UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

TEMA:

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE DESCARGAS MÚLTIPLES PARA CARACTERIZACIÓN DE BATERÍAS LI-ION

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero (a) Eléctrico (a)

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR (A):

Alexis Antonio Pozo Chiscueth

DIRECTOR (A):

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

Ibarra – Ecuador (2026)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Pozo Chiscueth Alexis Antonio

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Implementación de un prototipo de descargas múltiples para caracterización de baterías Li-ion
AUTOR (ES):	Pozo Chiscueth Alexis Antonio
FECHA: DD/MM/AAAA	29/05/2026
PROGRAMA:	☒ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Jhonny Barzola MSc Ing. Isabel Quinde MSc

2. CONSTANCIAS

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

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

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ALEXIS ANTONIO POZO CHISCUETH

(Firma)……
Nombre: Pozo Chiscueth Alexis Antonio

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Jhonny Javier Barzola Iza en calidad de director del señor estudiante Alexis Antonio Pozo Chiscueth certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: “Implementación de un prototipo de descargas múltiples para caracterización de baterías Li-ion”.

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

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JHONNY JAVIER BARZOLA IZA

.....

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios, por brindarme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para superar cada desafío presentado a lo largo de este camino. Gracias por guiar mis pasos y permitirme alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

A mis padres, Isabel Chiscueth y Edwin Pozo, quienes han sido mi mayor ejemplo de esfuerzo, responsabilidad y perseverancia. Gracias por su amor incondicional, por cada consejo, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por brindarme siempre las herramientas necesarias para seguir adelante. Este logro también es suyo.

A mis abuelos, Fanny Portilla, Antonio Chiscueth y Rosa Herrera, por su cariño, sus enseñanzas y su apoyo a lo largo de mi vida. Sus palabras, experiencias y valores han sido una guía importante en mi formación personal y profesional.

A mi abuelita Pastora Pozo, quien aunque ya no se encuentra físicamente con nosotros, sigue siendo parte importante de mi vida y de este logro. Su recuerdo, sus enseñanzas y el cariño que siempre me brindó permanecen presentes en mi camino.

Finalmente, a mi hermano David Pozo y a su familia, por su apoyo, su confianza y por estar presentes en los momentos importantes de este proceso, brindándome siempre ánimo y motivación para continuar.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi profunda gratitud a Dios, por brindarme la salud, la templanza y la sabiduría necesarias para alcanzar este importante hito en mi formación académica. Su guía ha sido constante en cada etapa, bendiciéndome con una familia y amigos cuyo apoyo incondicional ha sido el pilar de mi crecimiento personal.

Mi sincero reconocimiento al Msc. Jhonny Barzola, mi tutor, por su generosidad al compartir sus conocimientos y por brindarme una asesoría técnica. Su acompañamiento fue determinante para la ejecución de este proyecto; su paciencia y entrega no solo fortalecieron mis competencias, sino que también me infundieron la confianza necesaria para superar cada desafío.

Asimismo, agradezco a la Msc. Isabel Quinde por su invaluable labor como asesora. Su compromiso, experiencia y permanente paciencia han sido fundamentales para mi desarrollo tanto académico como profesional durante todo este proceso.

A la planta docente que conforma la Carrera de Electricidad, agradeciendo por transmitir su experiencia y conocimientos con tanta vocación, su labor educativa ha sido la base sobre la cual he construido mi perfil profesional.

Finalmente, manifiesto mi gratitud a la Universidad Técnica del Norte por abrirme sus puertas y permitirme crecer en un ambiente de excelencia. Los valores y aprendizajes adquiridos en esta institución son herramientas invaluables que me acompañarán durante toda mi trayectoria laboral

INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE CONTENIDOS v

INDICE DE FIGURAS ix

INDICE DE TABLAS xi

RESUMEN xii

ABSTRACT xiii

INTRODUCCIÓN 1

Tema 1

El problema 1

1.1 Problema de investigación. 1

1.1.1 Problemática a investigar. 1

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación 1

1.2 Objetivos 1

1.2.1 Objetivo general. 1

1.2.2 Objetivos específicos. 2

1.3 Alcance y delimitación 2

1.4 Justificación 3

MARCO TEÓRICO 4

2.1 Antecedentes 4

2.2 Introducción a las Baterías de Li-ion en el Campo Energético 6

2.3 Importancia de las baterías en la transición energética 7

2.4 Ventajas y desafíos de las baterías en aplicaciones modernas 7

2.5 Clasificación General de Baterías 8

2.5.1 Baterías de plomo-ácido 8

2.5.2 Baterías de níquel-cadmio 8

2.5.3 Baterías de níquel-hidruro metálico 9

2.5.4 Baterías de Li-ion 9

2.6 Composición interna de baterías Li-ion..... 10

2.6.1 Ánodo 11

2.6.2 Cátodo..... 12

2.6.3 Electrolito 13

2.6.4 Separador..... 13

2.7 Tipos de baterías Li-ion..... 14

2.7.1 LFP (Fosfato de Hierro-Litio, LiFePO4)..... 14

2.7.2 NMC (Níquel-Manganeso-Cobalto, LiNiMnCoO2) 15

2.7.3 NCA (Níquel-Cobalto-Aluminio, LiNiCoAlO2) 16

2.7.4 LCO (Óxido de Cobalto-Litio, LiCoO2)..... 17

2.7.5 LMO (Óxido de Manganeso-Litio, LiMn2O4) 18

2.7.6 Cuadro comparativo de los tipos de baterías Li-ion 19

2.8 Métodos de caracterización no invasiva en baterías Li-ion..... 21

2.8.1 Test de capacidad 22

2.8.2 Pruebas de voltaje de circuito abierto..... 23

2.8.3 IC/DV (Incremental Capacity / Differential Voltage)..... 23

2.8.4 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) 23

MATERIALES Y METODOS..... 24

3.1 Enfoque y tipo de investigación..... 24

3.2 Análisis de métodos de caracterización no invasiva 26

3.2.1 Análisis comparativo de precisión y exactitud..... 26

3.2.2 Análisis de viabilidad técnica y económica..... 28

3.2.3 Factores que afectan la selección del método..... 30

3.2.4 Evaluación global de los métodos de caracterización no invasivos 31

3.2.5 Cuadro comparativo de los métodos de caracterización no invasiva para baterías Li-ion 33

3.2 Desarrollo del prototipo. 35

3.2.1 Consideraciones iniciales y especificaciones técnicas 35

3.2.2 Selección de componentes electrónicos y de control 36

3.2.3 Implementación del Prototipo de Descargas Múltiple 38

3.2.4 Implementación del banco de resistencia 44

3.2.5 Pruebas Iniciales y Verificación de Funcionamiento 46

3.2.6 Matriz de operacionalización de variables 49

3.2.7 Materiales, equipos y software empleados 50

RESULTADOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL 52

4.1 Resultados experimentales de las pruebas 53

4.1.1 Prueba de descarga al 10% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 53

4.1.2 Prueba de descarga al 15% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 55

4.1.3 Prueba de descarga al 25% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 56

4.1.4 Prueba de descarga al 30% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 58

4.1.5 Prueba de descarga al 45% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 59

4.1.6 Prueba de descarga al 50% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 60

4.1.7 Prueba de descarga al 60% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 62

4.1.8 Prueba de descarga al 65% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 63

4.1.9 Prueba de descarga al 100% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 65

4.1.10 Prueba de descarga al 120% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 66

4.1.11 Prueba de descarga al 150% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 67

4.1.12 Prueba de descarga al 200% de la capacidad nominal (2.6 Ah) 69

4.2 Análisis comparativo global de las pruebas 71

4.2.1 Comparativa de la capacidad descargada (Ah) 71

4.2.2 Comparativa del Estado de Descarga (SoD) 72

4.2.3 Análisis térmico comparativo 74

Conclusiones 77

Recomendaciones 78

Referencias bibliográficas. 79

Anexos 88

Anexo A. Diagrama de conexión – Prototipo de descargas múltiple 88

Anexo B. Código Arduino 89

Anexo C. Código App Designer - Matlab 98

Anexo D. Especificaciones de batería Li-ion ICR18650-26J M..... 114

Cronograma de actividades 115

Recursos y presupuesto 116

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Composición interna de una batería Li-ion 11
Figura 2 Metodología del proyecto 24
Figura 3 Circuito experimental del prototipo de descargas múltiple 39
Figura 4 Recepción de datos en Arduino IDE 39
Figura 5 Diseño del aplicativo para el prototipo 41
Figura 6 Flujograma del prototipo 42
Figura 7 Diseño de caja protectora del prototipo 43
Figura 8 Diseño PCB del circuito del prototipo 43
Figura 9 Implementación del prototipo en la caja protectora 44
Figura 10 Diseño de caja protectora del banco de resistencias 45
Figura 11 Implementación del banco de resistencia en la caja protectora 46
Figura 12 Puesta en marcha del prototipo 46
Figura 13 Curva de descarga de voltaje y corriente a una tasa de descarga del 45%. .. 47
Figura 14 Temperatura de la batería y ambiente a una tasa de descarga del 45%. 47
Figura 15 Curva de descarga de voltaje y corriente a una tasa de descarga del 50%. .. 48
Figura 16 Temperatura de la batería y ambiente a una tasa de descarga del 50%. 48
Figura 17 Curvas Voltaje vs Capacidad (Ah) Fuente: [72] 53
Figura 18 Resultados al 10% de la capacidad nominal 54
Figura 19 Resultados al 15% de la capacidad nominal 55
Figura 20 Resultados al 25% de la capacidad nominal 57
Figura 21 Resultados al 30% de la capacidad nominal 58
Figura 22 Resultados al 45% de la capacidad nominal 59
Figura 23 Resultados al 50% de la capacidad nominal 61
Figura 24 Resultados al 60% de la capacidad nominal 62
Figura 25 Resultados al 65% de la capacidad nominal 64
Figura 26 Resultados al 100% de la capacidad nominal 65
Figura 27 Resultados al 120% de la capacidad nominal 66
Figura 28 Resultados al 150% de la capacidad nominal 68
Figura 29 Resultados al 200% de la capacidad nominal 69
Figura 30 Curvas de capacidad (Ah) a distintas tasas de descarga 71
Figura 31 Curvas Voltaje vs SoD para distintas tasas de descarga 73

Figura 32 Curvas de temperatura vs tiempo para distintas tasas de descarga 74

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cuadro comparativo baterías Li-ion 19

Tabla 2 Cuadro comparativo de los métodos de caracterización no invasiva para baterías Li-ion. 33

Tabla 3 Componentes electrónicos y de control utilizados en el prototipo 37

Tabla 4 Tasas de descarga 45

Tabla 5 Matriz de operacionalización de variables 49

Tabla 6 Materiales, equipos y software a emplear en la investigación. 50

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular desarrolla el diseño e implementación de un prototipo de descargas múltiples para la caracterización simultánea de hasta tres baterías Li-ion tipo 18650. La investigación surge ante la necesidad de disponer de herramientas accesibles para evaluar el estado de las baterías en aplicaciones de almacenamiento energético y su posible reutilización. El sistema integra un microcontrolador Arduino Mega para la adquisición de datos y una interfaz gráfica en MATLAB/App Designer, permitiendo la visualización y almacenamiento en tiempo real de parámetros como voltaje, corriente y temperatura. La metodología adoptó un enfoque descriptivo–experimental, realizando pruebas de descarga controlada en un rango del 10% al 200% de la capacidad nominal. Los resultados evidencian una alta concordancia con la curva de referencia técnica, validando la precisión y confiabilidad del prototipo. Asimismo, se identificó una relación directa entre la tasa de descarga y el incremento térmico, alcanzando hasta 50 °C en condiciones de máxima exigencia, lo que posiciona al monitoreo térmico como un indicador relevante del Estado de Salud (SoH). En conjunto, el dispositivo se consolida como una herramienta de diagnóstico no invasiva, técnica y económicamente viable, que establece una base sólida para estudios futuros sobre vida útil remanente y aplicaciones de segunda vida.

Palabras clave:

Baterías de Li-ion, Caracterización, Descargas múltiples, Estado de Salud (SoH), Monitoreo térmico, Prototipo.

ABSTRACT

This curricular integration project presents the design and implementation of a multi-channel discharge prototype for the simultaneous characterization of up to three 18650 lithium-ion batteries. The research arises from the need for accessible tools to evaluate battery status in energy storage applications and their potential repurposing. The system integrates an Arduino Mega microcontroller for data acquisition and a graphical interface in MATLAB/App Designer, enabling real-time visualization and storage of parameters such as voltage, current, and temperature. The methodology adopted a descriptive-experimental approach, conducting controlled discharge tests ranging from 10% to 200% of the nominal capacity. The results show high consistency with the technical reference curve, validating the precision and reliability of the prototype. Furthermore, a direct relationship was identified between the discharge rate and thermal increase, reaching up to 50°C under maximum demand conditions, which positions thermal monitoring as a relevant indicator of the State of Health (SoH). Overall, the device stands as a non-invasive, technically and economically viable diagnostic tool that establishes a solid foundation for future studies on Remaining Useful Life (RUL) and second-life applications.

Keywords:

Lithium-ion batteries, Characterization, Multi-channel discharge, State of Health (SoH), Thermal monitoring.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Tema

Implementación de un prototipo de descargas múltiples para caracterización de baterías Li-ion.

El problema

1.1 Problema de investigación.

1.1.1 Problemática a investigar.

La creciente demanda de baterías Li-ion impulsada por su adopción en sectores de movilidad eléctrica, almacenamiento de energías renovables, entre otros ha planteado desafíos significativos con relación a su rendimiento, seguridad y vida útil. A pesar de que estas baterías son conocidas por su alta densidad energética y eficiencia, su capacidad se ve afectada por la degradación de uso, variaciones ambientales, así como también condiciones extremas de carga y descarga de las mismas, provocando una reducción en su rendimiento, durabilidad y eficiencia en diferentes aplicaciones. Además, la proliferación de baterías de baja calidad que no cumplen con estándares de seguridad ha generado un incremento en los riesgos de fallos asociados a ellas como sobrecalentamientos o incendios, lo que pone en peligro tanto a los sistemas, dispositivos, como a usuarios finales.

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación

¿Qué se requiere para implementar un prototipo de descargas múltiples que permita caracterizar de forma no invasiva el comportamiento de las baterías de Li-ion?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general.

Implementar un prototipo de descarga múltiple para la caracterización de baterías de Li-ion mediante la utilización de un sistema embebido.

1.2.2 Objetivos específicos.

Describir los diferentes tipos de baterías de Li-ion y sus aplicaciones.

Analizar los métodos de caracterización no invasiva para baterías de Li-ion.

Implementar un prototipo de descargas múltiple para la caracterización de baterías Li-ion.

1.3 Alcance y delimitación

El objetivo principal del trabajo de integración curricular es implementar un prototipo de descargas múltiples para la caracterización de baterías de Li-ion, para ello, se comenzará con una fase de investigación que incluirá el análisis de los principales tipos de baterías de Li-ion utilizadas en aplicaciones actuales, este análisis permitiría identificar sus características clave, ventajas, limitaciones y aplicaciones típicas de las mismas. Además, se investigará los métodos de caracterización no invasiva utilizados en baterías, como lo son la espectroscopia de impedancia y la capacidad incremental junto con el voltaje diferencial, evaluando sus ventajas y limitaciones para seleccionar el método más adecuado para el prototipo.

Posteriormente, se procederá con el diseño e implementación del prototipo, el cual estará compuesto por convertidores Buck-boost, responsables de manejar las descargas controladas dentro de un rango de 0V a 5V, bancos de resistencias para simular diferentes condiciones de descarga, y sensores de voltaje, corriente y temperatura, para monitorear en tiempo real el comportamiento de las baterías. El prototipo permitirá caracterizar hasta tres baterías de Li-ion de manera simultánea, facilitando un análisis más eficiente y versátil. El control del prototipo estará a cargo de un sistema embebido basado en la plataforma de Arduino, el cual será el encargado de la recepción de datos por parte de los sensores, y mediante una comunicación con el software MATLAB permitirá el almacenamiento de datos y a su vez con una programación en el software, generar una interfaz para la representación del comportamiento mediante gráficas en tiempo real.

Una vez construido el prototipo, se desarrollarán pruebas con baterías de Li-ion de 3.7V 2,600 mAh, aplicando distintas tasas de descarga correspondientes al 200%, 100%, 50% y 25% de su corriente nominal. Estas pruebas se desarrollarán con el fin de analizar su comportamiento bajo diferentes escenarios de usos típicos e intensivos.

Finalmente, se documentarán los resultados obtenidos y se ajustará el prototipo según sea necesario para optimizar su diseño. Este trabajo de integración curricular no solo busca implementar un prototipo funcional para la caracterización de baterías, sino que también la aportación al entendimiento del comportamiento de las baterías de Li-ion ante diversas condiciones.

1.4 Justificación

El presente trabajo de integración curricular se justifica por la necesidad de implementar un prototipo que permita caracterizar el comportamiento de baterías de Li-ion bajo diferentes condiciones de descarga, simulando posibles condiciones de uso, ofreciendo una herramienta para analizar el comportamiento de las baterías en diferentes aplicaciones, como lo pueden ser: en movilidad eléctrica, sistemas de almacenamiento de energías renovables, electrónica de consumo, aviación y exploración espacial, entre otros, radicando su importancia en la creciente demanda de las baterías de Li-ion, logrando una optimización en su rendimiento y también prolongar la vida útil de las mismas. Además de ello, contribuirá a identificar baterías de baja calidad, reduciendo los riesgos asociados a ellas, por lo tanto, el trabajo de integración no solo aporta a un mejor entendimiento del comportamiento de las baterías, sino que también promueve soluciones más seguras y eficientes para aplicaciones actuales y futuras.

El proyecto es técnicamente viable, ya que dentro del mercado nacional se cuenta con las herramientas, materiales y tecnologías necesarias para el desarrollo del prototipado. Además, los costos económicos se mantienen bajos debido a que el enfoque principal del trabajo es desarrollar un prototipo funcional. Asimismo, el tiempo estimado para la ejecución del proyecto, menor a ocho meses, es suficiente para cumplir con los objetivos propuestos.

Los beneficiarios directos serán la comunidad de docentes y estudiantes de la carrera de Electricidad, quienes utilizarán el módulo como herramienta formativa. Además, también beneficiará a investigadores interesados en el estudio de baterías, fomentando la generación de conocimiento en este campo tecnológico.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En el panorama energético actual, el litio, conocido también como "Petróleo blanco", se ha consolidado como un recurso estratégico debido a su versatilidad y múltiples aplicaciones, este elemento juega un papel esencial en la transición hacia tecnologías más limpias y sostenibles, particularmente en la fabricación de baterías de Li-ion. Estas baterías han ganado popularidad gracias a su alta densidad energética y su capacidad para almacenar y liberar energía de manera eficiente, lo que las convierte en la opción preferida para transporte eléctrico y los sistemas de almacenamiento de energías renovables, estos sectores, como otros, impulsados por la necesidad de soluciones más sostenibles, han sido determinantes en el aumento constante de la demanda de litio, lo que a su vez ha generado un incremento significativo en la demanda de baterías de Li-ion a nivel global [1].

En el marco de la transición hacia un modelo energético sostenible global, las baterías de Li-ion se posicionan como una tecnología prometedora por sus numerosas ventajas, sin embargo, con el uso, su rendimiento disminuye, especialmente en términos de capacidad y aumento de impedancia, para evaluar esta degradación, se emplean técnicas de caracterización que cuantifican su desempeño mediante parámetros clave, permitiendo analizar el comportamiento de la batería ante distintos ciclos de descarga y variaciones ambientales. Entre las metodologías no invasivas investigadas, destacan la espectroscopia de impedancia electroquímica y el análisis de capacidad incremental junto con el análisis de voltaje diferencial, ya que proporcionan un amplio rango de información sobre el estado interno de la batería sin intervenirla directamente. Los resultados obtenidos muestran que el aumento de la corriente de descarga reduce la capacidad de la batería de manera casi lineal, por el contrario, si la capacidad aumenta en función de la corriente, se añade una tensión constante al final de la descarga, por otro lado, las velocidades de descarga inferiores a la nominal evitan el autocalentamiento de las baterías, lo que permite una medición más precisa de la capacidad [2].

La creciente demanda global de sistemas de almacenamiento de energía, impulsada por la alta densidad y capacidad de las baterías de Li-ion, han promovido su uso en aplicaciones industriales, movilidad eléctrica, electrónica de consumo, entre otros. No

obstante, esta creciente demanda ha generado desafíos en cuanto a la seguridad y estabilidad operativa de las baterías, especialmente bajo condiciones extremas o de abuso, uno de los relevantes y en relación a accidentes es la fuga térmica, la cual ocurre cuando las celdas de la batería están expuesta a temperaturas elevadas, voltajes extremos o daños físicos, el cual desencadena reacciones químicas descontroladas que generan un calor continuo, superando la capacidad del sistema para poder disiparlo, este fenómeno es conocido como descontrol térmico, el cual representa un riesgo significativo. Para mitigar este riesgo como otros, se han desarrollado mecanismos de seguridad y pruebas de abuso las cuales incluyen condiciones de abuso eléctrico como sobrecarga o descargas forzadas; abuso térmico, mediante la exposición a temperaturas extremas, y el abuso mecánico, como lo es la penetración de clavos o colisiones, lo que permite evaluar el comportamiento de las celdas bajo estrés. Los resultados de estas pruebas demuestran que los abusos térmicos o eléctricos son los más frecuentes en relación con accidentes reportados, lo cual ha llevado que las baterías de litio en general deban cumplir con estándares de seguridad internacionales, tales como los de Underwriters Laboratories (UL), Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), Society of Automotive Engineers (SAE), entre otros, los cuales se actualizan constantemente para garantizar la seguridad antes de su comercialización. A pesar de que se ha logrado avances en el desarrollo de materiales y tecnologías de control térmico, se destaca la necesidad de seguir optimizando los protocolos de prueba y reforzar los estándares, considerando los riesgos específicos de cada aplicación a la que va destinada las baterías [3].

De acuerdo con un estudio de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, entre 2013 y 2020 se registraron más de 240 incendios relacionados con baterías de Li-ion solo en el sistema de gestión de residuos, siendo la causa más común la sobrecarga de las baterías. El uso de cigarrillos electrónicos, hoverboards con baterías falsificadas, baterías en aviones y dispositivos electrónicos, son otros ejemplos de incidentes relacionados a baterías de Li-ion, estos han resultado en lesiones, pérdidas monetarias y respuestas de emergencia, lo que ha resaltado el riesgo inherente de las baterías de baja calidad, dando como consecuencia, que la fama de las baterías de Li-ion se ha visto afectada y, por ende, varias agencias han establecido límites y advertencias sobre el uso de estas baterías, con el fin de garantizar que los productos que entren al

mercado cumplan con estándares de seguridad y protejan a los consumidores de productos defectuosos o falsificados [4]

El estudio sobre la caracterización de baterías de litio para aplicaciones de alta potencia resalta la creciente demanda de estas tecnologías en sectores que requieren alta energía como potencia, por ende, para maximizar el rendimiento de las baterías, se emplean técnicas avanzadas, como la descarga pulsada, el cual analiza el comportamiento de las baterías bajo condiciones extremas. La investigación demuestra que, al aplicar perfiles de descarga pulsada con diferentes tasas de corriente y temperatura, es posible ampliar el rango operativo de las baterías y extraer hasta tres veces más potencia nominal de las baterías, estas pruebas se realizaron en baterías LG18650 basadas en óxido de níquel, manganeso y cobalto (NMC) mostrando como resultado que este método permite alcanzar hasta 60,000 pulsos con una potencia media de 200 W por pulso, no obstante, se observó una disminución considerable en la vida útil de las baterías, del 25% al 75% en comparación con el uso estándar, debido principalmente a la degradación de la interfaz de electrolito sólido y al aumento de la resistencia interna como resultado de las altas corrientes de descarga. Estos hallazgos no solo proporcionan información clave sobre el comportamiento de las baterías en aplicaciones de alta demanda, sino que también guían el desarrollo de nuevas generaciones de baterías con mayor capacidad y rendimiento, además, que permiten abordar desafíos como el envejecimiento acelerado, la seguridad y los costos para aplicaciones de alta potencia, promoviendo así la creación de soluciones más eficientes y sostenibles [5]

2.2 Introducción a las Baterías de Li-ion en el Campo Energético

Las baterías han formado parte de nuestra vida durante más de un siglo, desempeñando un papel clave en aplicaciones que van desde calculadoras científicas hasta vehículos eléctricos, robots y satélites. A lo largo del tiempo, se han desarrollado distintos tipos de baterías con el objetivo de optimizar su rendimiento. Actualmente, las baterías de iones de litio son las más utilizadas, destacándose por su alta densidad y elevada eficiencia energética y larga vida útil.

