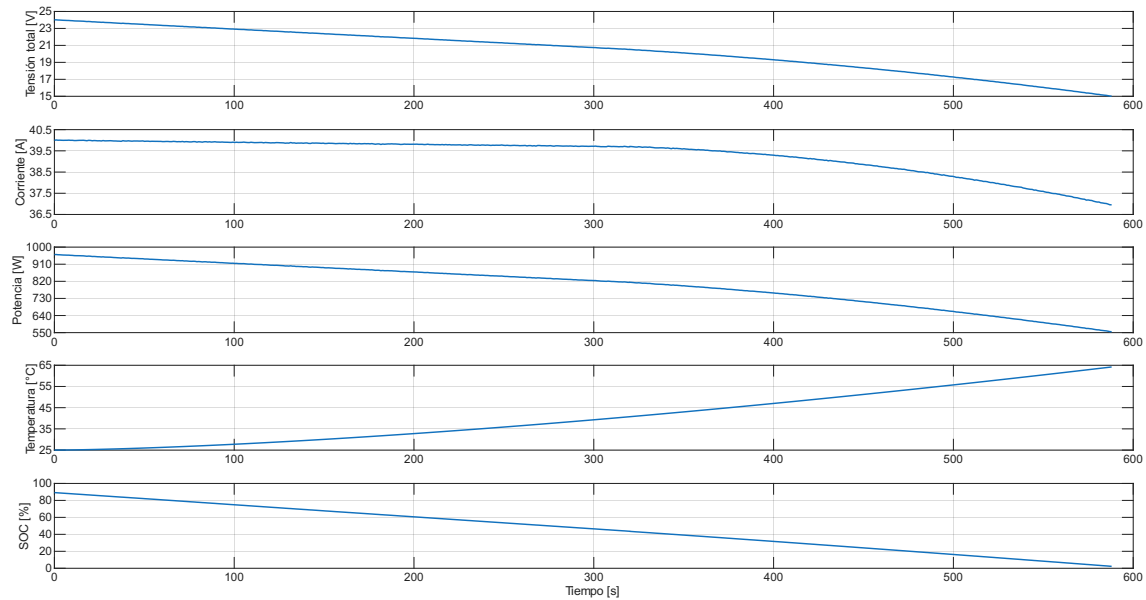


Figura 20. Resultados del ensayo de descarga a 5C en el laboratorio.

Tabla 16

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 6C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,002 [V]	2,506 [V]	1,501 [V]
Tensión Celda 2	4,002 [V]	2,504 [V]	1,497 [V]
Tensión Celda 3	3,989 [V]	2,500 [V]	1,496 [V]
Tensión Celda 4	3,988 [V]	2,503 [V]	1,495 [V]
Tensión Celda 5	4,009 [V]	2,488 [V]	1,501 [V]
Tensión Celda 6	4,010 [V]	2,509 [V]	1,503 [V]
Tensión Módulo	24,001 [V]	15,008 [V]	8,987 [V]
Corriente Módulo	48,000 [A]	40,254 [A]	8,254 [A]
Potencia Módulo	1152,029 [W]	604,162 [W]	547,867 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	66,796 [°C]	41,796 [°C]
SOC Módulo	89,160 [%]	6,950 [%]	82,31 [%]
Tiempo	0 [s]	480 [s]	4480 [s]

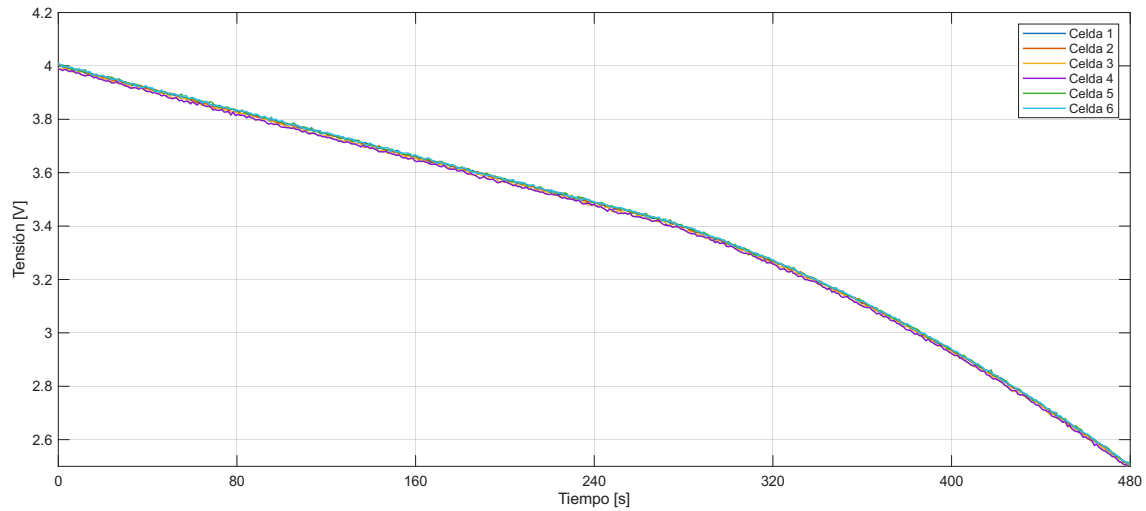


Figura 21. Descarga de cada celda a 6C en el laboratorio.

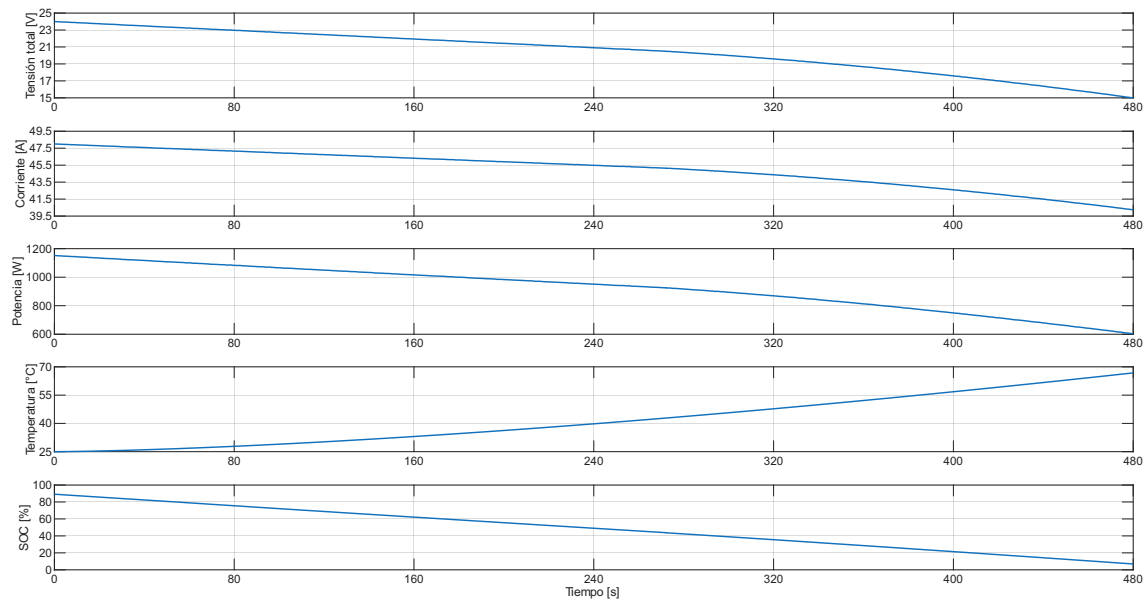


Figura 22. Resultados del ensayo de descarga a 6C en el laboratorio.

Tabla 17
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 7C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,001 [V]	2,499 [V]	1,502 [V]
Tensión Celda 2	4,012 [V]	2,503 [V]	1,509 [V]
Tensión Celda 3	3,995 [V]	2,500 [V]	1,495 [V]
Tensión Celda 4	4,009 [V]	2,513 [V]	1,496 [V]
Tensión Celda 5	3,994 [V]	2,393 [V]	1,499 [V]
Tensión Celda 6	4,006 [V]	2,498 [V]	1,507 [V]
Tensión Módulo	24,016 [V]	15,007 [V]	9,015 [V]
Corriente Módulo	56,000 [A]	47,363 [A]	8,2637 [A]
Potencia Módulo	1344,905 [W]	710,786 [W]	634,118 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	69,245 [°C]	44,245 [°C]
SOC Módulo	89,190 [%]	8,130 [%]	81,060 [%]
Tiempo	0 [s]	404 [s]	404 [s]