2.3 Importancia de las baterías en la transición energética

El aumento en la demanda energética debido al crecimiento económico y poblacional ha llevado al desarrollo de tecnologías avanzadas de almacenamiento de energía electroquímica (EES) [6]. Estas tecnologías son fundamentales para reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero, con un consumo global de energía que se espera se duplique para 2050, es crucial diseñar sistemas de EES sostenibles que utilicen materiales abundantes, procesos respetuosos con el medio ambiente y análisis de ciclo de vida [7]

Las baterías, como forma de almacenamiento de energía, no solo son esenciales para dispositivos pequeños como herramientas eléctricas y electrónica portátil, sino también para aplicaciones de mayor escala, como vehículos eléctricos y la estabilización de redes eléctricas al integrar fuentes renovables como la solar y eólica. [7].

Desde la invención de la primera batería electroquímica por Alessandro Volta en 1800, se han logrado avances notables en diversas tecnologías de baterías, abarcando desde celdas primarias de electrolito acuoso como las de zinc-carbono, hasta las baterías recargables de litio [8]. Las baterías, como sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (EES), deben ser capaces de funcionar en tiempos que varían desde fracciones de segundo hasta varias horas [7]. Aunque existen alternativas de almacenamiento como los capacitores para tiempos de respuesta rápidos, así como opciones de almacenamiento mecánico, térmico y químico para tiempos más largos [6], las baterías siguen siendo la opción preferida en aplicaciones como vehículos y dispositivos personales debido a su capacidad para satisfacer las demandas de densidad de energía y su versatilidad.

2.4 Ventajas y desafíos de las baterías en aplicaciones modernas

En 1976, M.S. Whittingham propuso el uso de sulfuro de titanio (TiS_2) como cátodo para las primeras baterías recargables de litio [9]. Como se describe en [6], el grupo de J.B. Goodenough perfeccionó los diseños iniciales al introducir cátodos de óxidos metálicos que operaban a 4 V, en donde reemplazó Na con Li y propuso LiCoO2 como un nuevo cátodo (3.9 V vs. Li+/Li) [10]. En 1991, Sony marcó un hito en la historia de las baterías al lanzar las primeras baterías de iones de litio comerciales. Este avance fue posible gracias al desarrollo de un ánodo más seguro, diseñado para mitigar los riesgos relacionados con el uso de litio metálico [7].

El mercado global de baterías ha mostrado un crecimiento significativo en los últimos años. Se estima que el tamaño del mercado alcanzó los USD 134.622,4 millones en 2024 y se proyecta que crezca a una tasa compuesta anual (CAGR) del 16,4% entre 2025 y 2030 [11]. La demanda de baterías de iones de litio se espera que crezca aproximadamente un 33% anual, alcanzando alrededor de 4,7 gigavatio-hora (GWh) para 2030.comparable a la de todas las aplicaciones actuales [12], [13].

2.5 Clasificación General de Baterías

Las baterías desempeñan un papel crucial en el almacenamiento de energía, y su clasificación se basa en la composición química y las aplicaciones específicas. A continuación, se detallan algunas de las principales tecnologías de baterías:

2.5.1 Baterías de plomo-ácido

Las baterías de plomo-ácido son una de las tecnologías más antiguas y ampliamente utilizadas para el almacenamiento de energía. Consisten en placas de plomo y dióxido de plomo sumergidas en una solución de ácido sulfúrico, lo que produce una reacción electroquímica que almacena y libera energía, además constituyen el 85% de la demanda mundial de plomo refinado [14], gran parte de del material usado es proveniente de plomo reciclado y su fuente principal son baterías recicladas de plomo [14].

Son conocidas por su robustez y capacidad para suministrar altas corrientes de arranque ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones, sistemas automotrices, sistemas de energía de respaldo y aplicaciones industriales [15], [16]. Además, se emplean en sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) para proporcionar energía durante cortes eléctricos [17].

2.5.2 Baterías de níquel-cadmio

En la tecnología alcalina se incluyen las baterías de níquel-cadmio, las cuales utilizan hidróxido de potasio como electrolito [18]. Están constituidas por dos electrodos: uno positivo elaborado con hidróxido de níquel y otro negativo compuesto de cadmio metálico [19], [20]. Como resultado de su proceso de fabricación, estas baterías son capaces de operar a bajas temperaturas y pueden ser selladas herméticamente, lo que representa una ventaja significativa dado el carácter tóxico de sus componentes [21].

El mayor desafío de las baterías de níquel-cadmio es su elevado costo, derivado de un proceso de fabricación complejo y costoso [19]. A esto se suma un problema crítico: el cadmio, un metal pesado y altamente tóxico, plantea serias preocupaciones ambientales respecto a su manejo y eliminación adecuados [22]. Además, presentan un inconveniente conocido como "efecto memoria", el cual impide que alcancen una carga completa si no se han descargado completamente en ciclos previos [23].

2.5.3 Baterías de níquel-hidruro metálico

A pesar de los avances en las tecnologías basadas en litio, las baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH) siguen siendo fundamentales en una amplia variedad de aplicaciones. Estas baterías se utilizan en bicicletas eléctricas asistidas, herramientas eléctricas y vehículos híbridos eléctricos (HEV)[24], debido a su rendimiento, costo, vida útil y seguridad [25]. Un ejemplo destacado de su uso es la batería de alta capacidad Ni-MH, GIGACELL, desarrollada por Kawasaki Heavy Industries (KHI) en Japón.

En cuanto al rendimiento de las baterías, los electrodos de hidróxido de níquel tipo fibra, desarrollados por Takasaki y el equipo de Kawasaki Heavy Industries, han demostrado una destacada capacidad de descarga y una vida útil prolongada en ciclos [26]. No obstante, aún existen limitaciones, como la degradación de los electrodos y la expansión volumétrica, que afectan el rendimiento del material activo Ni(OH)2 [24]. En este sentido, se continúan realizando investigaciones orientadas a perfeccionar la tecnología de las baterías Ni-MH mediante la incorporación de aditivos como aluminio, cobalto y manganeso, con el objetivo de mejorar su estabilidad y eficiencia [26].

2.5.4 Baterías de Li-ion

Las baterías de litio poseen una trayectoria de desarrollo de más de 60 años, aunque sus versiones recargables inicialmente no lograron comercializarse debido a problemas de seguridad [27]. Los sistemas recargables permitieron que las baterías de ion de litio, que empleaban ánodos de grafito y cátodos de óxidos o fosfatos metálicos, se consolidaran en el mercado clave como la electrónica de consumo y los vehículos eléctricos [27]. Sin embargo, el litio metálico, gracias a su baja densidad y alta capacidad energética, tiene el potencial de superar significativamente la densidad energética de las baterías actuales.

Las baterías de iones de litio operan mediante un flujo reversible de iones entre dos electrodos: el ánodo y el cátodo, los cuales están sumergidos en un electrolito y separados por una membrana [28].

La selección de los materiales para el ánodo y el cátodo desempeña un papel fundamental en el rendimiento de una batería. Para el ánodo, se priorizan materiales que ofrezcan alta eficiencia como agentes reductores, buena conductividad eléctrica, estabilidad, bajo costo y facilidad de fabricación. En cuanto al cátodo, se eligen materiales que actúen como agentes oxidantes efectivos, que sean estables al interactuar con el electrolito y que puedan operar de manera confiable dentro del rango de voltaje de trabajo [29].

Según Carrillo [8], las baterías de iones de litio tienen aplicaciones clave en transporte, redes eléctricas y electrónica portátil. En transporte, destacan en vehículos eléctricos por su alta densidad energética, aunque enfrentan retos de costo, vida útil y desempeño en frío. En redes eléctricas, estabilizan fuentes renovables al almacenar energía durante picos y liberarla en alta demanda. En electrónica portátil, su compacta capacidad energética lidera el mercado, pero el crecimiento de las demandas energéticas impulsa la búsqueda de materiales más eficientes. Por otro lado [30], el mercado global de baterías de iones de litio se estima en USD 56.800 millones en 2023, con una proyección de crecimiento a USD 187.100 millones para 2032, lo que representa una CAGR del 14,2% durante el período 2023-2032.

A medida que las tecnologías de baterías avanzan, diversas investigaciones se centran en superar los desafíos técnicos y mejorar las capacidades de almacenamiento y carga. En este contexto, se exploran múltiples enfoques, desde materiales de electrodos innovadores hasta nuevas estrategias de diseño, que permiten optimizar el rendimiento de las baterías de iones de litio.

2.6 Composición interna de baterías Li-ion

La estructura esencial de las baterías ion de litio es la misma proporcionada por Alessandro Volta, quien invento la primera batería en 1800, formada por pilas de discos de cobre (cátodo) y zinc (ánodo) separados por una tela (separador) empapada en agua salada (electrolito) [31], dicho esto, a través de la Figura 1 se observa de manera grafica la composición interna de una batería de Li-ion convencional.

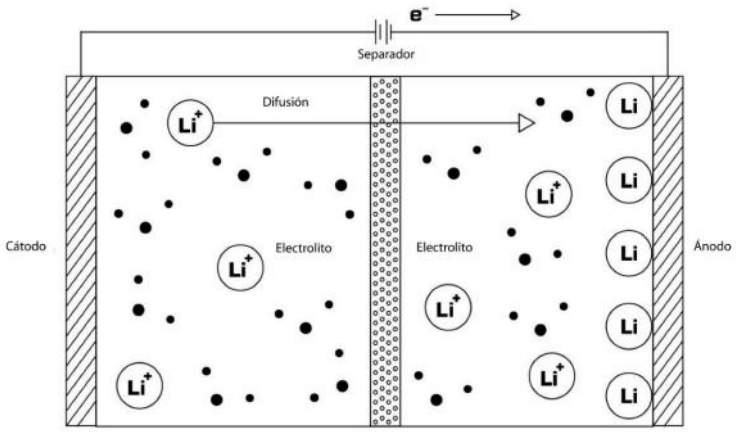


Figura 1 Composición interna de una batería Li-ion

Fuente: [32]

Estas baterías constan de un ánodo (terminal negativo), un cátodo (terminal positivo), un separador y un electrolito, como se mencionó, las cuales presentan dos comportamientos característicos, uno durante el proceso de carga, donde los iones de litio se mueven desde el cátodo hacia el ánodo a través del electrolito, donde se almacenan en el material del ánodo. Simultáneamente, los electrones fluyen desde el cátodo al ánodo a través de un circuito externo, impulsados por la energía suministrada por un cargador. Durante el proceso de descarga, el proceso se invierte: los iones de litio regresan al cátodo a través del electrolito, mientras los electrones fluyen desde el ánodo al cátodo a través de un circuito externo, generando electricidad para alimentar los dispositivos [33]

La ciencia atrás de los materiales utilizados para la creación de las baterías Li-ion seguirá avanzando, haciendo uso de nuevos materiales en el ánodo, cátodo y el separador con el fin de mejorar el rendimiento de las baterías.

2.6.1 Ánodo

El ánodo es uno de los principales componentes de la batería, el cual cumple la función de permitir el flujo de corriente eléctrica a través de un circuito externo, el cual se encuentra compuesto por un material activo y un aditivo conductor [34]. Existen varios materiales activos del que puede ser compuesto el ánodo, uno de los más comunes es el grafito, debido a su estructura estable, baja reactancia como gran capacidad para almacenar iones de litio de manera efectiva, a pesar de ello, existen varios materiales además del grafito usados para el ánodo [35].

Los ánodos de carbono, como el grafito, destacan por su estabilidad térmica, química y electroquímica, siendo adoptados desde la década de 1980 debido a su capacidad de intercalar y desintercalar iones de litio, además de prevenir la formación de dendritas que afectan la seguridad y el rendimiento de las baterías. Los carbonos duros ofrecen mayor capacidad de almacenamiento y mejor desempeño a altas velocidades gracias a su estructura porosa, aunque enfrentan limitaciones en condiciones extremas [35], [36], [37], [38], [39]. Por otro lado, los ánodos de aleación, como silicio, germanio y estaño, ofrecen capacidades superiores y mayor densidad energética, aunque enfrentan desafíos como expansión de volumen y baja conductividad, mitigados mediante recubrimientos de carbono y mezclas con metales inactivos, posicionándolos como alternativas al grafito [35], [36], [40], [41]. Finalmente, los ánodos de óxidos de metales de transición (TMO) presentan alta capacidad y resistencia térmica, con materiales como el titanato de litio (LTO) que destaca por su estabilidad en ciclos rápidos, aunque con limitaciones en conductividad y eficiencia a altas velocidades. Otros TMO, como óxidos de hierro y manganeso, combinan alto potencial y bajo costo, pero su rendimiento aún limita su aplicación comercial [35], [42], [43].

2.6.2 Cátodo

El cátodo es el electrodo encargado de determinar tanto la capacidad como el voltaje de una batería, los materiales empleados en su construcción dependen del tipo de batería, ya sea de metal de litio o de iones de litio, el caso de estudio, centrado en las baterías de iones de litio, el cátodo cumple una función crucial al actuar como fuente de litio, ya que el electrodo negativo (ánodo), generalmente a base de carbono u otro material, el cual no contiene litio [34], [44].

Los materiales de cátodo en baterías de Li-ion presentan propiedades variadas según su composición química. Los óxidos metálicos como LiCoO2 destacan por su alta capacidad específica y voltaje, mejorando aún más su rendimiento mediante recubrimientos de óxidos como ZrO2, aunque el LiNiO2 ofrece mayor capacidad teórica ($170\ mAh/g^{-1}$) enfrenta desafíos de eficiencia por interferencias iónicas [22], [44]. Por su parte, los materiales de espinela como LiMn2O4 son económicos y muestran rápida intercalación de iones de litio, aunque su estabilidad se ve afectada a altas temperaturas, mejoras como dopaciones metálicas y sustituciones catiónicas potencian su rendimiento [31], [45].

Finalmente, los materiales polianiónicos como LiFePO4 y sus alternativas (LiMnPO4, LiCoPO4) son atractivos por su estructura estable y aplicaciones en alta potencia, aunque limitadas por su baja conductividad, lo que ha llevado a innovaciones como los silicatos (Li2MnSiO4) que destacan un mejor rendimiento electroquímico, mayor seguridad como y costos más bajos, destacándose sobre Li2FeSiO4 por su mayor potencial y capacidad. [45].

2.6.3 Electrolito

El electrolito en las baterías de iones de litio permite el movimiento de iones de litio entre el ánodo y el cátodo, compuesto por sales, disolventes y aditivos, donde las sales facilitan este transporte, su diseño garantiza alta conductividad iónica, permitiendo un flujo eficiente de iones, mientras bloquea el paso de electrones, asegurando un uso seguro y eficaz [34].

Estos electrolitos se clasifican en líquidos, semisólidos y sólidos. Los líquidos están compuestos por sales de litio, como LiBF4 o LiPF6, disueltas en carbonatos orgánicos como carbonato de etileno y carbonato de propileno, por otro lado, los semisólidos y sólidos se forman mediante sales de litio y polímeros de alto peso molecular, como óxidos de Garnet, LISICON, NASICON y sulfuro. Los electrolitos sólidos han sido investigados debido a su potencial para mejorar la seguridad y permitir el uso de cátodos de alto voltaje, gracias a sus propiedades avanzadas. Además, el desarrollo de nuevos electrolitos líquidos o sólidos con características específicas podría optimizar aún más la seguridad y el rendimiento de las baterías [35].

2.6.4 Separador

Las baterías Li-ion actuales usan separadores porosos hechos de polímeros como polietileno (PE) o polipropileno (PP) para evitar cortocircuitos, ubicados entre el ánodo y el cátodo, el separador, además de prevenir cortocircuitos, facilita el flujo de iones de litio, este cumple con la función de evitar el contacto directo entre ánodo y cátodo, permitir la migración de iones de litio sin dejar pasar electrones, y ser lo más posible delgado para optimizar la migración de iones, siendo estas propiedades del separador claves para el rendimiento de la batería [46].

Las baterías de Li-ion utilizan tres tipos de separadores: membranas microporosos, membranas compuestas y mezclas poliméricas, que pueden ser de una o varias capas, por un lado, los separadores multicapa son más robustos y estables térmica y mecánicamente que los de capa única, por otro lado los separadores microporosos, hechos principalmente de polímeros de poliolefinas como PE (Polietileno) o PP (Polipropileno), son los más comunes, aunque presentan desventajas como baja humectabilidad y estabilidad térmica limitada , lo que puede causar problemas de contracción y cortocircuitos, para ello, debido a las limitaciones presentadas, se han investigado materiales como óxido de etileno (PEO), la poliacrilonitrila (PAN), metacrilato de metilo (PMMA), fluoruro de vinilideno (PVDF) y fluoruro de vinilideno-co-hexafluoropropileno (PVDF- HFP), cada uno con sus propios beneficios y problemas, como baja resistencia mecánica o fuga de electrolitos [46], [47], [48].

2.7 Tipos de baterías Li-ion

Las baterías de iones de litio (Li-ion) son ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones debido a su alta densidad energética, larga vida útil y capacidad de carga rápida. Existen varios tipos de baterías Li-ion, que se diferencian por la composición química de sus electrodos y electrolitos, lo que influye en sus propiedades, rendimiento y aplicaciones específicas. En esta clasificación, se describirán los principales tipos de baterías Li-ion, según su composición química y mayormente comercializada.

2.7.1 LFP (Fosfato de Hierro-Litio, LiFePO4)

El fosfato de hierro-litio (LiFePO4) se ha consolidado como uno de los materiales de cátodo más prometedores para baterías de litio recargables debido a su combinación de propiedades deseables, entre sus principales ventajas están la seguridad, alta capacidad teórica de 170 mAhg^{-1} a densidades de corriente moderadas, un potencial estable de 3,5 V, y una excelente estabilidad térmica incluso en condiciones de alta temperatura, lo que le hace ideal para aplicaciones de baja potencia y de alta durabilidad [44].

Padhi, destacó que la inserción y extracción de iones de litio ocurre a través de un modelo bifásico, con un movimiento de la interfaz que influye directamente en el rendimiento del material, ofrece un excelente rendimiento de ciclo, pero factores como la temperatura elevada afectan negativamente la vida útil de las baterías, resaltando que la duración de la batería a 55 °C es siete veces menor que a temperatura ambiente, esto debido a la

formación de capas irreversibles de interfaz de electrolito sólido (SEI), que provocan pérdida de capacidad y degradación estructural [44].

El envejecimiento de las baterías LiFePO4 también se asocia con un aumento en el tamaño de las partículas y descomposición acelerada del electrolito a altas temperaturas, estudios realizados con técnicas TEM (Microscopía Electrónica de Transmisión) y HRTEM (Microscopía Electrónica de Transmisión de Alta Resolución), han demostrado que durante la litiación y deslitiación, la transformación entre las fases genera defectos y dislocaciones que afectan el rendimiento a largo plazo. Además, la conductividad electrónica intrínseca baja de LiFePO4 lo que ha llevado a la implementación de estrategias para mejorar su rendimiento electroquímico, como el recubrimiento con carbono, el dopaje con iones multivalentes y la optimización del tamaño de las partículas, por ejemplo, el recubrimiento de carbono mejora la conductividad, resultando en un material más eficiente [44]

Las características anteriormente mencionada lo han posicionado como un reemplazo potencial para baterías de plomo-ácido, especialmente en aplicaciones automotrices, donde cuatro celdas de LiFePO4 pueden emular el voltaje de una batería tradicional, sin embargo, su voltaje nominal de 3.2 V/celda y mayor autodescarga en comparación con otras químicas de iones de litio representan limitaciones a considerar, a pesar de ello, su resistencia a condiciones de carga completa y la posibilidad de incorporar controles electrónicos avanzados para mitigar problemas de equilibrio lo hacen una opción viable y segura en diversas aplicaciones [49].

2.7.2 NMC (Níquel-Manganeso-Cobalto, LiNiMnCoO2)

El óxido de níquel-manganeso-cobalto (NMC), representado por la fórmula química LiNiMnCoO2, es una solución innovadora dentro de la familia de óxidos mixtos de metales de transición, diseñada para superar las limitaciones de los óxidos individuales, como la baja estabilidad, seguridad y capacidad especifica, permitiendo optimizar la mezcla de cationes, particularmente en materiales como $LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$ (óxido de litio, níquel, cobalto y manganeso), han demostrado una capacidad específica destacable de $200\ mAh/g^{-1}$ al cargarse hasta 4,6 V. Una de las fortalezas del NMC radica en su adaptabilidad, ya que puede configurarse para ser eficiente tanto en celdas de energía como en celdas de potencia, por ejemplo, una celda NMC de tipo 18650 optimizada para

energía puede ofrecer una capacidad de 2800 mAh con una corriente de descarga entre 4A y 5A, en contraste, al configurarse para potencia específica, la capacidad se reduce a 2000 mAh, pero permite descargas continuas de hasta 20A, además el agregado de silicio al ánodo permite alcanzar capacidades superiores a 4000 mAh, aunque a costa de una vida útil más corta y estabilidad mecánica reducida debido a la expansión y contracción del ánodo durante los ciclos de carga y descarga [44].

La sinergia entre el níquel y el manganeso constituye el núcleo del éxito del NMC, mientras que el níquel proporciona alta energía específica, pero carece de estabilidad, el manganeso contribuye con una estructura de espinela que reduce la resistencia interna, aunque con menor energía específica, esta combinación logra compensar las deficiencias de cada metal, además, el cobalto, aunque costoso y limitado en su disponibilidad, estabiliza al níquel y contribuye a la consistencia del material [49].

El NMC es ampliamente utilizado en aplicaciones como herramientas eléctricas, bicicletas eléctricas y otros sistemas de propulsión eléctrica.

2.7.3 NCA (Níquel-Cobalto-Aluminio, LiNiCoAlO2)

El NCA (Níquel-Cobalto-Aluminio, LiNiCoAlO2) es una tecnología que se ha utilizado desde 1999 para aplicaciones especializadas, a diferencia de otros tipos de baterías, como la NMC, el NCA se caracteriza por una alta energía específica, una potencia específica razonablemente buena y una vida útil prolongada, lo que la hace adecuada para aplicaciones donde estas características son prioritarias. Una de las principales diferencias de la NCA con la NMC es que la adición de aluminio a la composición de níquel y cobalto mejora la estabilidad de la química de la batería, lo que la convierte en una opción más segura en comparación con otros compuestos, sin embargo, el NCA presenta algunos inconvenientes, como una menor seguridad y un costo elevado en comparación con otras alternativas, pero a pesar de estos desafíos, el NCA sigue siendo una tecnología importante en ciertas aplicaciones debido a su rendimiento superior [49].

Los NCA presentan desafíos frente a su sensibilidad térmica como uso del cobalto, se han desarrollado soluciones como lo pueden ser dopajes y recubrimiento con algún otro material para mejorar su estabilidad y rendimiento, por ejemplo, el dopaje con elementos como el circonio (Zr) para abordar la rápida descomposición de la capacidad, el dopaje

con este elemento aumenta la capacidad (225.9 mAh g^{-1}) y una retención de capacidad del 22.84% después de 100 ciclos a una tasa de descarga 50% menor a la nominal, mientras que el aluminio estabiliza su estructura logrando capacidades especificas entre 180 -200 mAhg^{-1}, una alta densidad de energía como una mayor vida útil mayor a 2000 ciclos. Además de las estrategias anteriormente mencionadas, el recubrimiento superficial también ha sido efectivo para mejorar la estabilidad de partículas de litio y protegerlas de la degradación del electrolito, dando como resultado que estas innovaciones resalten al NCA como un material prometedor al combinar alta densidad, rendimiento mejorado y mayor estabilidad [50].