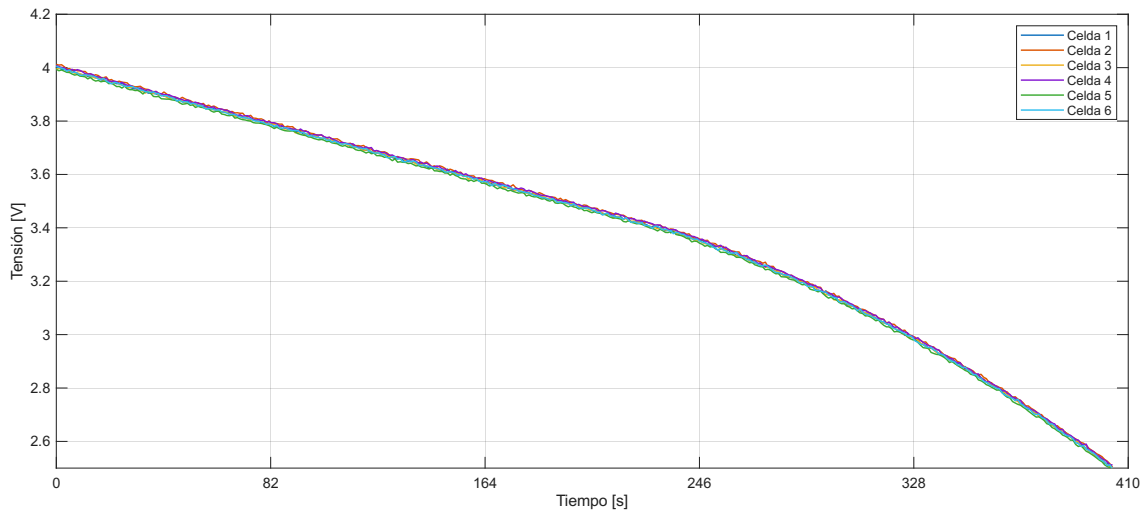


Figura 23. Descarga de cada celda a 7C en laboratorio.

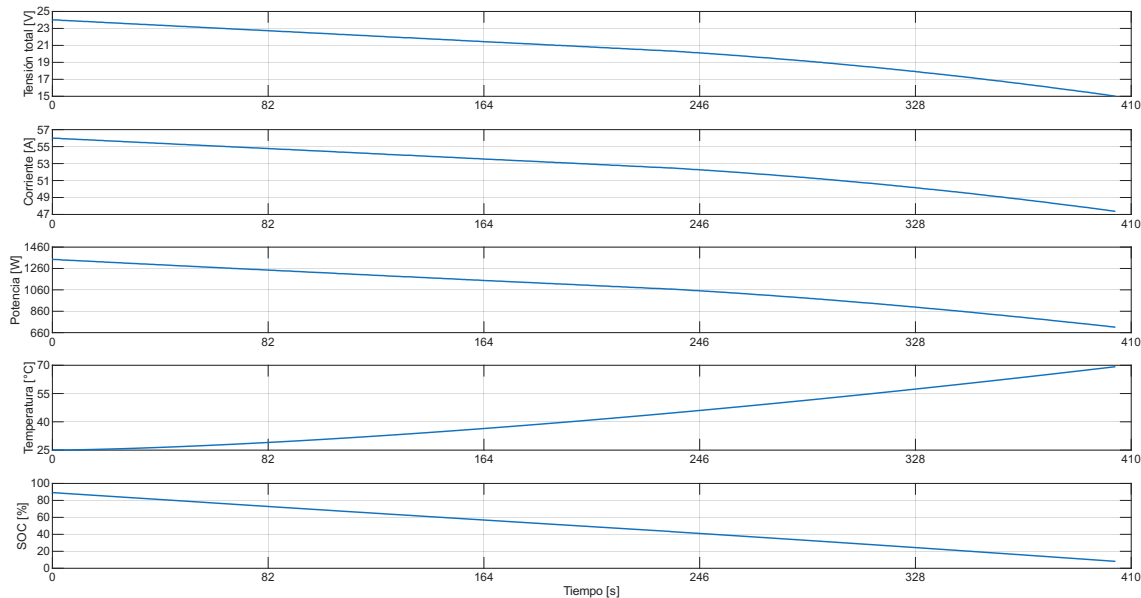


Figura 24. Resultados del ensayo de descarga a 7C en el laboratorio.

Tabla 18
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 8C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,007 [V]	2,504 [V]	1,503 [V]
Tensión Celda 2	3,998 [V]	2,500 [V]	1,498 [V]
Tensión Celda 3	4,004 [V]	2,500 [V]	1,504 [V]
Tensión Celda 4	4,009 [V]	2,508 [V]	1,501 [V]
Tensión Celda 5	4,009 [V]	2,505 [V]	1,504 [V]
Tensión Celda 6	4,009 [V]	2,513 [V]	1,496 [V]
Tensión Módulo	24,036 [V]	15,030 [V]	9,006 [V]
Corriente Módulo	64,000 [A]	55.158 [A]	8,842 [A]
Potencia Módulo	1538,212 [W]	829,022 [W]	709,290 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	72,198 [°C]	47,198 [°C]
SOC Módulo	89,230 [%]	8,790 [%]	80,440 [%]
Tiempo	0 [s]	348 [s]	404 [s]