2.7.4 LCO (Óxido de Cobalto-Litio, LiCoO2)

La batería LCO (óxido de litio y cobalto) son un hito significativo en la historia de las baterías recargables de iones de litio cuando fue comercializada por Sony en 1991, al incorporar un cátodo de LiCoO2 y un ánodo de carbono, lo que resultó en la primera batería recargable de iones de litio exitosa, este material es muy atractivo, ya que tiene una alta capacidad teórica de 274 mAhg^{-1} y una alta densidad de energía , lo que la hace adecuada para dispositivos como teléfonos móviles, computadoras portátiles y cámaras digitales , que requieren baterías compactas pero con una gran capacidad, a pesar de ello, el rendimiento del LiCoO2 se ve afectado por la inestabilidad estructural y térmica, especialmente a altos voltajes y temperaturas elevadas, provocando que la capacidad de la batería disminuya cuando se somete a ciclos profundos a altas tasas de corriente, lo que limita su vida útil [44].

Durante la carga y descarga de las baterías LiCoO2, se producen varias transiciones de fase, lo que permite que los iones de litio se muevan dentro y fuera de la estructura, las cuales son fundamentales para el comportamiento electroquímico de la batería, ya que permiten la transferencia de carga entre las fases de la estructura., sin embargo, el desvanecimiento de la capacidad a lo largo de los ciclos se ha asociado con la degradación estructural de la batería, en particular con los cambios en la covalencia de los enlaces Co-O (Oxigeno-cobalto), que resultan de la distorsión de la estructura a medida. que los iones de litio se desintercalan [44]. Un estudio de Jiang [51], observo que cuando el voltaje de corte se incrementa de 4.2 a 4.7 V, la concentración de litio disminuye

significativamente, lo que agrava la inestabilidad térmica y contribuye a la pérdida de capacidad.

Para mejorar el rendimiento de las baterías LiCoO2 , se han explorado varias estrategias, como el recubrimiento de superficies y el dopaje, los cuales buscan mitigar la degradación estructural y mejorar la estabilidad térmica, por un lado el recubrimiento con óxidos metálicos como AlO2 (Dióxido de aluminio) y ZrO2 (Dióxido de circonio) ha mostrado mejoras significativas en la retención de capacidad y capacidad de tasa a alto voltaje, esta química de recubrimiento ayuda a suprimir la disolución del cobalto en el electrolito, mejorando la difusión de cationes y previene la formación de fases estructurales no deseadas. Un ejemplo reciente es el LiCoO2 recubierto de AlO2 al 0.5%, muestra un rendimiento electroquímico mejorado, manteniendo el 82.6% de su capacidad inicial después de 20 ciclos a un voltaje de corte superior a 4.2 V [44].

A pesar de estas mejoras, el principal inconveniente del LiCoO2 sigue siendo su corta vida útil y su baja estabilidad térmica, lo que limita su uso en aplicaciones que requieren un rendimiento prolongado y estable a altas temperaturas y voltajes.

2.7.5 LMO (Óxido de Manganeso-Litio, LiMn2O4)

El óxido de manganeso-litio (LiMn2O4) es un material de almacenamiento energético muy destacado debido a sus características como bajo costo y una rápida intercalación y desintercalación reversible de iones de litio. A voltajes de 4V, los iones de litio se ubican en sitios tetraédricos, mientras que a 3V, ocupan sitios octaédricos, lo que provoca una transición de fase hacia Li2Mn2O4, este cambio en la estructura demuestra que el rendimiento electroquímico es mejor a 4V, aunque puede haber una presencia de Li2Mn2O4 en la superficie al final del ciclo de descarga, producto de sobre descarga, lo que puede resultar en la disolución de MnO (Oxido de manganeso) y la formación de Li2MnO3 (Trióxido de di litio-manganeso) en la superficie de la espinela [44].

Una limitación significativa del LiMn2O4 es su desvanecimiento de capacidad, especialmente a temperaturas elevadas como 55°C, lo que se debe a las transiciones de fase internas y la inestabilidad química con el electrolito, provocando la disolución de iones de Mn (Manganeso), un problema que se ha tratado mejorando la interfaz entre el electrodo y el electrolito mediante recubrimientos protectores que disminuyen el contacto

directo con el electrolito, estos recubrimientos, hechos de materiales como TiO2 (Dióxido de titanio), han demostrado mejorar el rendimiento incluso a temperaturas más altas, además, el dopaje con elementos como aluminio (Al), cobre (Co), cromo (Cr) y níquel (Ni) ha mejorado la estabilidad , aunque a costa de la capacidad inicial [44]. En términos de aplicaciones, las baterías de litio-manganeso ofrecen varias ventajas, entre las que se incluyen una alta estabilidad térmica y seguridad mejorada, lo que las hace ideal para herramientas eléctricas, instrumentos médicos y vehículos híbridos o eléctricos, destacando esta batería por su baja resistencia interna , permitiendo una carga rápida y una descarga de alta corriente, lo cual es crucial para las aplicaciones que requieren una alta potencia de descarga, a pesar de ello, su capacidad es aproximadamente un tercio menor que la de las baterías de litio-cobalto, limitando su uso para aplicaciones que no requieren una capacidad máxima. [49]

Aunque las baterías de litio-manganeso han tenido cierto éxito, la investigación se ha centrado en su combinación con otros metales activos como cobalto, níquel, manganeso y aluminio, con el fin de mejorar su energía y potencia específicas, buscando proporcionar soluciones más equilibradas que combinen alto rendimiento y larga vida útil, en especial para aplicaciones industriales que requieren tanto buenas capacidades de carga como una seguridad confiable.

2.7.6 Cuadro comparativo de los tipos de baterías Li-ion

Basándose en las diferentes ventajas y desventajas que poseen los diferentes tipos de baterías Li-ion, el desarrollo de un cuadro comparativo que explique de manera resumida y concisa características clave de cada batería Li-ion es necesaria, mediante la Tabla 1 se indican dichas comparaciones.

Tabla 1 Cuadro comparativo baterías Li-ion

Tipo de batería Li-ion	Oxido de litio y cobalto	Oxido de litio y manganeso	Oxido de litio, níquel y manganeso	Fosfato de hierro y litio	Óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio

Forma corta	Li-cobalto	Li-manganeso	NMC	Fosfato de litio	Li-aluminio o NCA
Abreviatura	LiCoO2	LiMn2O4	LiNiMnCoO2	LiFePO4	LiNiCoAlO2
Características	Alta energía, potencia limitada, carga rápida, alta conductividad electrónica	Alta potencia, menor capacidad, alta tolerancia térmica	Alto voltaje y capacidad	Alta potencia, baja capacidad, autodescarga elevada, ciclo de vida prolongado	Larga vida útil, alta energía y potencia especifica
Energía especificada	150–540 Wh kg^{-1}	100–150 Wh kg^{-1}	150–900 Wh kg^{-1}	90–160 Wh kg^{-1}	200-300 Wh kg^{-1}
Ciclo de vida	500–1000	300–700	1000–2000	1000–2000	>2000
Fuga térmica	150°C	250°C	210°C	270°C	150°C
Costo	Alto debido al precio del cobalto	Mediano	Medio alto	Bajo debido a la abundancia de hierro	Alto debido al contenido de cobalto
Seguridad	Bajo debido a su inestabilidad térmica y susceptancia a fugas térmicas	Buena debido a su impacto mínimo ambiental y buena	Buena debido su estabilidad térmica	Muy buena debido a su estabilidad térmica y química	Media debido a desafíos con costo y seguridad

		tolerancia térmica			
Embalaje típico	18650, celda prismática y de bolsa	Prismático	18650, celda prismática y de bolsa	26650, prismático	18650
Historia	1991	1996	2008	1996	1999
Aplicaciones	Teléfonos móviles, tabletas, portátiles, cámaras.	Herramientas eléctricas, dispositivos médicos, sistemas de propulsión	Bicicletas eléctricas, dispositivos médicos, vehículos eléctricos, industriales	Estacionario con altas corrientes y resistencia	Médico, industrial, vehículos eléctricos

2.8 Métodos de caracterización no invasiva en baterías Li-ion

La caracterización no invasiva de baterías Li-ion hace referencia al uso de técnicas que permitan evaluar el estado interno y el comportamiento de las baterías sin necesidad de intervenir su estructura física, logrando así analizar parámetros clave como: el estado de carga (SoC), el estado de salud (SoH), la resistencia interna, la capacidad de descarga, entre otros, todo esto manteniendo intacta la integridad funcional de las baterías[52].

La importancia de estos métodos radican en el rol importante que juegan en la transición energética global actual, debido a que son esenciales para aumentar el uso de energías renovables y reducir la dependencia a combustibles fósiles, al mismo tiempo, la complejidad interna de las baterías determinada por factores como: el diseño, materiales utilizados, condiciones operativas y las propias reacciones químicas internas, exigen que los métodos de evaluación no comprometan su funcionamiento ni su seguridad, por ende los métodos no invasivos han cobrado relevancia debido a que ofrecen diagnósticos precisos en tiempo real bajo condiciones reales de operación [52].

Entre los objetivos principales de los métodos no invasivos están: el monitoreo en tiempo real, el cual permite supervisar de manera continua el estado de las baterías durante su

uso; la detección temprana de fallas, siendo útil para prevenir incidentes; la optimización de rendimiento, siendo aquella que permite ajustar las condiciones operativas para extender su vida útil y por último, la facilitación de reciclaje y reutilización debido a que al momento de evaluar las baterías permiten determinar si tiene viabilidad para segundas aplicaciones después de su función primaria [52], [53].

Por otro lado, la implementación de estos métodos presenta desafíos importantes, entre ellos destacan la complejidad técnica para poder desarrollar métodos que sean más precisos sin intervenir el funcionamiento de las baterías; los altos costos asociados a la instrumentación avanzada para varios métodos logrando limitar su adopción masiva y por último, la variabilidad entre baterías, debido a que las diferencias en diseño y materiales utilizados influyen en la efectividad para caracterizar las baterías[53].

En definitiva, la caracterización no invasiva representa una estrategia clave para maximizar el aprovechamiento de baterías Li-ion a lo largo de todo su ciclo de vida, ya que permite reducir riesgos, mejorar su rendimiento en aplicaciones actuales y futuras, y promover su reutilización responsable en el marco de una economía más verde y eficiente. En este sentido, los métodos de caracterización no invasiva juegan un papel importante en la evaluación del estado y desempeño de las baterías a partir de variables eléctricas, térmicas y electroquímicas medidas externamente, por lo que a continuación se presenta la clasificación de los principales métodos utilizados para este tipo de análisis.

2.8.1 Test de capacidad

Los test de capacidad son una de las técnicas no invasivas más utilizadas para evaluar el rendimiento de baterías de Li-ion, esta consiste en someter la batería a ciclos de carga y descarga bajo condiciones controladas, generalmente mediante perfiles de corriente constante o corriente-voltaje constante (CC-CV), con el objetivo de determinar cuánta carga puede entregar o almacenar en un ciclo completo, siendo esta metodología ampliamente adoptada por su simplicidad, bajo costo y aplicabilidad tanto en investigación como en la industria [54].

2.8.2 Pruebas de voltaje de circuito abierto

Las pruebas de voltaje en circuito abierto (OCV) son clave para caracterizar el comportamiento termodinámico de baterías Li-ion, las cuales consisten en medir el voltaje de la celda en reposo, estableciendo una relación directa con su estado de carga (SoC) y permitiendo observar transiciones de fase en los materiales activos [54].

Existen dos enfoques principales: el método GITT y el pseudo-OCV. El método GITT aplica pulsos de corriente seguidos de reposos prolongados para alcanzar el equilibrio antes de medir, lo que proporciona resultados altamente precisos, sin embargo, debido a su duración que puede extenderse por días, su uso está limitado principalmente a estudios de laboratorio [54]. El método pseudo-OCV, consiste en descargar o cargar la celda a muy baja corriente por ejemplo C/25, promediando los valores de voltaje durante el proceso, la desventaja es que introduce errores por histéresis, pero su rapidez y simplicidad lo hacen útil para modelado de SoC en aplicaciones prácticas [54], [55].

2.8.3 IC/DV (Incremental Capacity / Differential Voltage)

Las curvas de capacidad incremental (IC) y voltaje diferencial (DV) permiten revelar con alta sensibilidad los procesos internos de una batería Li-ion, donde a partir de una descarga o carga lenta, se deriva la curva voltaje-capacidad para obtener dQ/dV (IC) o dV/dQ (DV), permitiendo detectar con precisión transiciones de fase, regiones de solución sólida y otras respuestas electroquímicas que no son visibles en curvas tradicionales [54], [55].

2.8.4 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)

La Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) es una técnica altamente sensible que permite estudiar el comportamiento interno de una batería Li-ion mediante la respuesta a una excitación eléctrica alterna, donde se aplica una señal de baja amplitud a través de un rango de frecuencias, y se mide la impedancia resultante, siendo representada comúnmente en un gráfico de Nyquist, donde se distinguen componentes resistivas y capacitivas del sistema [54].

CAPÍTULO III

MATERIALES Y METODOS

El presente capítulo presenta la metodología aplicada para el desarrollo e implementación de un prototipo de descargas múltiples orientado a la caracterización no invasiva de baterías Li-ion, por lo tanto, se describe el enfoque de investigación, los materiales y equipos a utilizar, como también los métodos técnicos de caracterización, además que se detallan las etapas de diseño, ensamblaje y pruebas del prototipo.

3.1 Enfoque y tipo de investigación

Para la elaboración del presente trabajo, fue necesario la implementación de una metodología que permita determinar técnicas y procesos que permitan contribuir al desarrollo del trabajo de manera ordenada y técnica.

El proceso llevado a cabo se dividió en las siguientes etapas como se indica en la Figura 2.

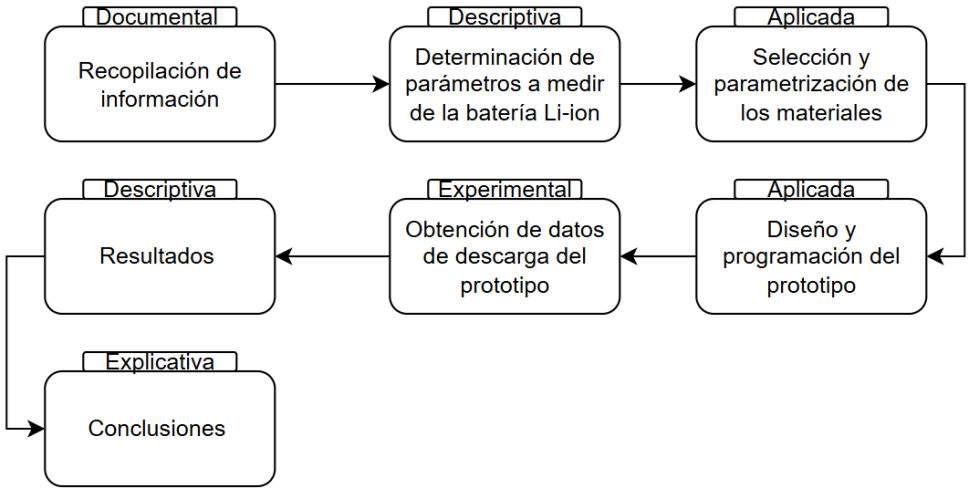


Figura 2 *Metodología del proyecto*

Como primer punto del presente trabajo, se llevó a cabo la parte de investigación en varias fuentes de consulta, tales como revistas, libros, artículos científicos, proyectos de grado, entre otros. A partir de la información recopilada, se seleccionaron los datos relevantes

en función de su relación directa con los tipos de baterías Li-ion, métodos de caracterización no invasiva como también su aporte al diseño y desarrollo del prototipo.

El objetivo principal del prototipo es llevar a cabo pruebas de descargas múltiples controladas sobre baterías Li-ion, utilizando un sistema embebido tipo Arduino que permita llevar el registro de valores de voltaje, corriente y temperatura durante el proceso, con ello, se busca obtener curvas de descarga que permitan caracterizar el comportamiento eléctrico de las baterías en diferentes condiciones y a partir de ellas, compararlas con las proporcionadas por el fabricante o estudios científicos que permitan validar su comportamiento.

Para el diseño del prototipo se consideró el uso de convertidores Buck-boost, permitiendo así mantener una tensión de descarga constante. Adicional, el sistema de descarga se complementa con un banco de resistencias con el fin de obtener diferentes niveles de corriente, logrando así desarrollar las descargas múltiples bajo diferentes cargas.

Posteriormente, se procedió con el diseño del circuito de control, el cual fue desarrollado mediante la plataforma de Arduino, siendo el encargado de supervisar el proceso de descarga de las baterías, registrando las mediciones de los sensores de voltaje, corriente y temperatura. Adicionalmente, se implementó una comunicación con el entorno de MATLAB, donde se almacenaron los datos y se graficaron en tiempo real mediante una aplicación visual para su posterior análisis.

En la etapa de implementación, se ensamblaron todos los componentes del prototipo: convertidores Buck-boost, banco de resistencias, sensores de voltaje, corriente y temperatura, fuente de carga para las baterías y el sistema embebido para la recepción y envío de información. A partir de ello, se desarrollaron pruebas de funcionamiento individuales para cada componente y para posteriormente su integración de todo el sistema.

Finalmente, se llevaron a cabo pruebas experiménteles con baterías Li-ion del tipo 18650 con capacidad de 2600 mAh, donde se aplicaron diferentes tasas de descarga para la recolección de datos de voltaje, corriente y temperatura. Las curvas obtenidas se utilizaron para evaluar el comportamiento de la batería con relación a las proporcionadas por el fabricante, permitiendo así su caracterización bajo distintas tasas de descarga.

3.2 Análisis de métodos de caracterización no invasiva

Considerando que existen técnicas no invasivas aplicables al diagnóstico de baterías, en el siguiente apartado se presenta un análisis comparativo de los métodos EIS, IC/DV, OCV y test de capacidad, evaluando sus niveles de precisión y exactitud, así como su viabilidad técnica y económica para procesos de caracterización y monitoreo de baterías Li-ion.

3.2.1 Análisis comparativo de precisión y exactitud

La EIS destaca por su precisión y exactitud en análisis de baterías, debido a su capacidad de descomponer la respuesta electroquímica en distintos elementos asociados a fenómenos internos como la resistencia de carga, la capacidad de doble capa o la impedancia difusa. [53], [54].

Asimismo, este enfoque detallado permite detectar de manera temprana señales de degradación como pueden ser la formación de capas resistivas (SEI), pérdida de conductividad o deterioro del electrolito, siendo estas claves para un modelado dinámico y preventivo del sistema [56].

Además, su alta sensibilidad la convierte en una técnica muy confiable para analizar a fondo el comportamiento interno de la batería, permitiendo medir incluso impedancias muy bajas con gran precisión. Sin embargo, factores como el ruido durante la medición, la calidad del modelo del circuito equivalente (ECM), costo de equipos especializados, entre otros, pueden afectar la exactitud de los resultados [57], [58].

A pesar de ello, la EIS sigue siendo una de las técnicas más valoradas, ya que puede soportar aplicaciones avanzadas como la estimación del SOH y la predicción de temperatura de la batería, siendo estas funciones esenciales para que los BMS operen de manera óptima y prolongue la vida útil del sistema [58].

Por otro lado, la técnica IC/DV se ha consolidado como una herramienta precisa para analizar la evolución interna de las baterías Li-ion. La exactitud en esta técnica depende de realizar las pruebas bajo condiciones controladas, utilizando corrientes bajas (C/25 o C/33) y aplicando un adecuado suavizado de datos para obtener curvas claras que permitan observar las transiciones de fases en los materiales activos para identificar

fenómenos de degradación como la pérdida de litio activo (LLI) o de material activo (LAM) [54], [55].

De igual forma, estas curvas son altamente sensibles a los cambios estructurales de la celda, de tal modo que desplazamientos, atenuaciones o desapariciones de picos pueden indicar alteraciones internas del sistema [59], [60].

En consecuencia, el análisis IC/DV se considera confiable para estimar el estado de salud (SoH), predecir la vida útil restante (RULL), caracterización detallada del estado de carga (SoC) y de la capacidad real de la batería [59], [60].

En conjunto, el análisis IC/DV, aunque sencillo en apariencia es una combinación poderosa de precisión y exactitud cuando se aplica con cuidado y su capacidad para representar con claridad las curvas de degradación lo convierten en una herramienta clave tanto en entornos de laboratorio como en aplicaciones reales de monitoreo continuo del estado de la batería.

Asimismo, las pruebas de voltaje en circuito abierto (OCV) son una técnica clave para caracterizar el SoC de la batería, cuya precisión y exactitud depende del enfoque aplicado, Por un lado el método GITT, que permite acercarse al voltaje de equilibrio real aplicando pequeños pulsos de corriente seguidos de largos periodos de reposo, logrando de esta manera una alta precisión aunque tiene el inconveniente que puede extenderse por más de 10 días por celda, lo que limita su uso a entornos donde el tiempo es un factor crítico [54].

Por otro lado, el método pseudo-OCV emplea descargas muy lentas (C/50 o menos), el cual permite la obtención de mediciones de manera más rápida sin pausas prolongadas, pero a costa de que su exactitud se ve afectada por la histéresis del voltaje, especialmente en celdas degradas, lo que puede introducir errores en la estimación del SoC y dificultar la evaluación del estado interno [54], [55].

Cabe destacar que la precisión en la medición OCV es esencial para el diseño y operación de sistemas de estimación del SoC, ya que muchos dependen de la curva OCV vs SoC como referencia, y si dentro de esta cuenta con errores por mediciones imprecisas o modelos mal calibrados pueden comprometer la confiabilidad del BMS, particularmente en vehículos eléctricos [54], [61].

Para superar estas limitaciones, se han desarrollado nuevas estrategias que buscan reducir los tiempos de prueba sin sacrificar la exactitud como es el uso de pulsos de corriente bipolar o modelos avanzados que incorporen parámetros dinámicos (temperatura y resistencia interna), con el objetivo de lograr un equilibrio entre rapidez y precisión en la estimación del SoC [62], [63], [64].

Por lo tanto, las pruebas OCV ofrecen un gran potencial en términos de precisión, pero su efectividad depende del método empleado: la técnica GITT garantiza alta exactitud a costo de tiempo, mientras que el pseudo OCV brinda mayor rapidez, aunque con una ligera perdida de precisión [54], [55].

Finalmente, las pruebas de capacidad son una herramienta fundamental para estimar el SoH de las baterías, ya que permiten observar la disminución de la capacidad útil con el tiempo. No obstante, su precisión es media debido a que son sensibles a los factores externos como la temperatura, la velocidad de descarga y las fluctuaciones de voltaje entre terminales, aunque puede mejorarse controlando las condiciones del entorno, como uso de cámaras térmicas, tasas de descarga estandarizadas como aplicar métodos de validación cruzada para asegurar resultados confiables [54], [65], [66].

A pesar de ello, se mantiene como una técnica ampliamente utilizada por su simplicidad y utilidad práctica ya que ofrece información directa sobre su capacidad efectiva, el cual es un indicador clave en el ciclo de vida de las baterías, cabe resaltar que, aunque no son exactos, resultan útiles para detectar tendencias de degradación y planificar mantenimientos o reemplazos [54].

3.2.2 Análisis de viabilidad técnica y económica

La Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) desde un punto de vista técnico ofrece una viabilidad alta debido a que ofrece información en tiempo real sin intervenir físicamente la celda, lo que la hace ideal tanto para laboratorios de investigación como para entornos prácticos. Además, su gran sensibilidad permite detectar mínimas variaciones electroquímicas, siendo muy útil para diagnósticos preventivos y la evaluación de baterías destinadas a una segunda vida [54], [67].

No obstante, su principal desventaja radica en la necesidad de equipos especializados, como analizadores de impedancia de alta frecuencia y sistemas de control térmico,

además de requerir personal con experiencia técnica para interpretar los datos y ajustar los modelos de circuitos equivalentes que representen con fidelidad el comportamiento de la celda [54].

En cuanto a la viabilidad económica, la EIS implica un alto costo inicial, tanto por el precio del equipo como la formación especializada del personal. Sin embargo, este gasto se considera como una inversión estratégica, ya que la información obtenida permite optimizar la vida útil de las baterías, evitar fallas prematuras y diseñar sistemas más eficientes, generando ahorros operativos a largo plazo [54], [68].

Además, en proyectos de segunda, la EIS cobra aun mayor relevancia al determinar con precisión que celdas mantienen potencial de usos, lo que facilita análisis tecno-económicos confiables [67].

Por otro lado, las técnicas IC/DV desde un punto de vista técnico, representa una viabilidad media ya que no requieren equipos sofisticados ni costosos, lo cual representa una ventaja en comparación a métodos más complejos como la EIS. Sin embargo, su correcta aplicación exige condiciones experimentales muy controladas, como descargas a baja velocidad, registros de datos de alta resolución y filtrado de ruido, además de conocimientos matemáticos y experiencia en procesamiento de datos para interpretar adecuadamente las curvas [54], [69].

En cuanto a viabilidad económica, las técnicas IC/DV ofrecen grandes ventajas, pues no dependen de quipos especializados y pueden implementarse con sistemas de adquisición de datos simples, siempre que garantices una buena resolución. Su principal valor radica en que permiten diagnosticar el envejecimiento de la batería y estimar con fiabilidad su tu vida útil, lo cual es especialmente útil en sectores donde el reemplazo de baterías implica costos altos, como los vehículos eléctricos y los sistemas de almacenamiento estacionario [54], [70].

Asimismo, facilitan la evaluación del estado real de las baterías para determinar su posible segunda vida útil ayudando a tomar decisiones técnicas y económicas más informadas, especialmente relevantes en el contexto de la electromovilidad sostenible donde se busca prolongar el ciclo de vida y reducir el impacto ambiental [69], [70].

De igual forma, las pruebas de voltaje en circuito abierto desde un punto de vista técnico son altamente viables, debido a que no requieren un equipo complejo: basta con un cargador o un sistema de adquisición de aplique corrientes bajas y registre el voltaje con precisión, lo que permite su fácil implementación en laboratorios, bancos de pruebas o sistemas BMS [54], [55].

Cabe resaltar que factores como la temperatura, el tiempo de reposo y el envejecimiento pueden afectar a la precisión, pero no obstante son muy útiles para diagnósticos iniciales o para clasificarlas baterías con potencial de segunda vida [68], [71].

Desde un punto económico, las pruebas OCV son accesibles y seguras ya que no necesitan equipos costosos ni intervenir directamente en la batería, lo que permite reducir riesgos de daño o degradación, aspectos clave en baterías de vehículos eléctricos o sistemas estacionaros [71].

Finalmente, los test de capacidad desde un punto de vista técnico son altamente viables, debido a que estos se pueden realizar con equipos convencionales de carga y descarga, los cuales no requieren conocimientos avanzados para su aplicación básica [54].

Además, su principal ventaja es que permite calcular la capacidad residual de la batería, el cual es un dato esencial para decidir su posible uso en aplicaciones de segunda vida. Además, sirven para verificar el cumplimiento de requisitos técnicos exigentes como lo es el detectar signos de degradación, variaciones de eficiencia o problemas térmicos durante su uso [54], [55].

En cuanto a la viabilidad económica, estos ensayos son viables y rentable, ya que proporcionan información sobre la vida útil remanente y permiten valorar económicamente una batería usada, orientando decisiones sobre reutilización, descarte o reconfiguración [54], [55].

3.2.3 Factores que afectan la selección del método

La selección de un método de caracterización no invasiva depende de una combinación de factores: tipo de batería, entorno de aplicación (laboratorio, producción, campo), disponibilidad de recursos tecnológicos y objetivos específicos del diagnóstico. A continuación, se presenta una lista donde se puede apreciar en qué casos se utiliza cada método presentado anteriormente:

- La EIS se recomienda cuando se busca un modelado electroquímico profundo, detección anticipada de fallos o validación de envejecimiento, siendo ideal para baterías pouch, prismáticas y cilíndricas de uso automotriz o estacionario, pero requiere condiciones controladas [54], [55]
- El IC/DV se utiliza en estudios académicos donde se requiere identificar modos específicos de degradación, siendo esta la más aplicable en laboratorio con baterías tipo pouch o cilíndricas, bajo condiciones constantes y repetibles [54], [55]
- El OCV (especialmente GITT) se elige cuando se busca información termodinámica detallada para estudios de equilibrio o calibración de modelos, por otro lado, si se prioriza el tiempo operativo, se opta por pseudo-OCV [54], [55].
- Los test de capacidad son útiles en cualquier entorno para caracterización directa del rendimiento y SoH, siendo estas esenciales en pruebas de producción y validación de baterías nuevas o usadas [54]

3.2.4 Evaluación global de los métodos de caracterización no invasivos

La caracterización no invasiva de baterías de ion-litio se ha vuelto una herramienta fundamental para asegurar un funcionamiento seguro, eficiente y duradero de estos sistemas de almacenamiento, entre las técnicas más destacadas se encuentra la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), debido a que tienen una capacidad impresionante para analizar en profundidad lo que ocurre dentro de una celda, analizando fenómenos físicos y químicos que muchas veces pasan desapercibidos, y gracias ello, no solo nos proporciona información de cómo está la batería hoy, sino que nos ayuda a anticipar posibles fallos, siendo esto lo que la convierte en una aliada clave para los sistemas de gestión de baterías (BMS) y para diagnósticos preventivos, especialmente en entornos industriales exigentes.

Ahora bien, la EIS también tiene su lado complicado, no es una técnica que cualquiera pueda usar sin preparación debido a que requiere equipos especializados, costosos, y adicional a ello, personal con conocimientos técnicos sólidos para interpretar los datos usando modelos de circuitos equivalentes, además, hay que tener mucho cuidado con detalles como el ruido en las mediciones o la estabilidad térmica durante los ensayos, pero

aun así, cuando se necesitan diagnósticos confiables y profundos, esta técnica suele estar entre las primeras opciones, sobre todo en procesos de validación o para reutilizar celdas con estándares de seguridad elevados.

Otra técnica que no se queda atrás es el análisis IC/DV, que usa las curvas de voltaje versus capacidad para mostrar, casi como si se tratara de un escáner interno, cómo están evolucionando los componentes dentro de la batería, esta es particularmente sensible a cambios en los electrodos, como la pérdida de litio activo o la degradación del material activo, en este caso si se requiere condiciones bien controladas y algo de experiencia en análisis de datos, pero no necesitas equipos costosos, lo que ya es una gran ventaja, siendo una opción muy atractiva, sobre todo en investigación o cuando se analizan baterías que podrían tener una segunda vida útil.

Desde un punto de vista económico, las técnicas IC/DV resultan ser una apuesta bastante rentable ya que permiten estimar con buen nivel de confianza el estado de salud (SoH) y la vida útil remanente (RUL) de una batería, siendo esto vital cuando se trata de decidir si una celda sigue siendo útil o si ya es hora de reciclarla, además, funcionan bien con distintas químicas de litio, lo que las hace aún más versátiles, es por ello que no es raro verlas en entornos donde la sostenibilidad y la electromovilidad son prioridad.

Cuando hablamos de pruebas de voltaje en circuito abierto (OCV), entramos en el terreno de lo simple y práctico, debido a que estas pruebas no requieren equipamiento complejo, y eso ya las pone en ventaja. Técnicas como GITT logran una precisión sorprendente al aproximarse al voltaje de equilibrio, pero hay un detalle: son demasiado lentas, y a veces pueden tardar días, por ello, métodos como el pseudo-OCV ganan terreno ya que son más rápidos, sacrifican un poco de precisión, pero a cambio ofrecen agilidad, lo cual puede ser crucial en aplicaciones donde el tiempo es un factor clave.

Estas pruebas OCV también cumplen un rol muy importante en la calibración de modelos de estimación de SoC y en la detección temprana de problemas sin dañar la batería, por lo tanto, son seguras, accesibles y su relación costo-beneficio es bastante favorable. Su uso temprano en el diagnóstico técnico ayuda a reducir la incertidumbre y mejora la eficiencia en procesos como la clasificación de celdas para reutilización, siendo, en

definitiva, una opción muy interesante para quienes buscan soluciones prácticas sin comprometer la seguridad.

Finalmente, los test de capacidad, por su parte, son los más directos debido a que proporcionan información de cuánta energía puede entregar una batería, y aunque su precisión puede verse afectada por factores externos (como la temperatura o la velocidad de descarga), su facilidad de uso y bajo costo los hacen indispensables, siendo ideales para entornos de producción, mantenimiento o para clasificar baterías usadas, además, ayudan a detectar patrones de degradación, lo cual es muy útil para anticipar cuándo es momento de reemplazar una celda antes de que falle por completo.

Hoy por hoy, la tendencia es clara, combinar estas técnicas con modelos avanzados y herramientas de inteligencia artificial, logrando así una mayor precisión en los diagnósticos, extendiendo la utilidad de estos métodos no invasivos a condiciones reales de operación. Al final del día, cada método tiene lo suyo, algunos destacan por su exactitud milimétrica, otros por su practicidad o su bajo costo, lo importante es saber elegir cuál usar según el tipo de batería, el entorno y los objetivos del análisis. En muchos casos, la mejor respuesta no es elegir uno solo, sino combinar varios para lograr una caracterización global, precisa y, sobre todo, confiable.

3.2.5 Cuadro comparativo de los métodos de caracterización no invasiva para baterías Li-ion

Para una fácil interpretación de lo anteriormente mencionado en los diferentes análisis, se desarrolló una tabla con las palabras clave con relación a cada método de caracterización no invasiva presentado en el documento:

Tabla 2 Cuadro comparativo de los métodos de caracterización no invasiva para baterías Li-ion.

Técnica	**Precisión / Exactitud**	**Viabilidad técnica**	**Viabilidad económica**	**Condiciones de Selección**
Espectroscopía de Impedancia	Alta, modelado detallado y	Alta, requiere equipos	Costosa inicialmente, pero	Ideal para modelado profundo,

Electroquímica (EIS)	permite detección temprana de fallas	especializados y experiencia técnica	rentable a largo plazo por la calidad de la información	diagnóstico preventivo y validación avanzada
IC/DV (Capacidad Incremental / Voltaje Diferencial)	Alta, sensible a cambios estructurales, pero requiere condiciones controladas	Media, no requiere equipos sofisticados, pero sí control experimental y análisis experto	Alta, económica en hardware; rentable por su capacidad diagnóstica.	Estudios de degradación específicos, análisis en laboratorio
Pruebas de voltaje de circuito abierto (OCV)	Variable: GITT – alta exactitud, pero lenta; pseudo OCV – menor exactitud, pero más rápida	Alta, fácil de implementar con equipamiento básico	Muy alta, bajo costo y sin riesgos para la batería	Ideal para modelado SoC, diagnóstico temprano y clasificación de celdas.
Test de capacidad	Media, afectada por condiciones externa	Alta, fácil de aplicar con equipos convencionales	Muy alta, técnica económica y ampliamente utilizada	Evaluación directa del rendimiento; útil en

	pero útil para tendencias de degradación	cualquier entorno

3.2 Desarrollo del prototipo.

La implementación del prototipo inicia con la revisión del Alcance y Delimitación del proyecto, presentados en la sección 1.3 del presente documento. Esta sección establece los límites y funcionalidades generales del sistema, pero sin profundizar en los detalles técnicos. A continuación, se presenta el paso a paso del desarrollo, desde las consideraciones iniciales, selección de componentes como también del montaje físico y las pruebas de validación de este.

3.2.1 Consideraciones iniciales y especificaciones técnicas

El prototipo parte de la necesidad de caracterizar de manera simultánea tres baterías Li-ion 18650, con la capacidad de controlar y medir los parámetros de cada una de forma manera independiente.

Para este fin, el sistema incorporará una comunicación entre Arduino y el software Matlab. El microcontrolador tendrá la función de adquirir los datos generados por los sensores y transmitirlos a Matlab, lo que permitirá una visualización gráfica en tiempo real del comportamiento de las baterías, monitoreando voltaje, corriente y temperatura. Además, para facilitar un análisis más detallado, los datos recopilados por Matlab se almacenarán en archivos Excel, lo cual resulta crucial para un análisis más profundo que permita comparar el voltaje, amperaje y temperatura en función del tiempo con relación a la tasa de descarga utilizada. Asimismo, a partir de los datos recolectados se podrán realizar cálculos adicionales como la capacidad descargada y el estado de descarga de las baterías, lo que permitirá una evaluación más completa de su desempeño, contrastando los resultados obtenidos con investigaciones profesionales.

En cuanto a las especificaciones técnicas, se consideró que la tasa máxima de descarga será de un 200% (aproximadamente 5.2A), por lo tanto, el sistema fue diseñado para manejar un consumo máximo de 6A en su parte de potencia, garantizando un margen de seguridad operativa.

Además, para la ejecución de las pruebas de descarga se ha establecido como criterio de protección que las baterías no serán llevadas hasta el voltaje de corte especificado por el fabricante (2.8V según la ficha técnica), sino que el proceso se detendrá cuando el voltaje alcance los 3.0V. Esta decisión se adopta como medida preventiva para preservar la integridad electroquímica de las baterías, reducir el estrés por descarga y prolongar su vida útil durante las múltiples pruebas experimentales

En lo referente a la medición de temperatura, se definió que esta se realizara mediante un sensor infrarrojo, debido a la practicidad y facilidad de capturar datos sin el contacto directo.

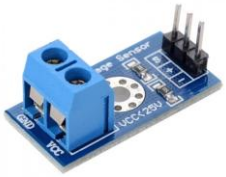
Por último, respecto al banco de resistencia se consideró inicialmente tasas de descarga de 25%, 50%, 100% y 200% para cada una de las baterías, sin embargo, por razones de eficiencia de montaje, se optó por construir un único banco que ofrezca un total de 12 diferentes configuraciones de tasas de descarga, incluyendo las 4 configuraciones iniciales y ampliando el rango experimental disponible.

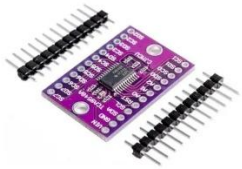
3.2.2 Selección de componentes electrónicos y de control

La fase de implementación requirió una selección rigurosa de los componentes electrónicos y de control que permitan garantizar la precisión en la adquisición de datos como la funcionalidad integral de todo el sistema. Los elementos fueron seleccionados considerando factores clave como compatibilidad con la placa microcontroladora, fiabilidad de medición y capacidad de operar dentro de la especificación máxima de corriente.

A continuación, mediante la Tabla 3 se detallan los principales componentes electrónicos y de control que forman la base física del sistema de caracterización.

Tabla 3 Componentes electrónicos y de control utilizados en el prototipo

Dispositivos	**Imagen**	**Datos**
Arduino Mega 2560 Rev3		Voltaje de alimentación: 5V Pines: • 53 pines digitales • 13 pines analógicos
Convertidor Boost LTC1871		Voltaje de alimentación: 3-35V Voltaje de salida: 3.5 – 35V Corriente de salida máxima: 6A Potencia máxima: 100W Eficiencia: 96.7%
Sensor de voltaje FZ0430		Voltaje de alimentación: 5V Voltaje máximo de operación: 25V
Sensor de corriente DC ACS712		Voltaje de alimentación: 5V Corriente máxima de operación: 30A Error: ±1.5%

Sensor de temperatura MLX90614		Voltaje de alimentación: 5V Rango de temperatura de operación: -40 a 170 °C Precisión: ±0.5 °C
Relé SR-05VDC-SL-C		Voltaje de alimentación: 5V Voltaje de operación: • 10A – 125VAC • 10A – 28VDC
Placa de expansión I2C PCA9548A		Voltaje de alimentación: 5V Canales de comunicación bidireccional: 8

3.2.3 Implementación del Prototipo de Descargas Múltiple

La implementación del prototipo consta de varias partes, cada una importante para llegar al modelo final del prototipo. Como primer punto, se procedió al desarrollo del diagrama de conexión que llevara el prototipo de descargas múltiple el cual se detalla en el Anexo 1.

Definido el diagrama, se procedió al desarrollo de un circuito experimental que permita verificar el funcionamiento en conjunto de los elementos seleccionados para la construcción del prototipo, a través de la Figura 3, podemos apreciar el circuito experimental desarrollado.

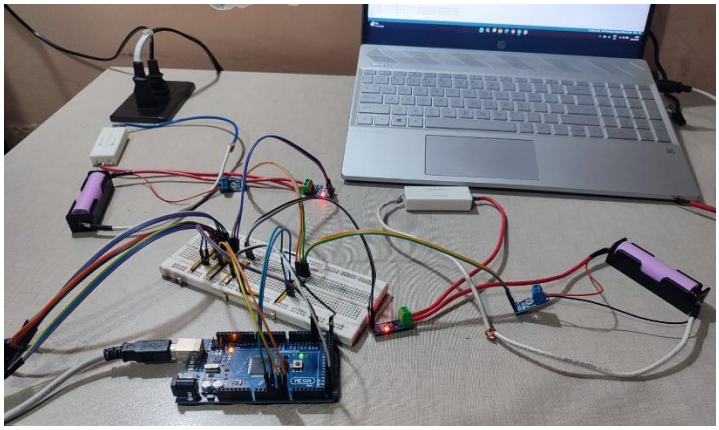


Figura 3 *Circuito experimental del prototipo de descargas múltiple*

Una vez establecidas las conexiones físicas del circuito experimental, se procedió a desarrollar la lógica del prototipo.

3.2.3.1 Programación del prototipo

La programación de la lógica del prototipo se divide en tres secciones principales.

3.2.3.1.1 Programación en Arduino

La primera sección corresponde al módulo de Arduino, el cual se encargó de las funciones principales del sistema, incluyendo la adquisición de datos provenientes de los sensores, el control del estado de los relés y el envío de la información recopilada hacia el computador para su posterior procesamiento y visualización en MATLAB.

La programación del Arduino se detalla en el anexo 2. En la Figura 4 se puede apreciar la recepción de datos en el monitor serial del programa de Arduino IDE.

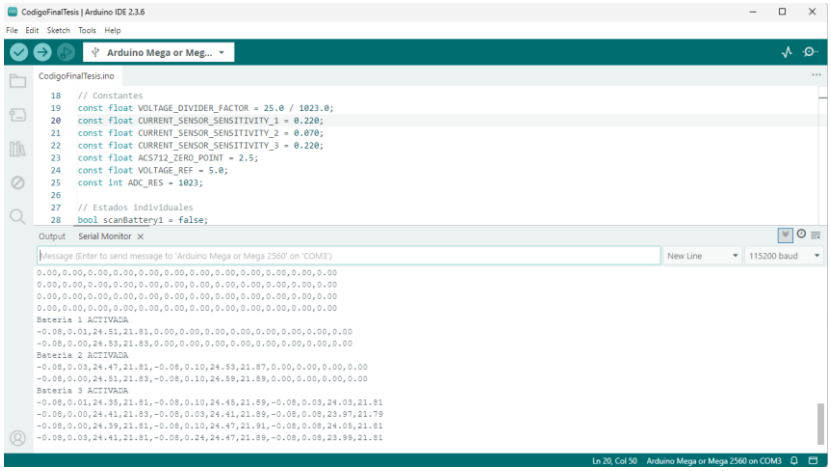


Figura 4 *Recepción de datos en Arduino IDE*

A continuación, se resaltan los detalles claves de la programación desarrollada.

- La recepción de datos se desarrolla cada segundo.
- El voltaje de cierre para que se activen los relés 3V.
- El microcontrolador verifica al iniciar que los tres sensores de temperatura MLX90614 estén conectados, caso contrario, se mostrara en el monitor serial cual de estos presenta un error de conexión.
- La activación y desactivación de la recepción de datos por cada batería se desarrolla mediante él envió de comandos específicos mediante el monitor serial: los comandos (A1, A2 y A3) activan el envío de datos para las respectivas baterías, mientras que los comandos (P1, P2 y P3) lo desactivan respectivamente.
- Todos los datos (voltaje, corriente y las temperaturas de la batería como de ambiente) se presentan en una única línea de texto, lo cual fue diseñado para facilitar y optimizar la lectura e interpretación de la información por parte de Matlab.

3.2.3.1.2 Programación en MATLAB

Como segunda sección, es la presentación de los datos por parte de MATLAB. Este será el encargado de las siguientes funciones: receptar los datos por parte de Arduino hacia MATLAB; controlar y presentar los datos en tiempo real en un aplicativo visual diseñado en App Designer – MATLAB como también el de guardar los datos receptados por cada batería en un Excel para su posterior análisis.

Es necesario resaltar que el aplicativo de App Designer en MATLAB utiliza una combinación entre diseño gráfico y programación. Este proceso requiere primero arrastrar los componentes visuales hacia la interfaz, al hacer esto, App Designer genera automáticamente código asociado a dichos elementos, sobre el cual se inserta la lógica de programación necesaria para definir su funcionalidad especifica,

Mediante la Figura 5, podemos apreciar el diseño del aplicativo generado en el App Designer.

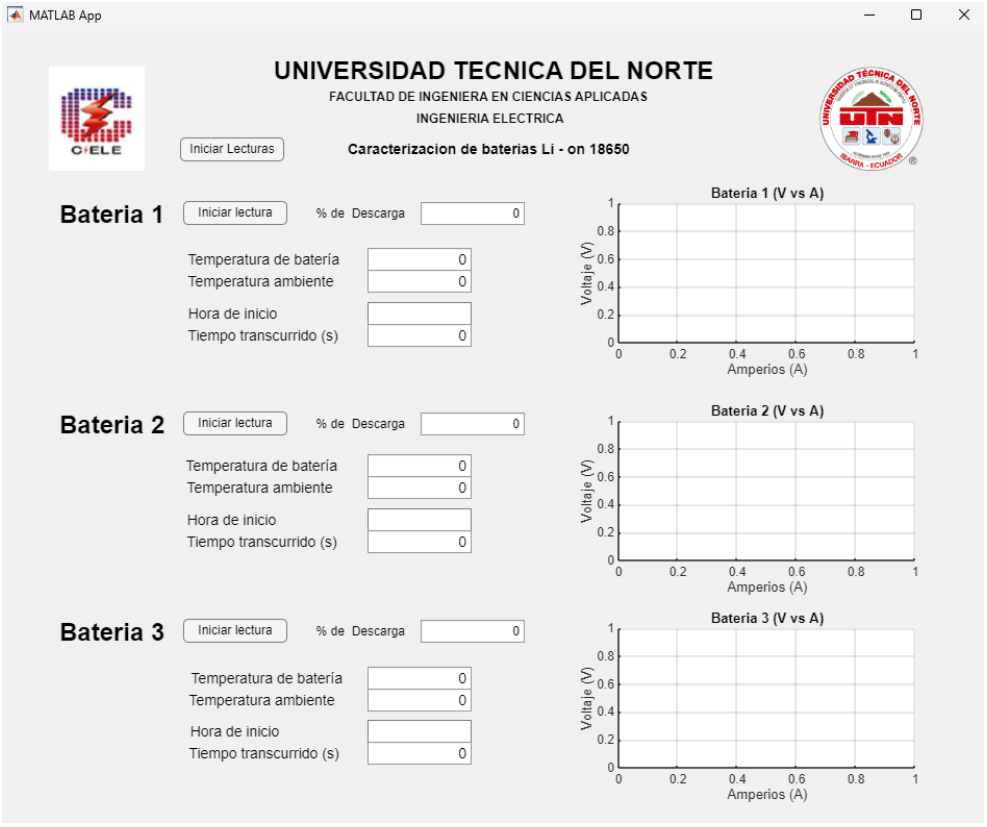


Figura 5 *Diseño del aplicativo para el prototipo*

La programación desarrolla del aplicativo se detalla en el anexo 3. A continuación, se resaltan los detalles claves del aplicativo.

- Los datos receptados por el aplicativo se guardarán un archivo Excel con el nombre de “'Bateria#_%Descarga_Fecha” en la carpeta de Matlab, en la sección de Documentos.
- Los datos de voltaje vs corriente se presentan de manera gráfica, mientras que los valores de temperatura de la batería como ambiente se presentan en casillas estáticas, todos ellos actualizándose en tiempo real.
- Se presentan casillas estáticas con la hora de inicio de captura de datos como también del tiempo transcurrido en segundos.
- Si los datos de voltaje receptado en cualquier batería presentan valores de igual o menor a 3V una vez iniciada la captura de datos, se detendrá y dará por finalizada la recepción de datos.