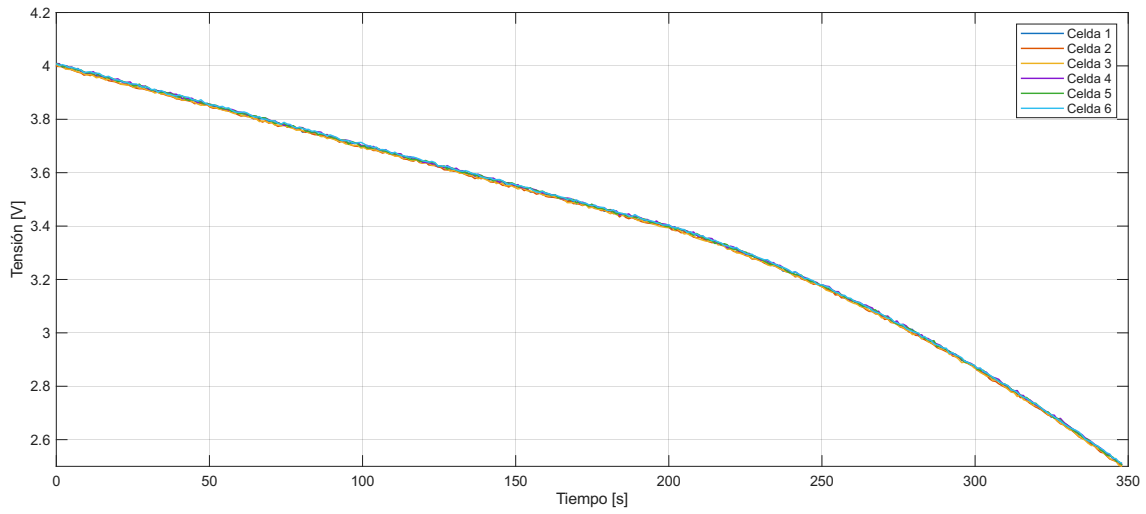


Figura 25. Descarga de cada celda a 8C.

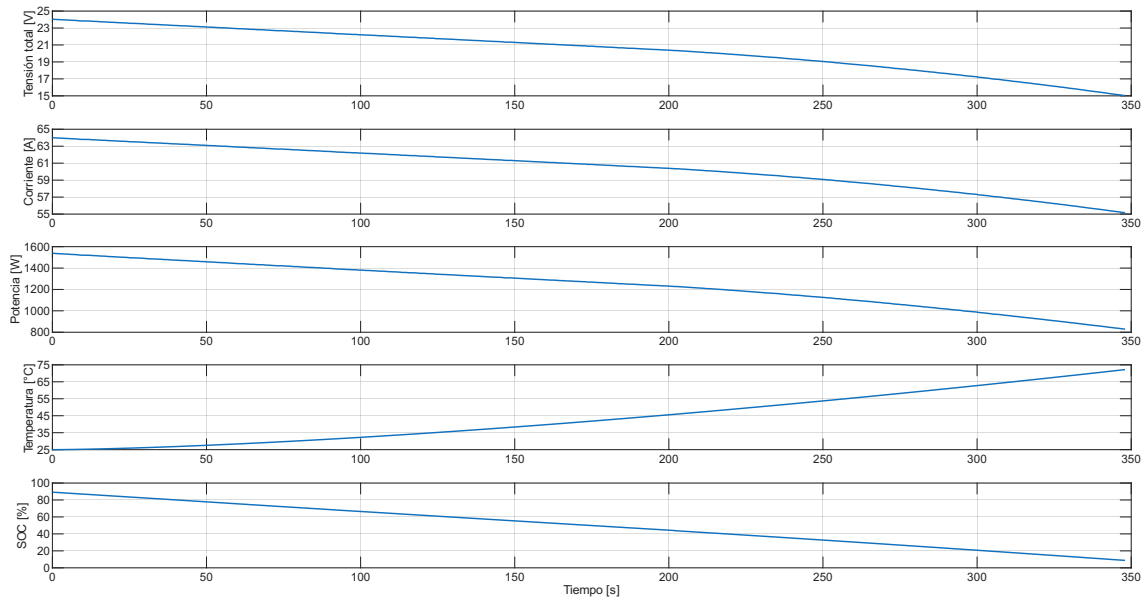


Figura 26. Resultados del ensayo de descarga a 8C en el laboratorio.

Tabla 19
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 9C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	3,995 [V]	2,496 [V]	1,499 [V]
Tensión Celda 2	3,999 [V]	2,495 [V]	1,504 [V]
Tensión Celda 3	3,990 [V]	2,491 [V]	1,499 [V]
Tensión Celda 4	3,999 [V]	2,503 [V]	1,497 [V]
Tensión Celda 5	4,002 [V]	2,509 [V]	1,493 [V]
Tensión Celda 6	4,011 [V]	2,508 [V]	1,503 [V]
Tensión Módulo	23,996 [V]	15,002 [V]	8,994 [V]
Corriente Módulo	72,000 [A]	61,979 [A]	10,021 [A]
Potencia Módulo	1727,727 [W]	929,796 [W]	797,931 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	74,009 [°C]	49,009 [°C]
SOC Módulo	89,160 [%]	9,860 [%]	79,300 [%]
Tiempo	0 [s]	305 [s]	305 [s]

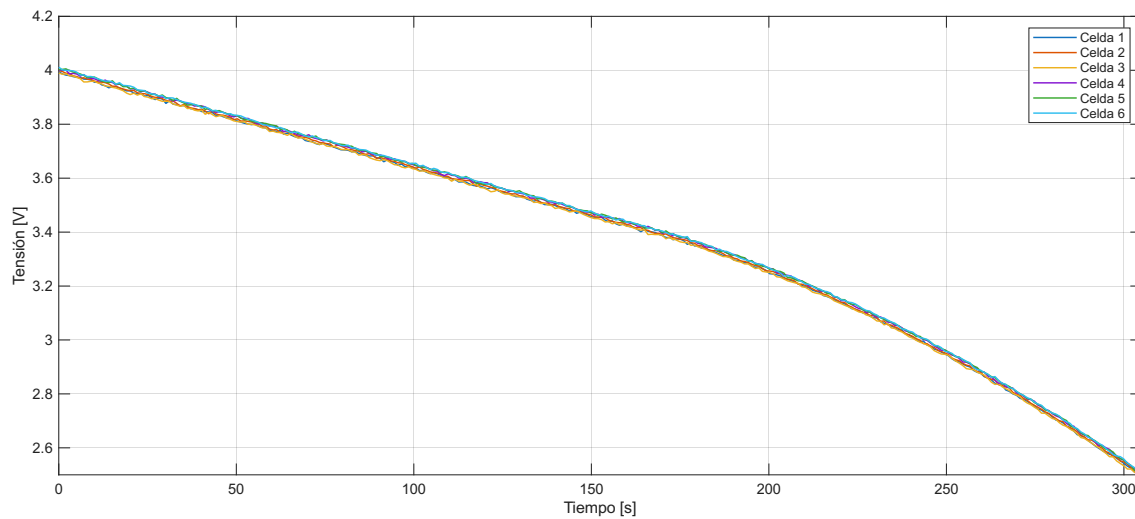


Figura 27. Descarga de cada celda a 9C.

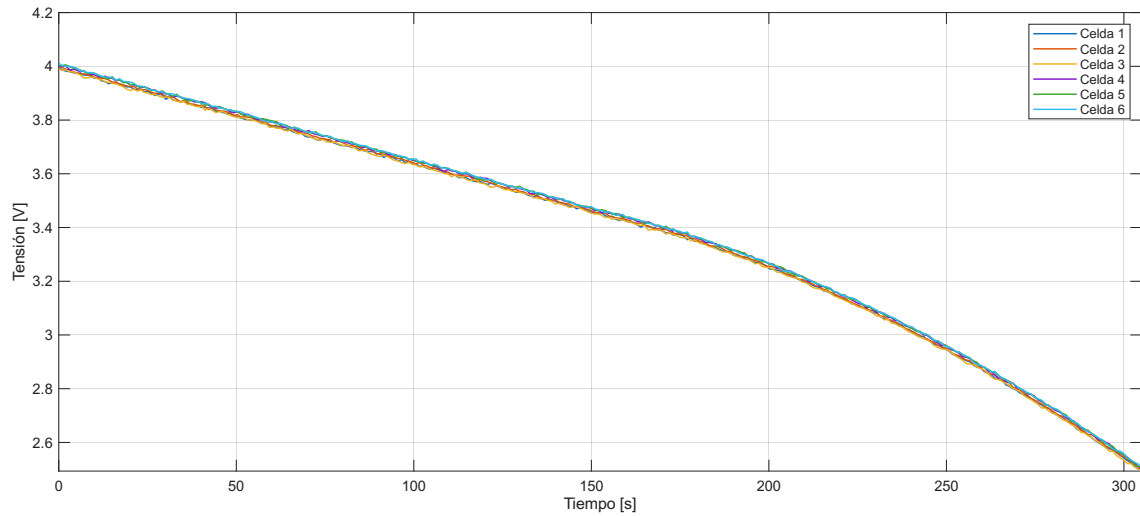


Figura 28. Resultados del ensayo de descarga a 9C en el laboratorio.

Tabla 20

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 10C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,001 [V]	2,509 [V]	1,492 [V]
Tensión Celda 2	3,999 [V]	2,502 [V]	1,498 [V]
Tensión Celda 3	4,003 [V]	2,500 [V]	1,503 [V]
Tensión Celda 4	3,999 [V]	2,507 [V]	1,492 [V]
Tensión Celda 5	4,014 [V]	2,507 [V]	1,506 [V]
Tensión Celda 6	4,007 [V]	2,501 [V]	1,506 [V]
Tensión Módulo	24,024 [V]	15,025 [V]	8,998 [V]
Corriente Módulo	80,000 [A]	69,879 [A]	10,121 [A]
Potencia Módulo	1921,888 [W]	1024,935 [W]	871,935 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	76,522 [°C]	51,522 [°C]
SOC Módulo	89,210 [%]	10,260 [%]	78,950 [%]
Tiempo	0 [s]	271 [s]	271 [s]