- El aplicativo incluye un cuadro de entrada numérica destinada a especificar el porcentaje de descarga, lo cual permite asociar cada curva registrada con la condición de carga establecida y facilitar su análisis comparativo posterior.
- El aplicativo incluye un botón general destinado a inicializar todas las pruebas de descarga de manera conjunta, facilitando la operación en el sistema.

3.2.3.1.3 Diagrama de flujo del prototipo

El diagrama de flujo que se presenta mediante Figura 6, ilustra de manera concisa la secuencia lógica de operación del prototipo, desde la adquisición de datos hasta la toma de decisiones.

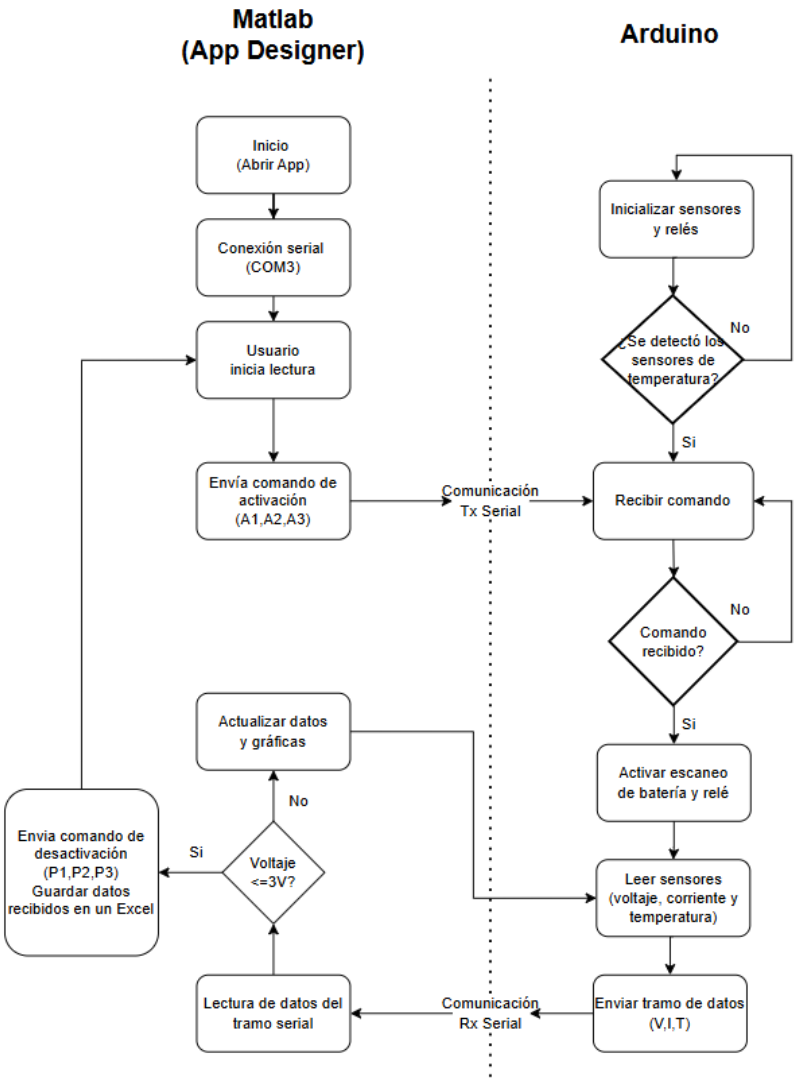


Figura 6 *Flujograma del prototipo*

El diagrama detalla los procesos clave, las condiciones bajo las que se activa la lógica de control y el flujo de información entre Arduino y MATLAB/App Designer, sirviendo de esta manera como una guía visual para comprender la funcionalidad completa del sistema.

3.2.3.2 Proceso de Ensamblaje del Prototipo

El proceso de ensamblaje del prototipo se procedió vario varias etapas. Como primera etapa, se desarrolló el diseño de la caja protectora del prototipo en el software de AutoCAD con medidas de 30 cm de largo x 25 cm de ancho x 15 cm de alto. La Figura 7 presenta el diseño desarrollado.

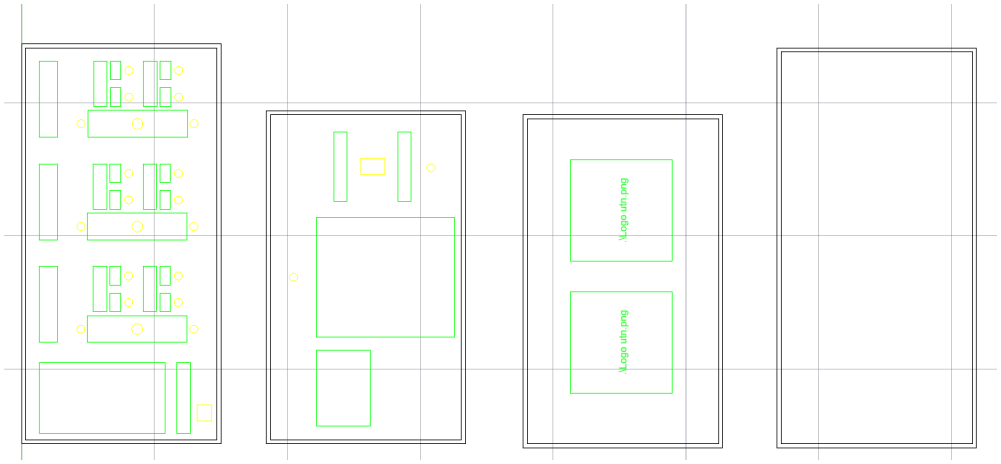


Figura 7 *Diseño de caja protectora del prototipo*

Una vez realizado el diseño, se procedió al corte y armado del mismo en material Acrílico transparente.

Como segunda etapa, se procedió al desarrollo de la placa PCB en el software de Fritzing con las medidas de 19.2 cm x 7.3 cm. La Figura 8, presenta el diseño desarrollado para el prototipo.

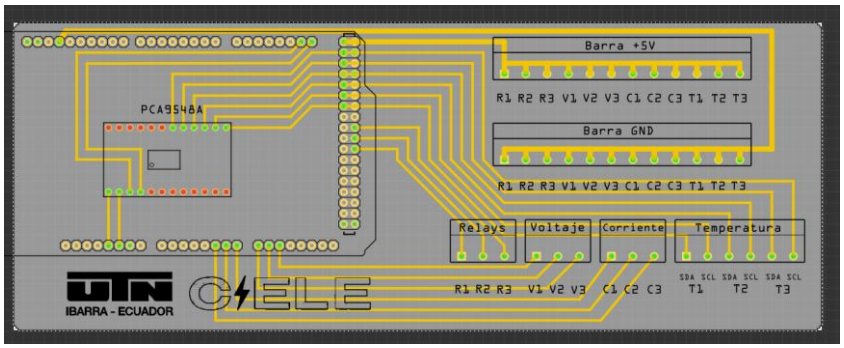


Figura 8 *Diseño PCB del circuito del prototipo*

Una vez realizado el diseño, se procedió a la implementación de la placa PCB.

Una vez implementado la caja protectora como la placa PCB, se procedió al armado del prototipo en la caja protectora, en donde la Figura 9 presenta el resultado final del mismo.

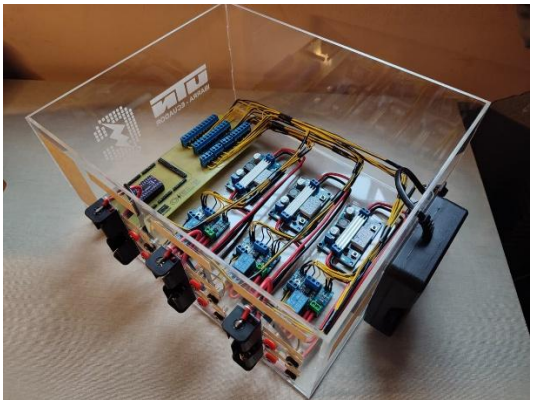


Figura 9 *Implementación del prototipo en la caja protectora*

Realizado una vez la instalación de los elementos correspondientes, se procedió a realizar una verificación del sistema, en donde se corroboro su funcionamiento de manera conjunta.

3.2.4 Implementación del banco de resistencia

Partiendo de las consideraciones iniciales y especificaciones técnicas presentadas en la sección 3.3.1 del presente documento, se consideró inicialmente que cada batería contara con 4 configuraciones de diferentes tasas de descarga correspondientes al 25%, 50%, 100% y 200% de la corriente nominal de la batería Li-ion 18650, correspondiente a 2600 mAh. No obstante, por temas de practicidad, montaje y por abarcar mayor cantidad de configuraciones de descarga, se optó por un solo modulo que contenga 12 configuraciones distintas.

A continuación, mediante la tabla 4 se detalla las configuraciones que incluirá el banco de resistencias:

Tabla 4 Tasas de descarga

#	Tasa de descarga	Porcentaje de corriente	Corriente	Calculo (R= 3.7V/I)	Resistencia ideal	Resistencia real
1	10%	2.6A*0.10	0.26A	3.7V/0.26A	14.23Ω	15 Ω
2	15%	2.6A*0.15	0.39A	3.7V/0.39A	9.48 Ω	10.3 Ω
3	25%	2.6A*0.25	0.65A	3.7V/0.65A	5.69 Ω	5.5 Ω
4	30%	2.6A*0.30	0.78A	3.7V/0.78A	4.74 Ω	5 Ω
5	45%	2.6A*0.45	1.17A	3.7V/1.17A	3.16 Ω	3.3 Ω
6	50%	2.6A*0.50	1.3A	3.7V/1.3A	2.84 Ω	2.6 Ω
7	60%	2.6A*0.60	1.56A	3.7V/1.56A	2.37 Ω	2.5 Ω
8	65%	2.6A*0.65	1.69A	3.7V/1.69A	2.18 Ω	2.3 Ω
9	100%	2.6A*1	2.6A	3.7V/2.6A	1.42 Ω	1.4 Ω
10	120%	2.6A*1.2	3.12A	3.7V/3.12A	1.18 Ω	1.2 Ω
11	150%	2.6A*1.5	3.9A	3.7/3.9A	0.94 Ω	1 Ω
12	200%	2.6A*2	5.2A	3.7/5.2A	0.71 Ω	0.7 Ω

Una vez definidos los valores de resistencia requeridos y los obtenidos físicamente, se procedió con la implementación física del banco de resistencias.

Como primer punto, se procedió al desarrollo del diseño de la caja, el cual fue desarrollado en el software de AutoCAD con medidas de 30 cm de largo x 25 cm de ancho x 15 cm de alto. La Figura 10, presenta el diseño final para el banco de resistencias.

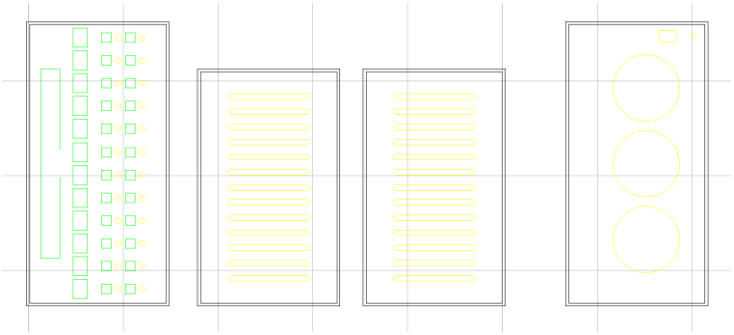


Figura 10 *Diseño de caja protectora del banco de resistencias*

Cabe resaltar que en el diseño se integró un sistema de ventilación forzada por aire para mitigar cualquier riesgo de sobrecalentamiento de las resistencias durante las pruebas. Este sistema constará de tres ventiladores de 12V, la cual se controlará mediante un interruptor dedicado.

Dicho esto, se procedió al corte y armado del mismo en material de acrílico transparente. A continuación, mediante la figura 11 se puede aprecia el resultado obtenido del mismo.

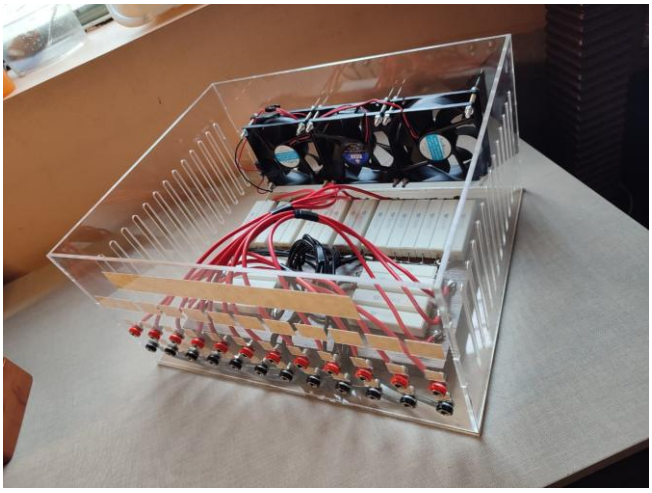


Figura 11 *Implementación del banco de resistencia en la caja protectora*

3.2.5 Pruebas Iniciales y Verificación de Funcionamiento

Una vez desarrolladas las dos partes principales del proyecto, es decir, el prototipo caracterizador y el banco de resistencias, se procedió a la etapa de verificación y puesta en marcha conjunta. A continuación, mediante la Figura 12 se puede apreciar el correcto funcionamiento de este.

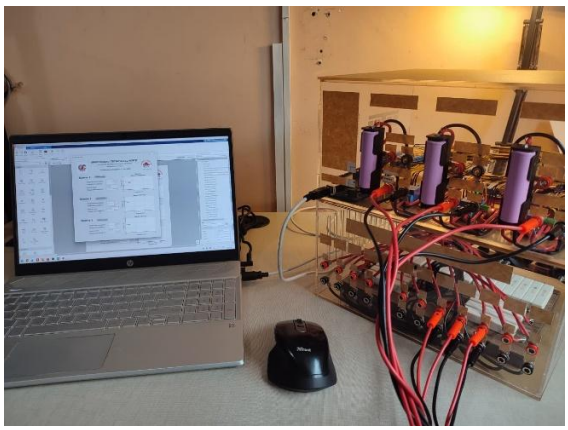


Figura 12 *Puesta en marcha del prototipo*

Una vez verificado el funcionamiento del prototipo, se procedió a realizar pruebas iniciales a tasas de descarga de un 45% y 50% correspondientemente. En donde se obtuvieron los siguientes resultados gráficos.

A una tasa de descarga de un 45%, mediante la Figura 13 se logra apreciar las curvas de voltaje y corriente de una batería Li-ion modelo Samsung IRF18650-26J M con un estado de carga del 100% conectado a una resistencia 3.3Ω. En donde ambas graficas se encuentran en función del tiempo con una duración aproximada de 126 minutos.

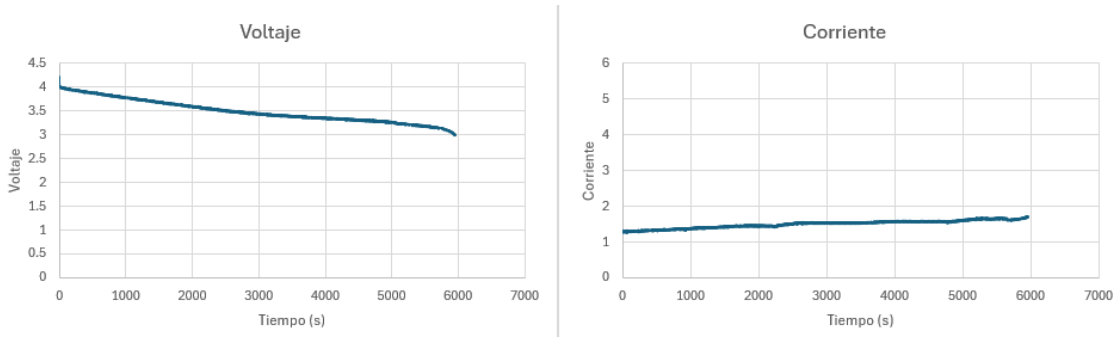


Figura 13 *Curva de descarga de voltaje y corriente a una tasa de descarga del 45%.*

En la Figura 14, se puede apreciar la temperatura de la batería y la temperatura ambiente registrada a su alrededor.

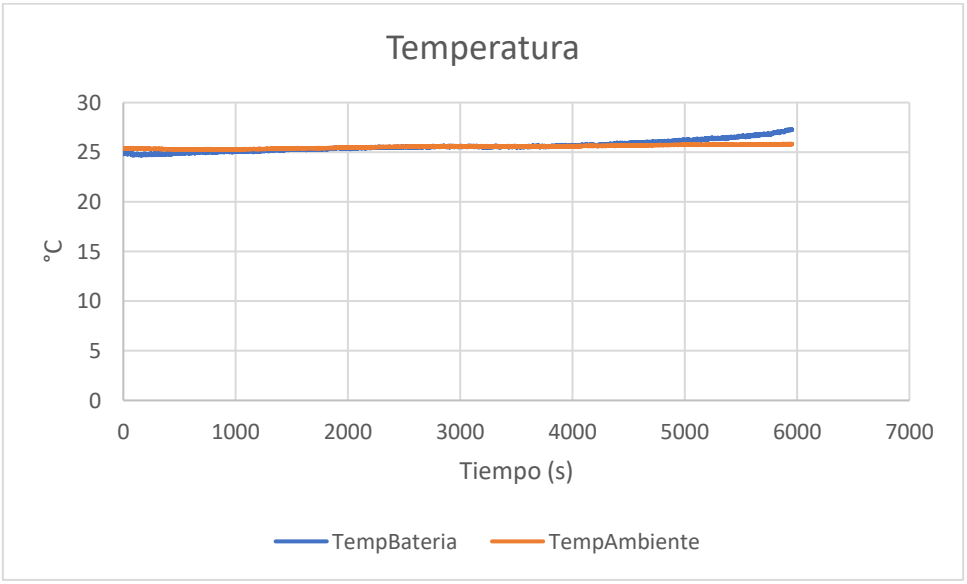


Figura 14 *Temperatura de la batería y ambiente a una tasa de descarga del 45%.*

En términos generales, los datos obtenidos a una tasa de descarga del 45% demuestran un comportamiento estable de la batería a lo largo del tiempo de la prueba. La temperatura

se mantuvo constante, pero con un leve incremento en la última sección relacionado a la temperatura ambiente. Por otro lado, el voltaje evidenció una caída lineal esperada, pero con una corriente con ligera tendencia creciente debido al uso del convertidor buck-boost en el sistema.

Ahora, a una tasa de descarga del 50%, la Figura 15 permite apreciar las curvas de voltaje de voltaje y corriente de una batería Li-ion modelo Samsung IRF18650-26J M con un estado de carga del 100% conectado a una resistencia 2.6Ω. En donde ambas gráficas se encuentran en función del tiempo con una duración de 120 minutos.

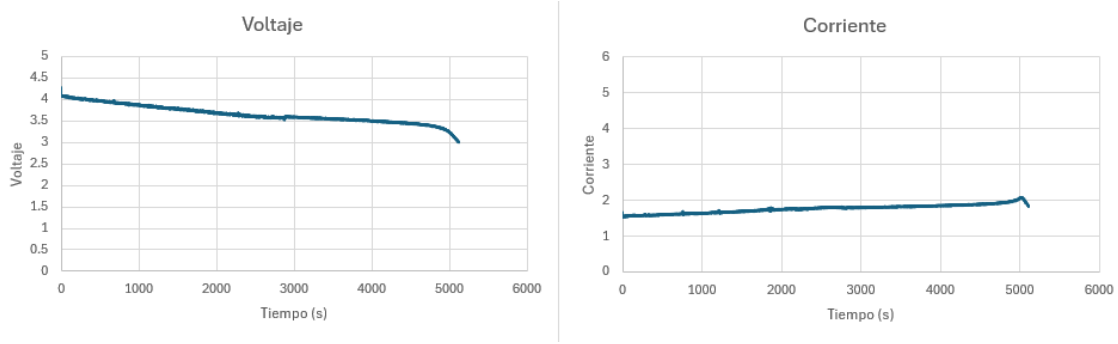


Figura 15 *Curva de descarga de voltaje y corriente a una tasa de descarga del 50%.*

En la Figura 16, se puede apreciar la temperatura de la batería y la temperatura ambiente registrada a su alrededor.

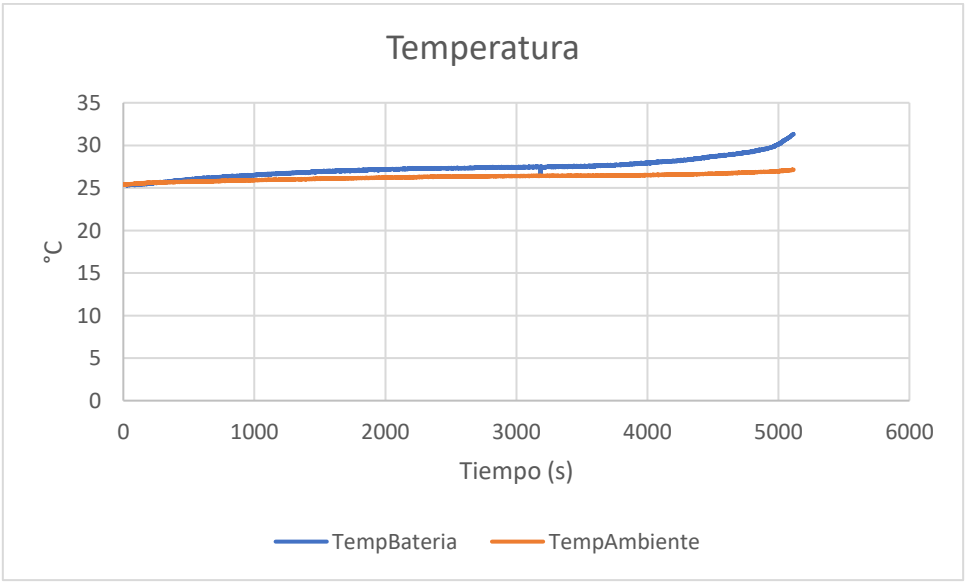


Figura 16 *Temperatura de la batería y ambiente a una tasa de descarga del 50%.*

En general, los datos obtenidos a una tasa de descarga del 50% demuestran un comportamiento estable de la batería a lo largo del tiempo de la prueba. La temperatura se vio levemente incrementada en relación con la temperatura ambiente, siendo este aumento atribuible a la tasa de descarga utilizada. Por otro lado, el voltaje evidenció una caída lineal esperada, pero con una corriente levemente creciente debido al uso del convertidor buck-boost en el sistema.

3.2.6 Matriz de operacionalización de variables

La Tabla 5 presenta la matriz de operacionalización de variables que se miden en el prototipo.

Tabla 5 Matriz de operacionalización de variables

Denominación	**Unidad de medida**	**Obtención de datos**	**Frecuencia de medición**	**Error**
Voltaje	Voltios (V)	Sensor FZ0430	1 segundo	±2%
Corriente	Amperios (A)	Sensor ACS712	1 segundo	±1.5%
Temperatura	Grados centígrados (°C)	Sensor MLX90614	1 segundo	±0.5 °C
Capacidad descargada	Amperios – hora (Ah)	Cálculo a partir de la medición de corriente y tiempo (Excel) $Ah_i = Ah_{i-1} + (\frac{I_i * \Delta_t}{3600})$	1 segundo	±1.5%
Estado de descarga	Porcentaje (%)	Cálculo a partir de la capacidad descargada (Excel)	1 segundo	±1.5%

$$SoD\ (\%) = \frac{Ah_{descargados}}{Ah_{nominal}} * 100$$

3.2.7 Materiales, equipos y software empleados

La Tabla 6 presenta en su totalidad los materiales, equipos y softwares seleccionados para la construcción del prototipo. Esta se organiza en cuatro categorías: Materiales de campo, Materiales de laboratorio, Equipos y Software, los cuales incluyen los diferentes elementos seleccionados para generar el prototipo en función de la compatibilidad, fiabilidad y capacidad de operar bajo las especificaciones técnicas requeridas en el prototipo.

Tabla 6 Materiales, equipos y software a emplear en la investigación.