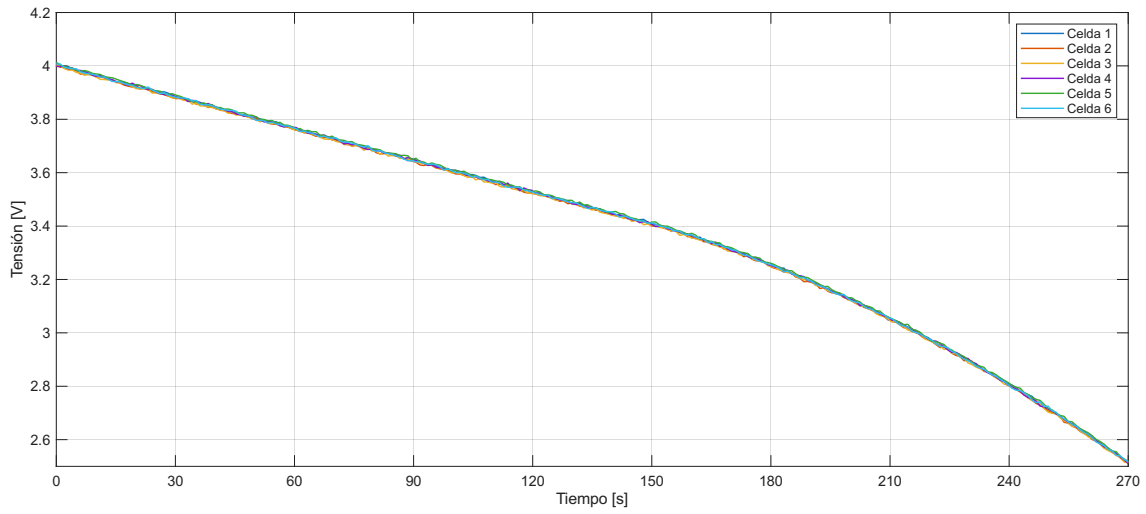


Figura 29. Descarga de cada celda a 10C.

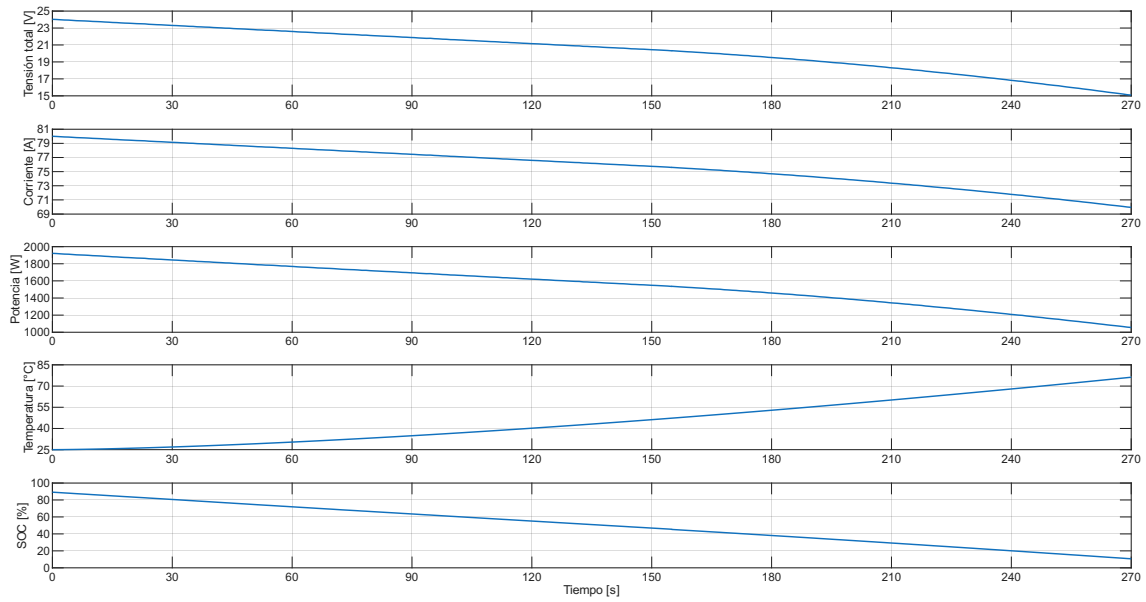


Figura 30. Resultados del ensayo de descarga a 10C en el laboratorio.

Tabla 21
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 11C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,001 [V]	2,494 [V]	1,507 [V]
Tensión Celda 2	3,994 [V]	2,492 [V]	1,502 [V]
Tensión Celda 3	3,997 [V]	2,497 [V]	1,500 [V]
Tensión Celda 4	4,002 [V]	2,500 [V]	1,502 [V]
Tensión Celda 5	3,997 [V]	2,500 [V]	1,498 [V]
Tensión Celda 6	3,993 [V]	2,491 [V]	1,502 [V]
Tensión Módulo	23,984 [V]	14,974 [V]	9,011 [V]
Corriente Módulo	88,000 [A]	79,024 [A]	8,976 [A]
Potencia Módulo	2110,618 [W]	1183,274 [W]	871,935 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	76,522 [°C]	53,347 [°C]
SOC Módulo	89,140 [%]	10,120 [%]	78,950 [%]
Tiempo	0 [s]	244 [s]	244 [s]