Materiales de campo	**Materiales de laboratorio**	**Equipos**	**Software**
Ventiladores de 12V	Estaño	Multímetro	Arduino IDE
Cable de timbre	Baquelita	Arduino Mega	Matlab
Cable 14 AWG	Resistencia de potencia	Sensor de voltaje FZ0430	Excel
Interruptores	Cargador de 12V	Sensor de corriente DC ACS712 30A	Fritzing
Conectores macho y hembra AC	Cargador de baterías 18650	Sensor de temperatura MLX90614	
Baterías Li-ion ICR18650 26JM		Convertidor boost LTC1871 DC-DC	
		Relé SR-05VDC-SL-C	
		Computador	

En conclusión, el Capítulo 3 desarrolló el análisis de los distintos métodos de caracterización no invasiva para baterías Li-ion, abarcando además el diseño e implementación del prototipo experimental. La validación de este se llevó a cabo sometiéndolo a tasas de descarga del 25% y 50% respectivamente, comprobando así su correcta funcionalidad.

Sobre esta base, en el Capítulo 4 se presentarán y discutirán en detalle los resultados obtenidos del comportamiento de las baterías bajo diferentes tasas de descarga.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales realizadas con el prototipo de descargas múltiples para la caracterización de baterías Li-ion, con el objetivo de evaluar su desempeño, consistencia y seguridad operativa bajo diferentes tasas de descarga. Durante los ensayos se registraron de manera continua las variables eléctricas y térmicas tales como el voltaje, la corriente de descarga y la temperatura tanto ambiental como de la batería, las cuales constituyen la base para el análisis experimental desarrollado en este capítulo.

A partir de los datos medidos durante cada ensayo, los resultados se presentan inicialmente de forma individual para cada una de las tasas de descarga, permitiendo analizar el comportamiento dinámico de las variables registradas a lo largo del proceso de descarga. Con base en estas mediciones, se realiza el cálculo de la capacidad descargada en amperios-hora (Ah) y del estado de descarga (SoD), parámetros que permiten evaluar el desempeño energético de las baterías y la coherencia del sistema de medición implementado en el prototipo.

Posteriormente, se presenta un análisis comparativo global de las pruebas realizadas, en el cual se integran los resultados obtenidos en términos de capacidad descargada (Ah), curvas de estado de descarga (SoD) y comportamiento térmico, con el fin de evaluar la influencia de la tasa de descarga sobre el comportamiento electrotérmico de las baterías.

Como parte del proceso de validación del prototipo, las curvas experimentales de voltaje en función de la capacidad descargada se contrastan con curvas de referencia proporcionadas por el sitio especializado lygte-info.dk, reconocido por la publicación de datos experimentales sobre baterías y sus características de descarga.

En este contexto, la comparación con las curvas de referencia permite verificar la precisión del prototipo y su capacidad para reproducir el comportamiento característico de descarga de las baterías Li-ion. La Figura 17 presenta la curva Voltaje vs Capacidad

(Ah) utilizada como referencia para el análisis experimental desarrollado en este capítulo.

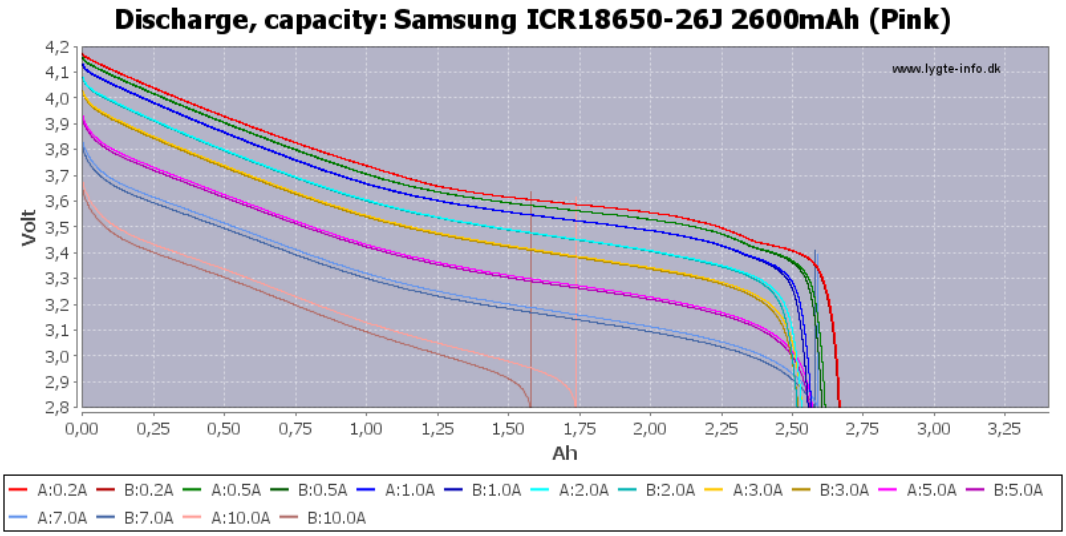


Figura 17 *Curvas Voltaje vs Capacidad (Ah)*
Fuente: [72]

Con base en la referencia presentada, a continuación, se exponen los resultados experimentales obtenidos en cada una de las pruebas de descarga realizadas con el prototipo, organizados según la tasa de descarga aplicada, estableciendo así el fundamento necesario para el análisis comparativo integral desarrollado en las secciones posteriores del capítulo.

4.1 Resultados experimentales de las pruebas

La presente sección reúne los resultados experimentales de las pruebas de descarga efectuadas con el prototipo, considerando diferentes tasas de descarga. Cada ensayo se analiza de forma individual, permitiendo observar el comportamiento eléctrico y la capacidad descargada de la batería bajo las condiciones establecidas.

4.1.1 Prueba de descarga al 10% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba realizada bajo una tasa de descarga del 10 % presenta un tiempo teórico de 10 horas aproximadamente, en donde el tiempo efectivo fue de 8 horas con 23 minutos, registrándose alrededor de 30219 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 18 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba,

donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

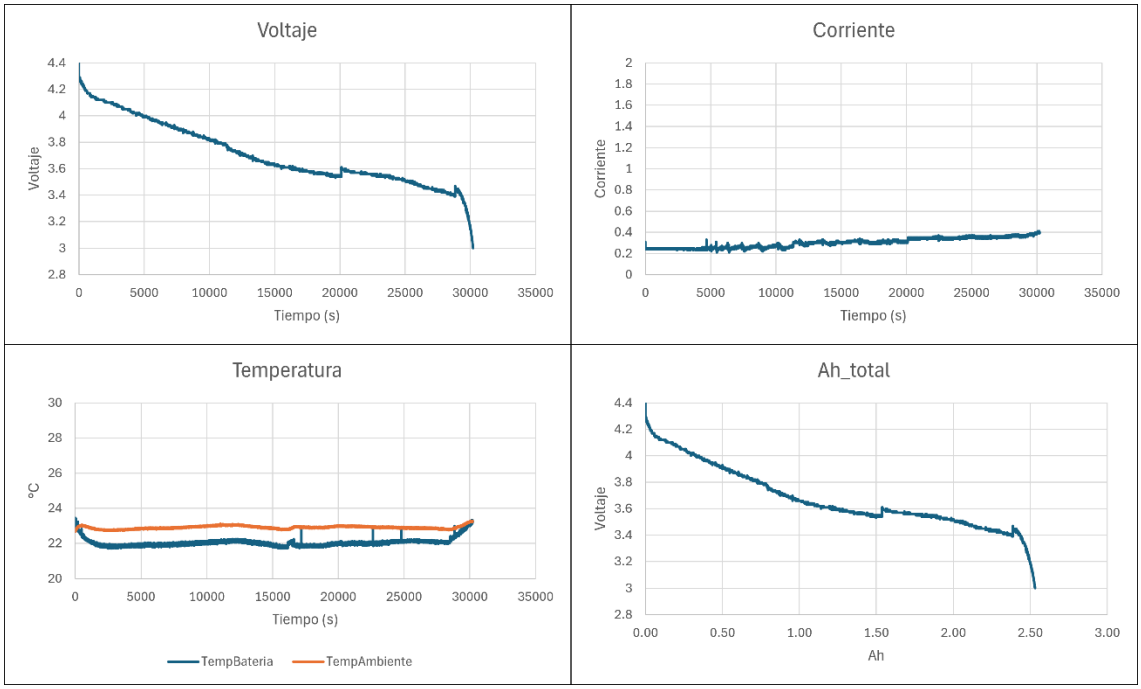


Figura 18 *Resultados al 10% de la capacidad nominal*

En la Figura 18, el voltaje presenta una disminución progresiva a lo largo del tiempo. No obstante, se observan dos picos de elevación de aproximadamente 0.1 V, los cuales se pueden atribuir a variaciones asociadas al sensor, originadas por la disminución de pruebas realizadas en ese momento por el prototipo. A pesar de estas pequeñas fluctuaciones, la tendencia general del voltaje mantiene un comportamiento decreciente acorde al proceso de descarga.

Por su parte, la corriente se mantiene relativamente constante durante el ensayo, aunque con una ligera tendencia creciente de aproximadamente 0.2 A, siendo está asociada al funcionamiento del convertidor buck-boost implementado en el sistema para mantener la condición de descarga establecida.

En cuanto a la temperatura de la batería, se registran variaciones leves y se mantiene cercana a la temperatura ambiente, aunque se identifican tres picos de temperatura de la batería hacia el valor de la temperatura ambiente, esta elevación se puede atribuir a ruido asociado al sensor, pero que no afectan de manera significativa la tendencia general de la batería. En consecuencia, se puede afirmar que la batería opera bajo condiciones

térmicamente estables y con ausencia de sobrecalentamiento para la tasa de descarga aplicada.

Finalmente, la capacidad acumulada aumenta de forma continua hasta llegar a un valor de 2.53 Ah al finalizar el proceso de descarga, evidenciando un comportamiento estable y coherente con la tasa utilizada, lo que permite verificar que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

4.1.2 Prueba de descarga al 15% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba correspondiente a una tasa de descarga del 15 % presenta un tiempo teórico de 7 horas aproximadamente, en donde el tiempo efectivo fue 5 horas con 35 minutos, registrándose alrededor de 20120 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 19 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba, donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

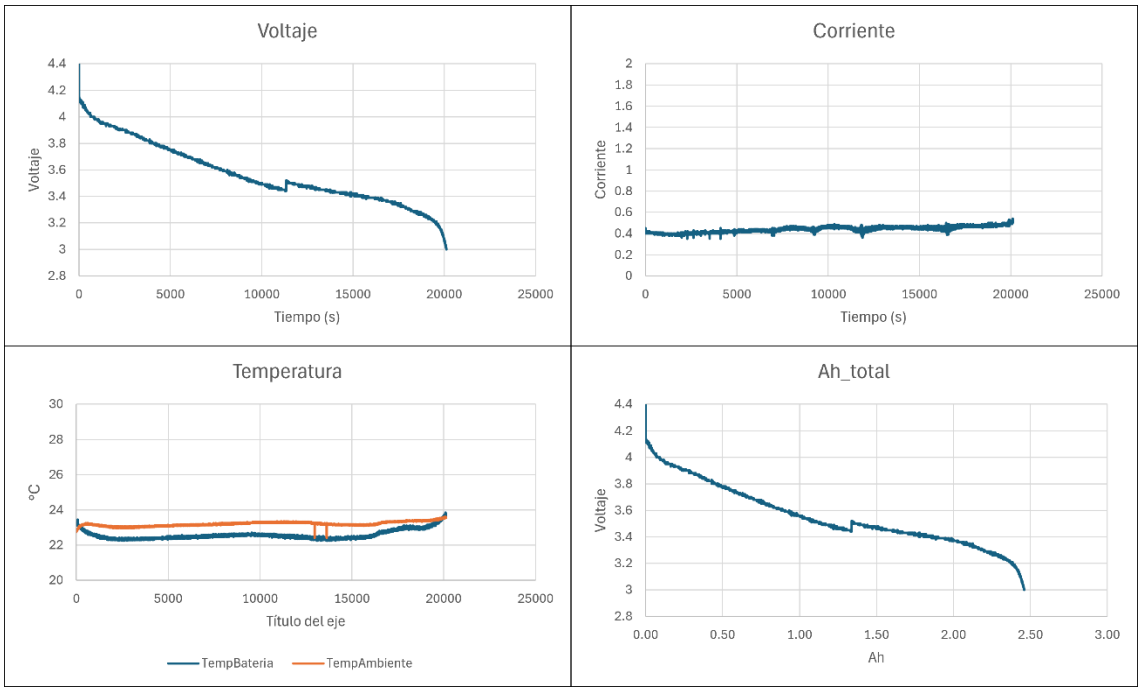


Figura 19 *Resultados al 15% de la capacidad nominal*

En la Figura 19, el voltaje evidencia una disminución progresiva a lo largo del proceso de descarga, manteniendo una tendencia estable durante gran parte del ensayo. No obstante, se observa un pico de elevación de aproximadamente 0.1 V, el cual se puede

atribuir a variaciones asociadas al sensor, originadas por la disminución de pruebas realizadas en ese momento por el prototipo.

Por su parte, la corriente de descarga presenta una ligera tendencia creciente de aproximadamente 0.2 A, acompañada de leves variaciones que se pueden asociar al ruido del sensor. Adicional, este comportamiento de elevación se puede asociar al funcionamiento del convertidor buck-boost implementado en el sistema para mantener la condición de descarga establecida.

Desde el punto de vista térmico, la temperatura de la batería se mantiene cercana a la temperatura ambiente, sin embargo, se identifican dos picos invertidos en la señal de temperatura ambiente, los cuales pueden atribuirse a ruido en el sensor. A pesar de estas fluctuaciones, no se ve afectada de manera significativa la tendencia térmica general, por lo que se confirma que la batería opera bajo condiciones térmicamente estables.

Finalmente, la capacidad acumulada presenta un incremento continuo hasta llegar a un valor de 2.46 Ah al finalizar el ensayo, evidenciando un proceso de descarga estable y coherente con la tasa de descarga aplicada, lo que permite verificar que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

4.1.3 Prueba de descarga al 25% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba realizada bajo una tasa de descarga del 25 % presenta un tiempo teórico de 4 horas aproximadamente, en donde el tiempo efectivo del mismo fue de 3 horas con 9 minutos, registrándose alrededor de 11 341 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 20 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba, donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

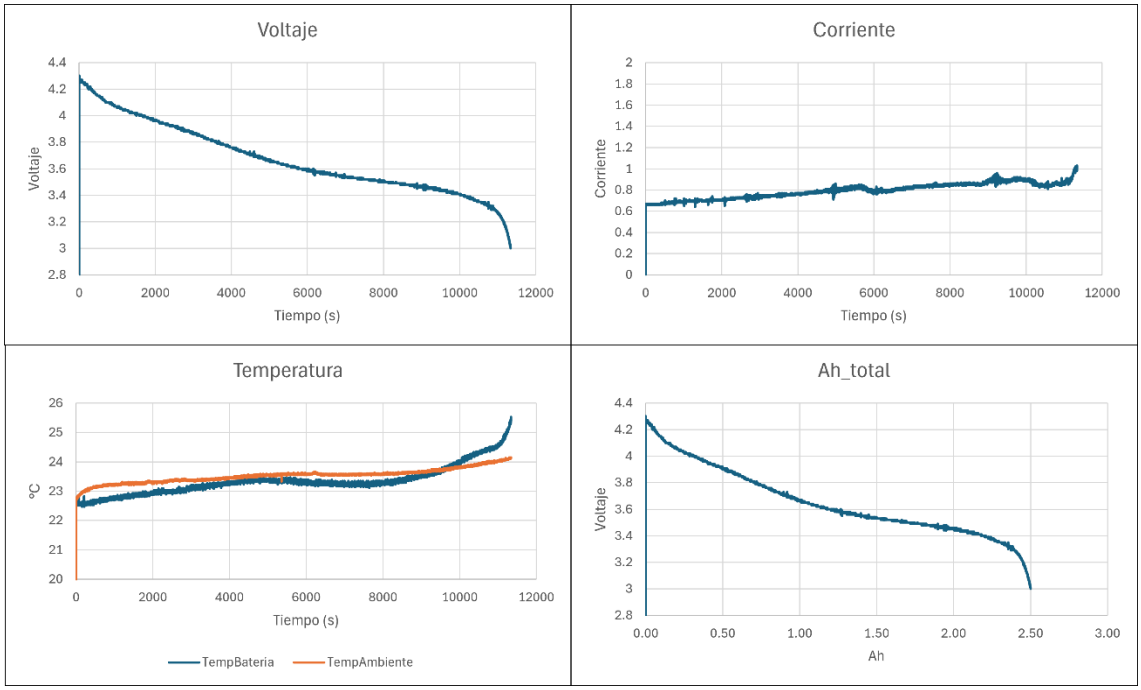


Figura 20 *Resultados al 25% de la capacidad nominal*

En la Figura 20, el voltaje evidencia una disminución progresiva a lo largo del proceso de descarga, manteniendo una tendencia estable durante la mayor parte del ensayo.

Por su parte, la corriente de descarga presenta una tendencia creciente con una elevación aproximada de 0.3 A, acompañada de leves fluctuaciónes atribuibles al ruido del sensor. No obstante, se observa una disminución seguida de una curvatura ascendente, siendo este comportamiento atribuible a la respuesta dinámica del convertidor buck-boost implementado en el sistema, el cual ajusta las condiciones de operación para mantener la descarga dentro de los parámetros establecidos.

Desde el punto de vista térmico, la temperatura de la batería se mantiene cercana al valor ambiente durante gran parte del ensayo, pero con una elevación notable hacia el final de la prueba, la cual se asocia al incremento de corriente registrado en ese momento, cercano a 1 A. A pesar de este aumento, el comportamiento térmico se mantiene dentro de las condiciones operativas normales, sin indicios de sobrecalentamiento significativo.

Finalmente, la capacidad acumulada presenta un incremento continuo a lo largo del proceso de descarga hasta llegar a un valor de 2.5 Ah al finalizar la prueba, evidenciando un comportamiento estable y coherente con la tasa de descarga aplicada, lo que permite verificar que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

4.1.4 Prueba de descarga al 30% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba realizada bajo una tasa de descarga del 30 % presenta un tiempo teórico de 3 horas con 10 minutos aproximadamente, en donde el tiempo efectivo de la misma fue de 3 horas, registrándose alrededor de 10833 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 21 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba, donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

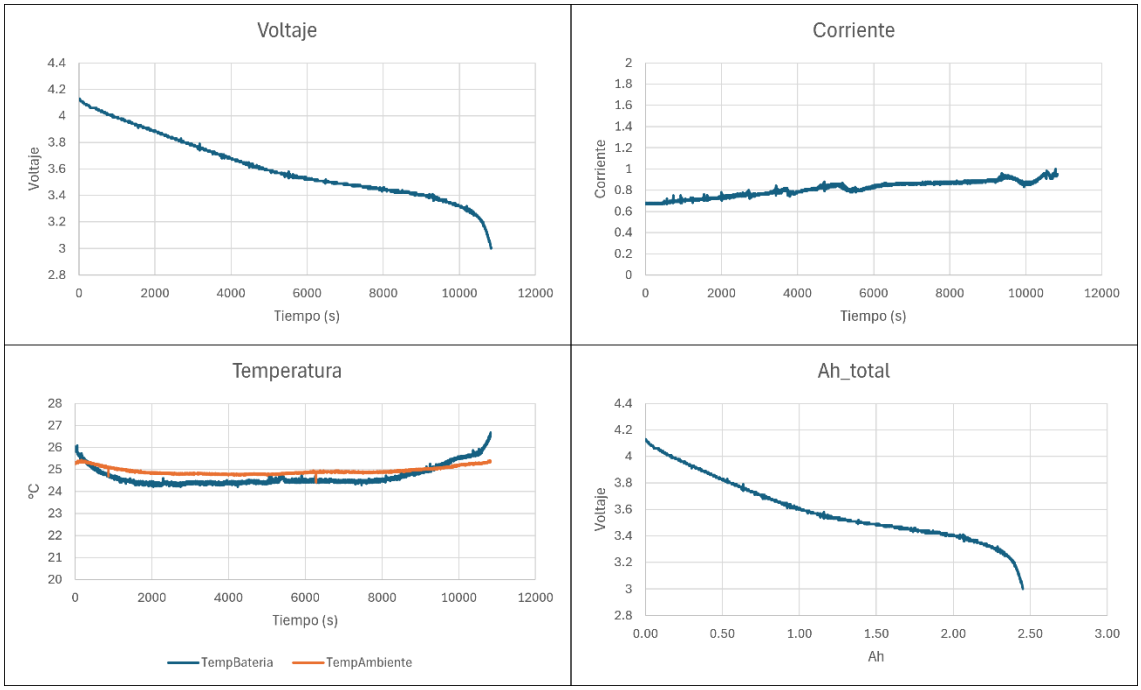


Figura 21 *Resultados al 30% de la capacidad nominal*

En la Figura 21, el voltaje presenta una disminución progresiva a lo largo del proceso de descarga, manteniendo una pendiente moderada durante la mayor parte del ensayo.

En cuanto a la corriente de descarga, se observa una tendencia creciente cercana a 0.3 A, acompañada de ligeras fluctuaciones atribuibles al ruido presente en el sensor. Adicionalmente, se identifica una disminución a la mitad de la prueba y, hacia la etapa final, una caída seguida de una nueva elevación de corriente, siendo este comportamiento relacionado a la respuesta dinámica del convertidor buck-boost, el cual ajusta las condiciones de operación para mantener la descarga dentro de los parámetros establecidos.

Desde el punto de vista térmico, la temperatura de la batería se mantiene cercana a la temperatura ambiente durante gran parte del ensayo, sin embargo, presentando en su última sección un incremento leve, el cual se atribuye al aumento de corriente registrado en ese momento. A pesar de ello, el comportamiento térmico se mantiene dentro de las condiciones normales de operación, sin indicios de sobrecalentamiento significativo.

Finalmente, la capacidad acumulada presenta un incremento continuo a lo largo del proceso de descarga hasta llegar a un valor de 2.45 Ah al finalizar la prueba, evidenciando un comportamiento estable y coherente con la tasa aplicada, lo que permite verificar que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

4.1.5 Prueba de descarga al 45% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba realizada bajo una tasa de descarga del 45 % presenta un tiempo teórico de 2 horas con 10 minutos aproximadamente, en donde el tiempo efectivo de la misma fue de 1 hora con 46 minutos, registrándose alrededor de 6387 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 22 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba, donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

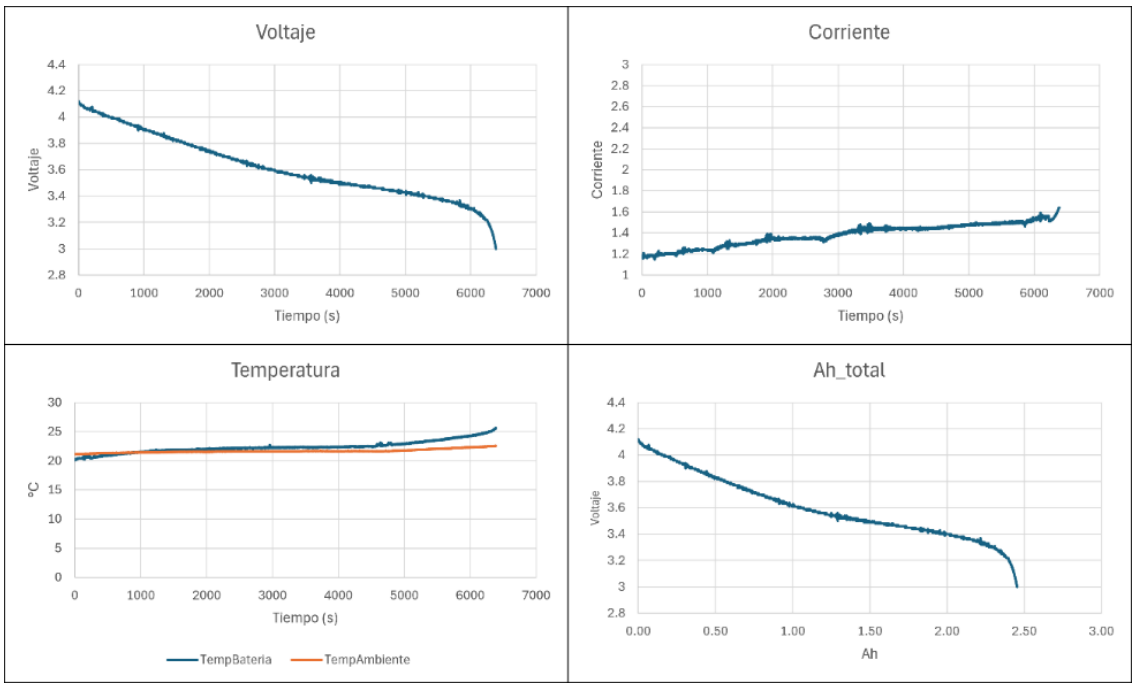


Figura 22 *Resultados al 45% de la capacidad nominal*

En la Figura 22, el voltaje presenta una disminución progresiva a lo largo del proceso de descarga, manteniendo una pendiente moderada durante la mayor parte del ensayo.