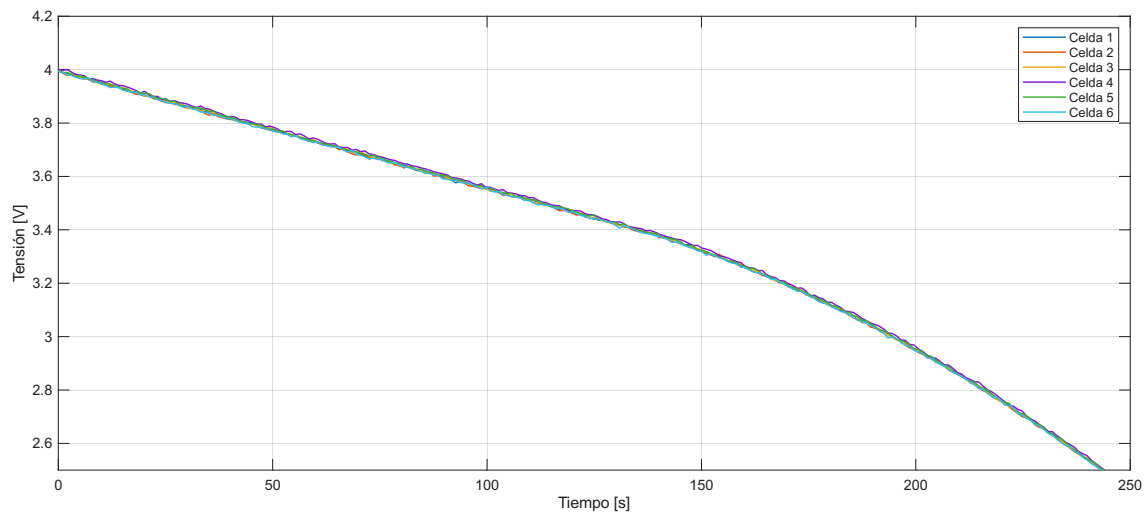


Figura 31. Descarga de cada celda a 11C.

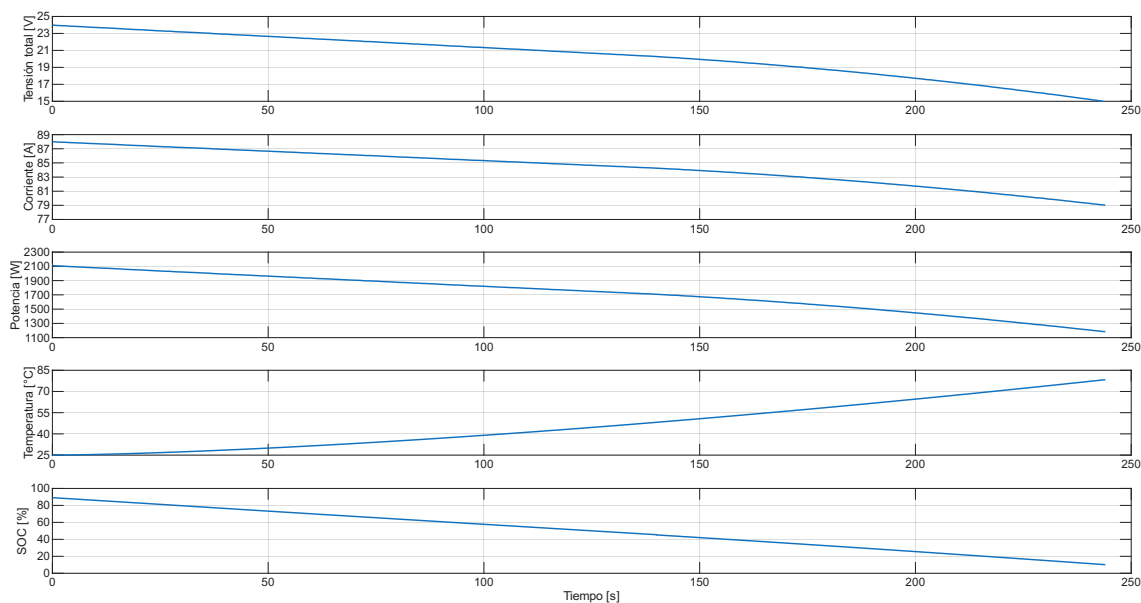


Figura 32. Resultados del ensayo de descarga a 11C en el laboratorio.