Por su parte, la corriente de descarga se mantiene relativamente estable, pero con una ligera tendencia creciente de 0.4 A. A lo largo de la prueba se pueden apreciar pequeñas fluctuaciones, siendo estas asociadas al ruido presente en el sensor, sin embargo, estas variaciones no afectan a la tendencia general de la gráfica. Así mismo, este comportamiento creciente se relaciona con el comportamiento dinámico del convertidor buck-boost implementado en el sistema, encargado de mantener la condición de descarga establecida.

Desde el punto de vista térmico, la temperatura de la batería se mantiene estable y cercana al valor de la temperatura ambiente durante gran parte del ensayo. No obstante, en la última sección se observa una elevación de temperatura, la cual es directamente proporcional con el incremento de corriente registrada en esos momentos de la prueba. A pesar de ello, el sistema opera bajo condiciones térmicamente estables durante todo el proceso.

Finalmente, la capacidad acumulada presenta un incremento continuo a lo largo del proceso de descarga hasta llegar a un valor de 2.45 Ah al finalizar la prueba, evidenciando un comportamiento estable y coherente con la tasa aplicada, lo que permite verificar que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

4.1.6 Prueba de descarga al 50% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba realizada bajo una tasa de descarga del 50 % presenta un tiempo teórico de 2 horas aproximadamente, en donde el tiempo efectivo de la misma fue de 1 hora con 31 minutos, registrándose alrededor de 5471 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 23 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba, donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del

tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

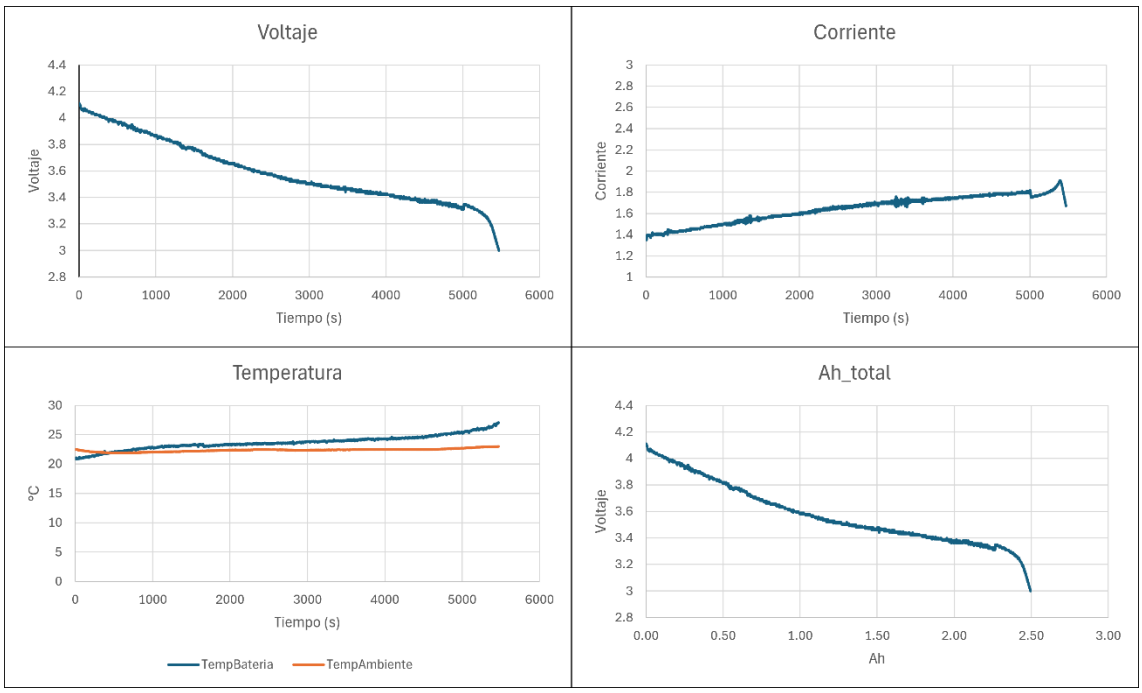


Figura 23 *Resultados al 50% de la capacidad nominal*

En la Figura 23, el voltaje presenta una disminución progresiva a lo largo del proceso de descarga, manteniendo una pendiente moderada durante la mayor parte del ensayo.

En cuanto a la corriente de descarga presenta una tendencia estable pero ligeramente creciente alrededor de 0.4 A durante gran parte del ensayo, acompañada de ligeras variaciones atribuibles al ruido del sensor. Sin embargo, en la última sección de la prueba se presenta un incremento seguido de una caída de corriente, siendo este comportamiento asociado a la respuesta dinámica del convertidor buck-boost, encargado de mantener la condición de descarga establecida.

Desde el punto de vista térmico, la temperatura de la batería muestra un incremento gradual a lo largo del ensayo, manteniéndose cercana a la temperatura ambiente durante la mayor parte del proceso, pero ya presentando una elevación considerable en la última sección, lo que indica que, a pesar de tener condiciones de operación térmicamente estables en gran parte de la prueba, ya empieza a haber una diferencia entre temperatura ambiente y de la batería debido a la corriente aplicada.

Finalmente, la capacidad acumulada presenta un incremento continuo hasta llegar a un valor de 2.50 Ah al finalizar la prueba, evidenciando un comportamiento estable y

coherente con la tasa aplicada, lo que permite verificar que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

4.1.7 Prueba de descarga al 60% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba realizada bajo una tasa de descarga del 60 % presenta un tiempo teórico de 1 hora con 52 minutos aproximadamente, en donde el tiempo efectivo de la misma fue de 1 hora con 28 minutos, registrándose alrededor de 5203 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 24 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba, donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

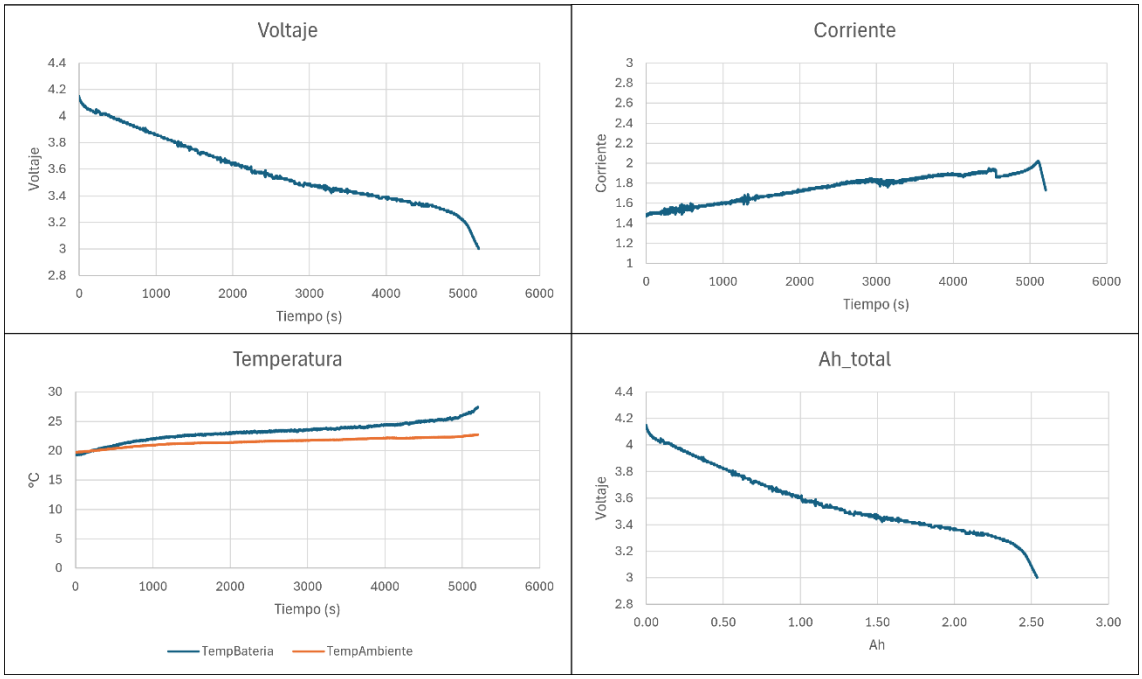


Figura 24 *Resultados al 60% de la capacidad nominal*

En la Figura 24, el voltaje presenta una disminución progresiva a lo largo del proceso de descarga, manteniendo una pendiente moderada durante la mayor parte del ensayo.

Por su parte, la corriente de descarga muestra una tendencia estable pero creciente, con un valor aproximado de 0.6 A. Durante gran parte del ensayo se aprecian pequeñas fluctuaciones asociadas al ruido del sensor, no obstante, durante su sección final se evidencia un incremento más pronunciado seguido de una caída abrupta de corriente. Este

comportamiento se puede asociar a la respuesta dinámica del convertidor buck-boost implementado en el sistema, encargado de mantener la condición de descarga establecida.

Desde el punto de vista térmico, la temperatura de la batería muestra un incremento gradual durante el desarrollo del ensayo, manteniéndose cercana a la temperatura ambiente. Sin embargo, en comparación con la prueba de descarga al 50%, se observa una mayor diferencia entre la temperatura de la batería y la ambiental, lo que evidencia el incremento térmico de acuerdo con la corriente aplicada. A pesar de todo ello, el sistema aun opera dentro de condiciones térmicamente estables.

Finalmente, la capacidad acumulada presenta un incremento continuo hasta llegar a un valor de 2.54 Ah al finalizar la prueba, evidenciando un comportamiento estable y coherente con la tasa aplicada, lo que permite verificar que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

4.1.8 Prueba de descarga al 65% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba realizada bajo una tasa de descarga del 65 % presenta un tiempo teórico aproximado de 1 hora con 50 minutos aproximadamente, en donde la duración efectiva fue de 1 hora con 12 minutos, registrándose alrededor de 4341 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 25 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba, donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

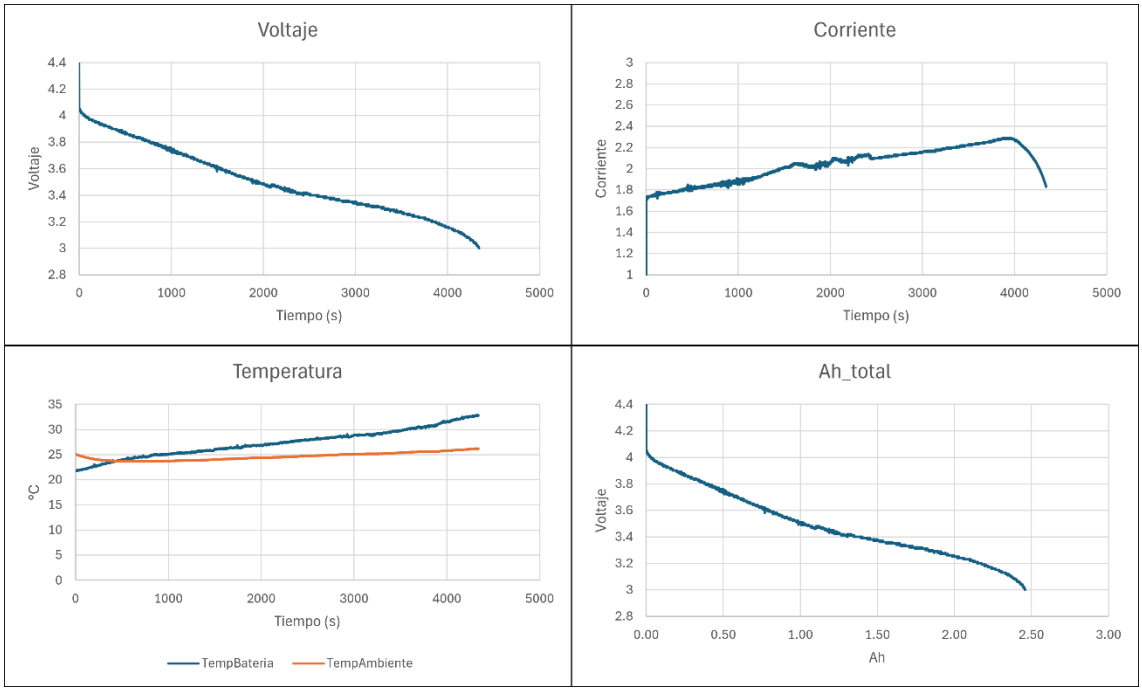


Figura 25 *Resultados al 65% de la capacidad nominal*

En la Figura 26, el voltaje presenta una disminución progresiva a lo largo del proceso de descarga, manteniendo una pendiente moderada durante la mayor parte del ensayo.

Por su parte, la corriente de descarga muestra una tendencia creciente y mayormente estable alrededor de 0.5 A aproximadamente durante gran parte del ensayo, seguido de una caída abrupta en su sección final. Este comportamiento puede asociarse a la respuesta dinámica del convertidor buck-boost implementado en el sistema, el cual ajusta sus condiciones de operación para mantener los parámetros especificados a medida que el voltaje de la batería disminuye.

Desde el punto de vista térmico, la temperatura de la batería presenta una tendencia creciente notable en comparación a la temperatura ambiental. En donde al finalizar la prueba, se puede evidenciar una diferencia aproximada de 10 °C entre la temperatura de la batería y la ambiental, lo que indica que el sistema empieza a operar en condiciones térmicamente más exigentes.

Finalmente, la capacidad acumulada presenta un incremento continuo hasta llegar a un valor de 2.46 Ah al finalizar el proceso de descarga, evidenciando un comportamiento estable y coherente con la tasa aplicada, lo que permite verificar que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

4.1.9 Prueba de descarga al 100% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba realizada bajo una tasa de descarga del 100 % presenta un tiempo teórico de 1 hora aproximadamente, en donde el tiempo efectivo fue de 51 minutos, registrándose alrededor de 3070 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 26 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba, donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

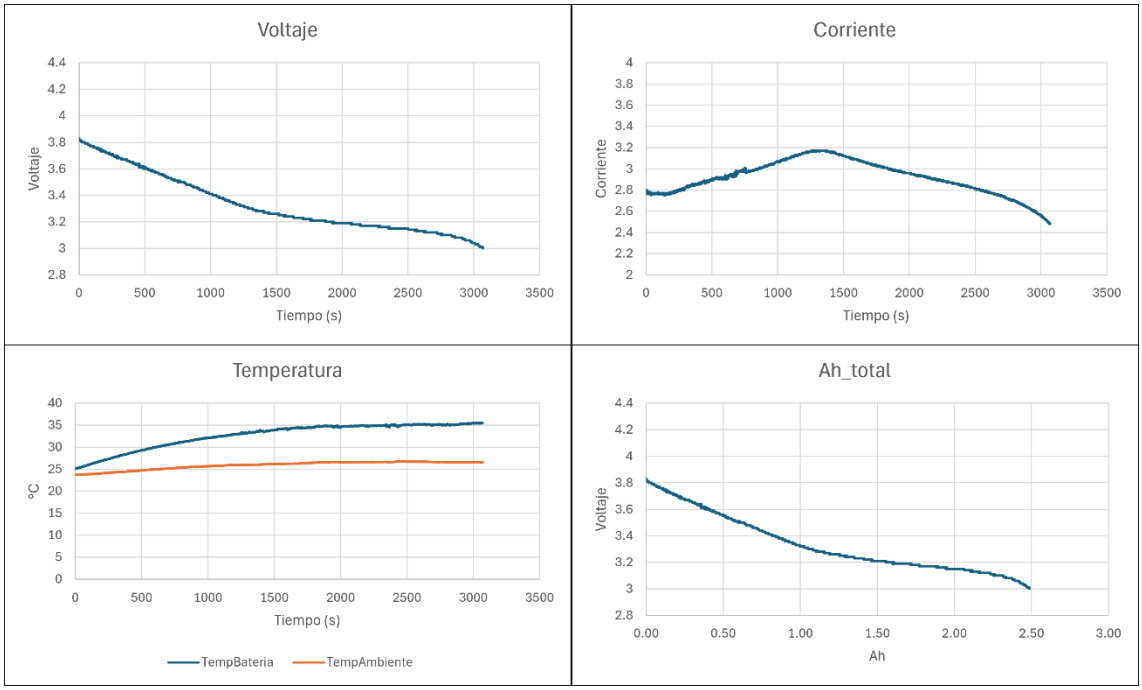


Figura 26 *Resultados al 100% de la capacidad nominal*

En la Figura 26, el voltaje muestra una disminución progresiva durante el proceso de descarga, manteniendo una pendiente más pronunciada en comparación con las pruebas a menores tasas, siendo este comportamiento el que confirma que la batería está siendo sometida a una mayor exigencia durante el ensayo.

En cuanto a la corriente, se identifican dos secciones claramente diferenciadas; una primera etapa con tendencia creciente alrededor de 0.4 A, seguida de una etapa con tendencia decreciente. Este comportamiento puede asociarse tanto a la respuesta dinámica del convertidor buck-boost implementado en el sistema encargado de mantener la condición de descarga establecida, como también de la disminución progresiva del voltaje de la batería a medida que avanza el proceso.

Desde el punto de vista térmico, la temperatura de la batería evidencia un incremento significativo respecto a la temperatura ambiente, especialmente durante la primera etapa de la descarga, estabilizándose posteriormente conforme avanza el ensayo. El comportamiento presentado evidencia que la corriente aplicada genera condiciones térmicas más exigentes en la batería en comparación con pruebas anteriores.

Finalmente, la capacidad acumulada presenta un incremento continuo hasta llegar a un valor de 2.49 Ah al final de la prueba, reflejando un proceso de descarga estable bajo condiciones de alta demanda, verificando que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

4.1.10 Prueba de descarga al 120% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba realizada bajo una tasa de descarga del 120 % presenta un tiempo teórico aproximado de 50 minutos aproximadamente, en donde el tiempo efecto fue de 49 minutos, registrándose alrededor de 2977 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 27 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba, donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

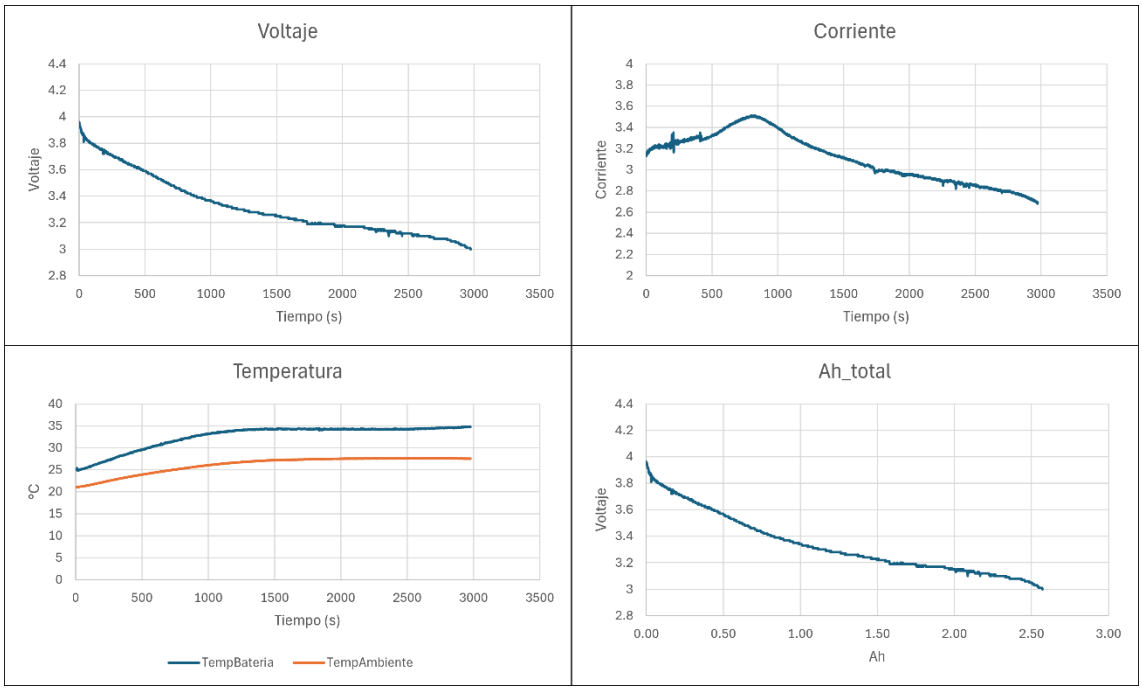


Figura 27 *Resultados al 120% de la capacidad nominal*

En la Figura 27, el voltaje evidencia una disminución progresiva a lo largo del proceso de descarga, manteniendo una pendiente más pronunciada, siendo este comportamiento el que confirma que la batería está siendo sometida a una mayor exigencia durante el ensayo.

En cuanto a la corriente, se distinguen dos secciones claramente definidas: una primera etapa corta con una tendencia creciente alrededor de 0.3 A, en la que se aprecian ciertas fluctuaciones atribuibles a ruido en el sensor. Posteriormente, le prosigue una etapa predominantemente decreciente, comportamiento se puede asociar tanto a la respuesta dinámica del convertidor buck-boost, encargado de mantener la condición de descarga establecida como a la disminución progresiva del voltaje de la batería conforme avanza el ensayo.

Desde el punto de vista térmico, la temperatura de la batería presenta un incremento notable durante el desarrollo de la prueba, en donde inicialmente se observa una sección creciente, seguida de una tendencia más estable y lineal hasta la finalización del ensayo, evidenciando de esta manera que existe una operación térmicamente más exigente, coherente con la corriente aplicada.

Finalmente, la capacidad acumulada presenta un incremento continuo hasta llegar a un valor de 2.57 Ah al final de la prueba, evidenciando un proceso de descarga estable y coherente con la tasa de descarga aplicada, lo que verifica que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

4.1.11 Prueba de descarga al 150% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba realizada bajo una tasa de descarga del 150 % presenta un tiempo teórico de 45 minutos aproximadamente, en donde el tiempo efectivo de la misma fue de 42 minutos, registrándose alrededor de 2502 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 28 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba, donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

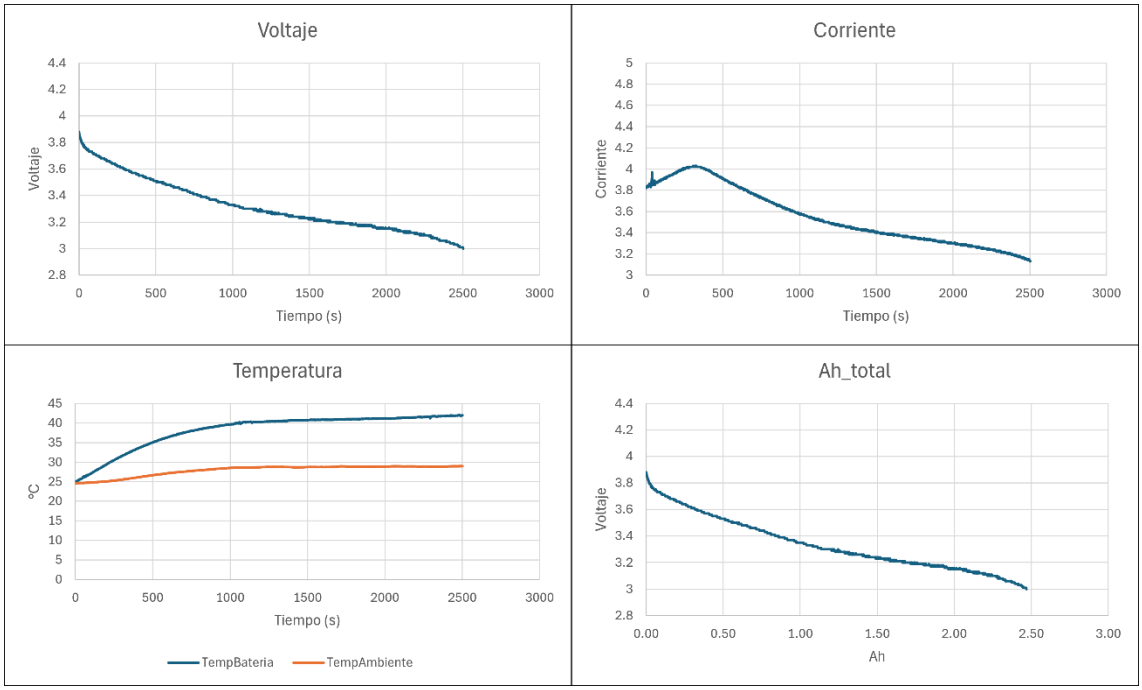


Figura 28 *Resultados al 150% de la capacidad nominal*

En la Figura 28, el voltaje presenta una disminución progresiva a lo largo del proceso de descarga, evidenciando una pendiente más pronunciada con pruebas de menor exigencia.