Tabla 22

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESCARGA A 12C EN EL LABORATORIO.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	$ \Delta $
Tensión Celda 1	4,002 [V]	2,504 [V]	1,497 [V]
Tensión Celda 2	3,994 [V]	2,494 [V]	1,500 [V]
Tensión Celda 3	3,991 [V]	2,495 [V]	1,496 [V]
Tensión Celda 4	4,009 [V]	2,506 [V]	1,503 [V]
Tensión Celda 5	3,999 [V]	2,506 [V]	1,495 [V]
Tensión Celda 6	3,999 [V]	2,500 [V]	1,499 [V]
Tensión Módulo	23,994 [V]	15,004 [V]	8,990 [V]
Corriente Módulo	96,000 [A]	87,219 [A]	8,781 [A]
Potencia Módulo	2303,396 [W]	1308,605 [W]	994,792 [W]
Temperatura Módulo	25,000 [°C]	80,155 [°C]	55,155 [°C]
SOC Módulo	89,160 [%]	10,300 [%]	78,860 [%]
Tiempo	0 [s]	222 [s]	222 [s]

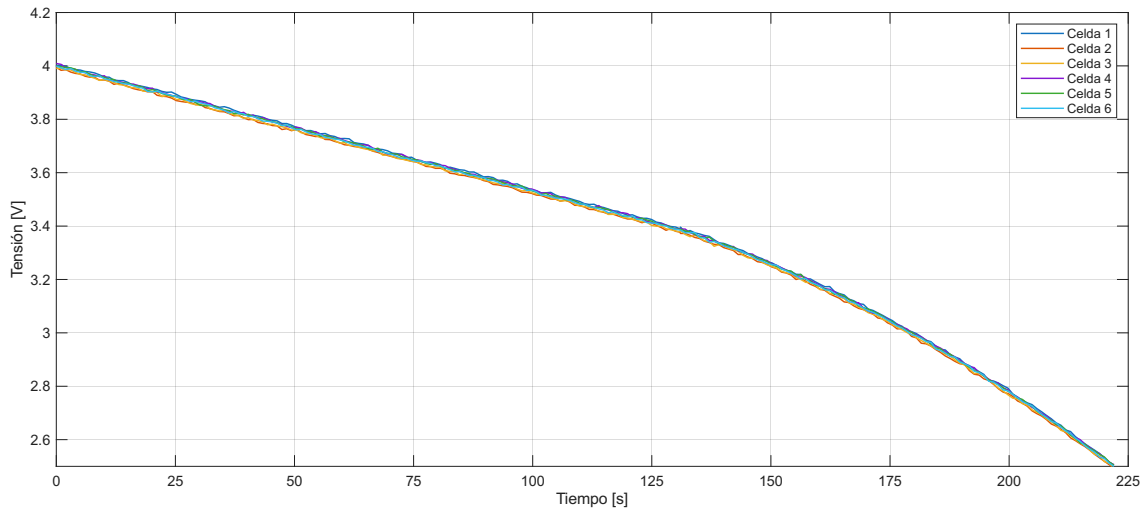


Figura 33. Descarga de cada celda a 12C.

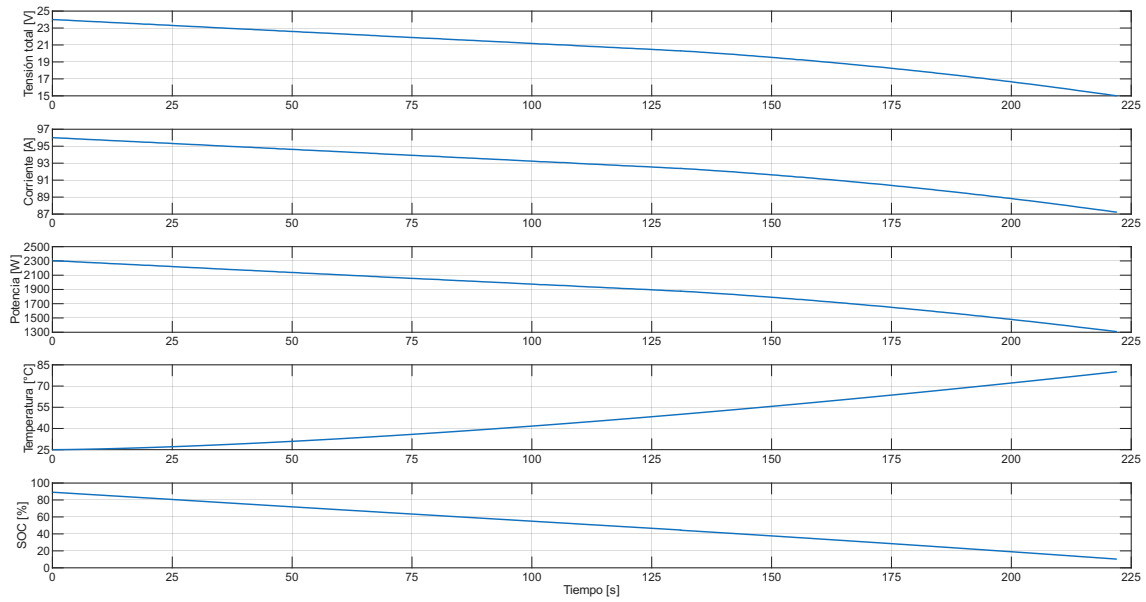


Figura 34. Resultados del ensayo de descarga a 12C en el laboratorio.