En cuanto a la corriente, se distinguen dos secciones: una primera etapa corta con tendencia creciente y estable alrededor de 0.2 A, seguida de una etapa con tendencia decreciente. Este comportamiento se puede asociar tanto a la respuesta dinámica del convertidor buck-boost encargado de mantener la condición de descarga establecida como a la disminución progresiva del voltaje de la batería conforme avanza la prueba.

Desde el punto de vista térmico, la temperatura de la batería evidencia un incremento significativo respecto a la temperatura ambiental, alcanzando valores cercanos a 40 °C al finalizar la prueba. La curva térmica presenta una sección inicial creciente seguida de una etapa más lineal y estable, siendo este comportamiento el que evidencia que la corriente aplicada genera mayores condiciones térmicamente más exigentes.

Finalmente, la capacidad acumulada presenta un incremento continuo durante el ensayo hasta llegar a un valor de 2.47 Ah al finalizar la prueba, evidenciando un proceso de descarga estable bajo condiciones de alta demanda, lo que verifica que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

4.1.12 Prueba de descarga al 200% de la capacidad nominal (2.6 Ah)

La prueba realizada bajo una tasa de descarga del 200 % presentó un tiempo teórico de 30 minutos aproximadamente, en donde el tiempo efectivo de la prueba fue de 32 minutos, registrándose alrededor de 1931 muestras experimentales con un intervalo de adquisición de 1 s. La Figura 29 muestra los resultados obtenidos para la presente prueba, donde se incluyen las variaciones de voltaje, corriente y temperatura en función del tiempo, así como también la capacidad acumulada en amperio-hora (Ah) calculada.

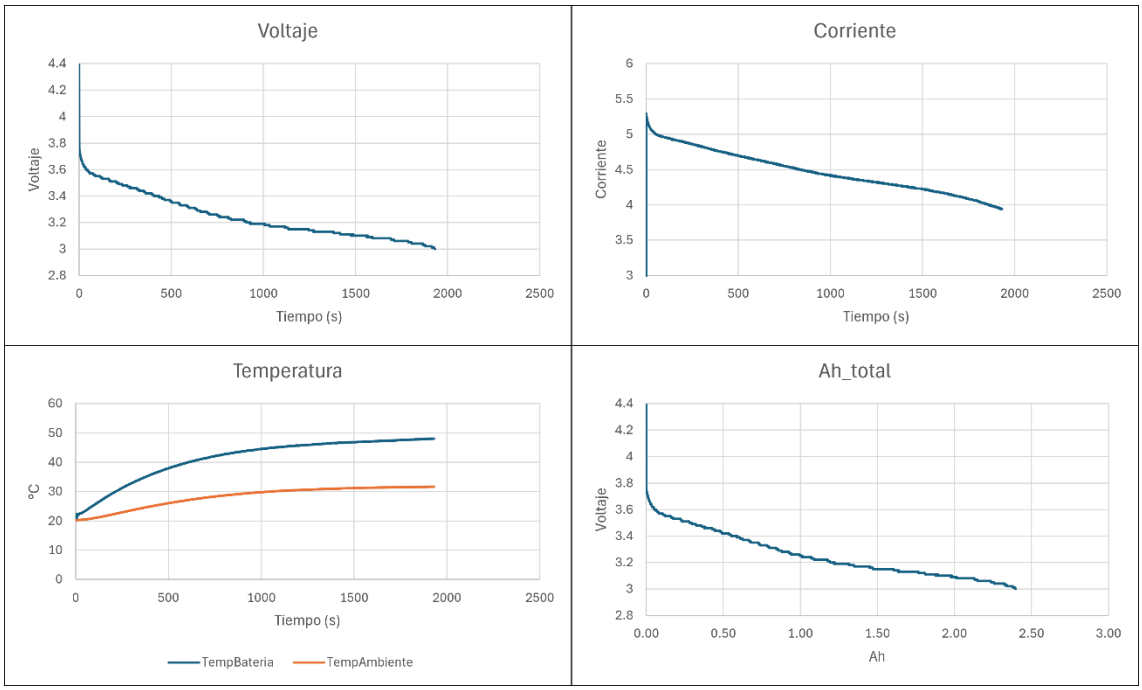


Figura 29 *Resultados al 200% de la capacidad nominal*

En la Figura 29, el voltaje presenta una disminución progresiva durante el proceso de descarga, con una pendiente más pronunciada en comparación con pruebas de menor exigencia, lo que confirma que la batería opera bajo una condición de máxima demanda durante el ensayo.

En cuanto a la corriente, se observa que alcanza valores elevados al inicio de la prueba y va reduciendo de manera gradual conforme avanza la prueba. Este comportamiento se puede asociar a que el convertidor buck-boost opera fuera de su rango óptimo de regulación debido a la alta corriente aplicada y a la reducción progresiva del voltaje de la batería, lo que da como resultado que el sistema no logre mantener los valores de descarga establecidos.

Desde el punto de vista térmico, la temperatura de la batería evidencia un incremento significativo a lo largo del ensayo, alcanzando valores cercanos a los 50 °C al finalizar la prueba. Dando como resultado que este aumento considerable con respecto a la temperatura ambiental refleje una condición térmicamente más exigente, directamente relacional con la corriente aplicada.

Finalmente, la capacidad acumulada presenta un incremento continuo hasta llegar a un valor de 2.40 Ah al finalizar de la prueba, evidenciando un proceso de descarga estable bajo condiciones de máxima demanda, lo que verifica que la capacidad entregada es consistente con la especificada por el fabricante.

En conclusión, los resultados experimentales obtenidos en las diferentes pruebas de descarga permiten evidenciar un comportamiento coherente entre el tiempo de descarga, la corriente aplicada y la capacidad entregada por la batería, validando el correcto funcionamiento del prototipo desarrollado en su totalidad. Las variaciones observadas en los tiempos reales respecto a los teóricos se encuentran dentro de los rangos esperados, considerando las condiciones reales de operación del sistema como también de la presencia del convertidor en el proceso de descarga.

Adicionalmente, se identificó que las pruebas realizadas a partir de una tasa de descarga del 30 % presentan una desviación sistemática en la medición de corriente, iniciando aproximadamente 0.2 A por debajo del valor esperado. Por esta razón, para dichas tasas se aplicó una corrección en la corriente medida antes del cálculo de la capacidad acumulado, por lo que las gráficas y valores presentados en esta sección corresponden a datos ya corregidos. En contraste, las pruebas efectuadas por debajo del 30 % no requirieron ajuste, al no evidenciar desviaciones significativas.

4.2 Análisis comparativo global de las pruebas

En esta sección se presenta un análisis comparativo global de los resultados experimentales obtenidos en las diferentes pruebas de descarga realizadas con el prototipo. El análisis integra la capacidad descargada en amperios-hora (Ah), el estado de descarga (SoD) y el comportamiento térmico, con el propósito de evaluar la influencia de la tasa de descarga y verificar la consistencia del sistema de medición implementado.

4.2.1 Comparativa de la capacidad descargada (Ah)

Una vez analizados de forma individual los resultados obtenidos en cada prueba, se realiza una evaluación conjunta de la capacidad descargada con el fin de visualizar el comportamiento global de las baterías bajo las distintas tasas de descarga aplicadas, siendo la capacidad entregada en amperios-hora (Ah) un parámetro clave para comparar el desempeño del sistema y la coherencia de los datos experimentales.

La Figura 30 presenta la gráfica grupal de capacidad correspondiente a todas las pruebas realizadas, la cual permite contrastar los resultados obtenidos con la curva de referencia mostrada en la Figura 17.

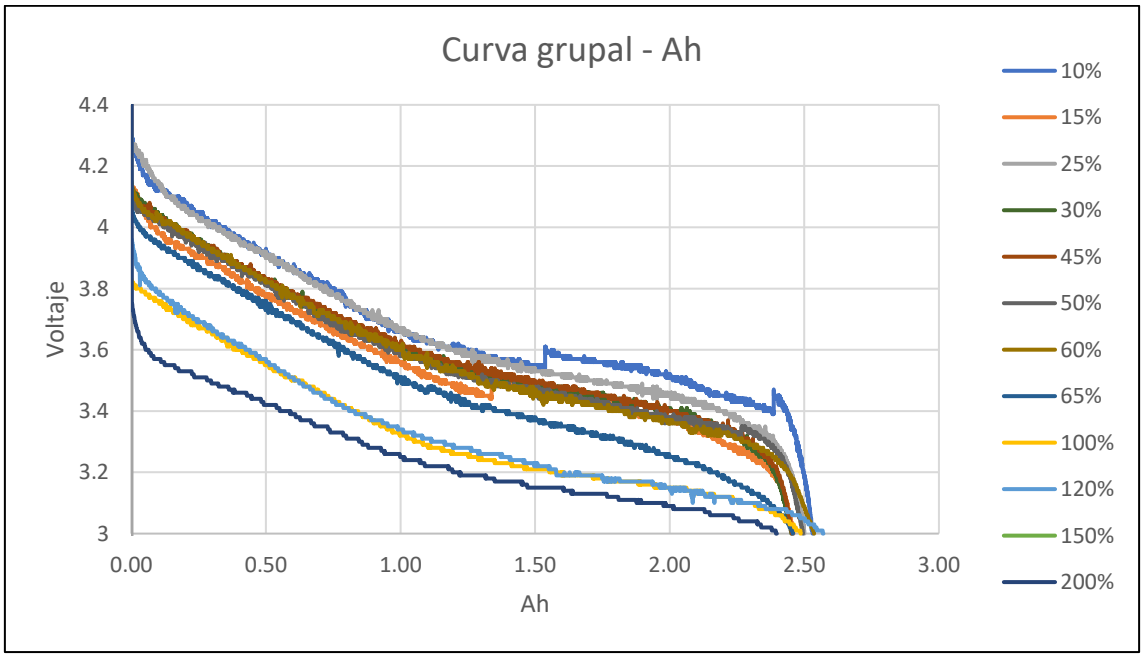


Figura 30 *Curvas de capacidad (Ah) a distintas tasas de descarga*

Al comparar la Figura 30 con la Figura 17, se observa una tendencia general consistente en el comportamiento de descarga de las baterías, caracterizada por una caída progresiva

del voltaje a medida que aumenta la capacidad entregada y una región de descenso pronunciado cercana al voltaje de corte, comportamiento típico de baterías Li-ion tipo 18650.

En términos generales, las curvas experimentales reproducen adecuadamente la forma característica observada en la referencia, incluyendo la pendiente inicial, la región intermedia de descarga y el descenso abrupto cercano al voltaje de corte. Las ligeras diferencias en los valores de capacidad entregada pueden atribuirse a condiciones propias del ensayo experimental, como la influencia del convertidor de descarga, las pérdidas internas del sistema y las tolerancias de los sensores utilizados, sin alterar la tendencia global de los resultados.

En conjunto, la comparativa de capacidad descargada evidencia una adecuada coherencia entre las pruebas realizadas, lo que confirma la consistencia de las mediciones obtenidas mediante el prototipo.

4.2.2 Comparativa del Estado de Descarga (SoD)

Una vez analizado el comportamiento individual de las pruebas, se presenta la comparativa global del estado de descarga (SoD) con el fin de evaluar la evolución del voltaje en función del avance de la descarga para las distintas tasas aplicadas. El SoD permite representar de manera normalizada el progreso del proceso de descarga, facilitando la comparación directa entre ensayos con diferentes duraciones y corrientes de descarga.

La Figura 31 muestra las curvas Voltaje vs SoD correspondientes a todas las pruebas realizadas, siendo esta representación la que permite analizar la coherencia del cálculo del estado de descarga y la relación entre el voltaje de la batería y el porcentaje de descarga alcanzado.

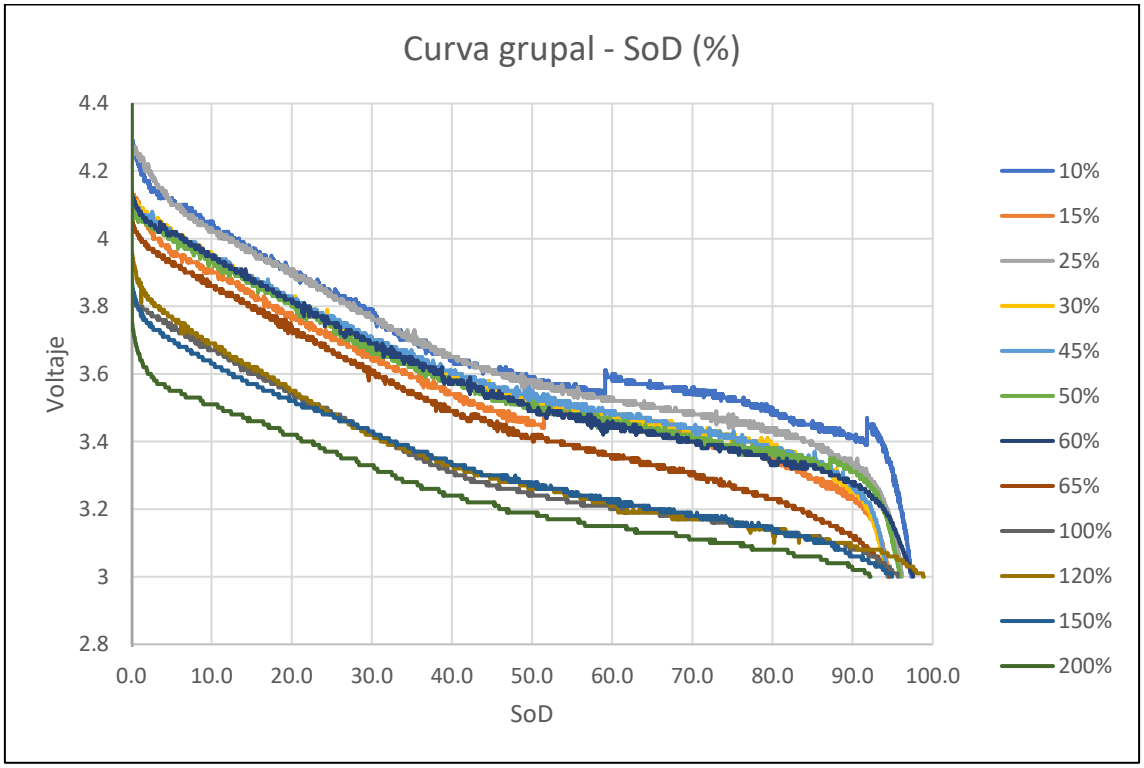


Figura 31 *Curvas Voltaje vs SoD para distintas tasas de descarga*

Al analizar las curvas presentadas en la Figura 31, se observa un comportamiento consistente entre las distintas pruebas, caracterizado por una disminución progresiva del voltaje conforme aumenta el SoD. En la región inicial de descarga se aprecia una caída de voltaje más pronunciada, seguida de una zona intermedia con pendiente moderada y, finalmente, un descenso abrupto del voltaje cercano al final de la descarga, comportamiento característico de baterías Li-ion tipo 18650.

Las diferencias observadas entre las curvas para distintas tasas de descarga se asocian principalmente al efecto de la corriente aplicada sobre el voltaje de la batería, evidenciando mayores caídas de voltaje para tasas de descarga más elevadas. No obstante, la forma general de las curvas se mantiene consistente, lo que indica una adecuada estimación del estado de descarga a partir de los datos experimentales registrados.

En conjunto, la comparativa del SoD evidencia una evolución coherente del voltaje en función del porcentaje de descarga para todas las pruebas realizadas, lo que respalda la consistencia del método de cálculo del estado de descarga implementado en el prototipo.

4.2.3 Análisis térmico comparativo

Con el fin de evaluar el comportamiento térmico de las baterías durante las pruebas de descarga, se presenta un análisis comparativo de la evolución de la temperatura en función del tiempo para las distintas tasas de descarga aplicadas. La temperatura constituye una variable crítica, ya que permite analizar la influencia del régimen de descarga sobre el calentamiento de la batería y verificar condiciones de operación seguras durante el proceso experimental.

La Figura 32 muestra las curvas de temperatura en función del tiempo correspondientes a todas las pruebas realizadas. Esta representación permite comparar directamente la respuesta térmica de la batería bajo diferentes condiciones de descarga, considerando tanto la magnitud del incremento de temperatura como su evolución temporal.

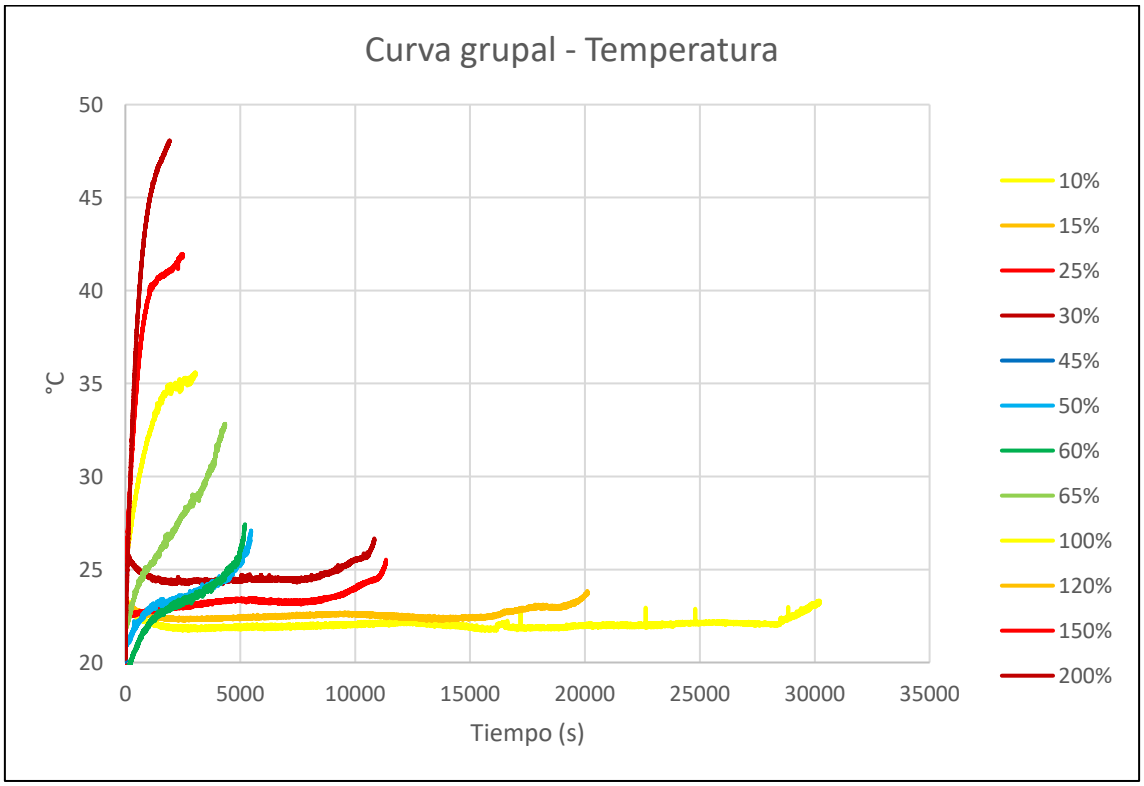


Figura 32 *Curvas de temperatura vs tiempo para distintas tasas de descarga*

A partir del análisis de las curvas presentadas en la Figura 32, se observa que las pruebas realizadas a tasas de descarga más elevadas presentan incrementos de temperatura más rápidos y valores máximos superiores, asociados al aumento de la corriente de descarga y a las pérdidas internas del sistema. Por el contrario, en las pruebas con tasas de descarga

menores, la temperatura muestra una variación gradual y se mantiene cercana a valores estables durante gran parte del ensayo.

Asimismo, se evidencia que, para todas las pruebas, el incremento de temperatura se mantiene dentro de rangos esperados para baterías Li-ion tipo 18650 sometidas a procesos de descarga controlados, sin observarse comportamientos térmicos abruptos o inestables. Las diferencias entre curvas reflejan de manera coherente la relación entre tasa de descarga, tiempo de operación y generación de calor.

En conjunto, el análisis térmico comparativo permite identificar una respuesta térmica consistente del sistema frente a las distintas condiciones de descarga, aportando información relevante sobre el comportamiento térmico de las baterías durante las pruebas realizadas.

En conclusión, los resultados experimentales y el análisis comparativo desarrollado en este capítulo permiten validar el correcto funcionamiento del prototipo de descargas múltiples para la caracterización de baterías Li-ion. La coherencia observada en las curvas de capacidad descargada (Ah), estado de descarga (SoD) y comportamiento térmico para las distintas tasas de descarga evidencia que el sistema es capaz de medir y procesar de manera consistente las variables eléctricas y térmicas involucradas en el proceso de descarga.

Asimismo, la similitud estructural entre las curvas experimentales obtenidas y las curvas de referencia empleadas confirma que el prototipo reproduce adecuadamente el comportamiento característico de descarga de baterías Li-ion tipo 18650. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema desarrollado presenta un nivel de estabilidad, precisión y confiabilidad adecuado para su aplicación en procesos de análisis experimental y caracterización comparativa de baterías, cumpliendo con los objetivos planteados en el desarrollo del proyecto.

Por otro lado, a partir de los resultados obtenidos y de la experiencia adquirida durante el desarrollo y validación del prototipo, se identifican diversas líneas de trabajo futuro orientadas a profundizar el análisis experimental. Una de las principales extensiones del proyecto consiste en incrementar el número de repeticiones de cada prueba de descarga, con el objetivo de evaluar la repetibilidad de los resultados y verificar si el

comportamiento eléctrico y térmico de las baterías se mantiene constante bajo las mismas condiciones de ensayo.

Además, se propone la realización de un mayor número de ciclos de carga y descarga para una misma batería, lo que permitiría analizar la evolución de la capacidad descargada, el estado de descarga y el comportamiento térmico a lo largo del tiempo. Este enfoque posibilitaría estudiar el proceso de degradación y estimar parámetros asociados al tiempo de vida útil de las baterías Li-ion, utilizando el prototipo como herramienta de caracterización experimental.

Conclusiones

El prototipo de descargas múltiples permite la caracterización simultánea de hasta tres baterías Li-ion tipo 18650, integrando el Arduino Mega para la adquisición de datos y una interfaz en MATLAB/App Designer para la visualización y almacenamiento en tiempo real. Adicionalmente, las pruebas experimentales realizadas entre el 10% y el 200% de la capacidad nominal permitieron obtener perfiles de voltaje, corriente y temperatura de manera directa, mientras que, de manera indirecta mediante cálculo en Excel, se obtuvieron los perfiles de capacidad y estado de descarga. Estos resultados evidenciaron una alta concordancia entre los datos obtenidos y la curva de referencia técnica, lo cual valida la precisión del sistema y confirma que se obtienen resultados confiables en condiciones reales de operación.

La investigación permitió concluir que el monitoreo térmico y los test de capacidad constituyen herramientas de caracterización no invasiva confiables para determinar el estado de salud (SoH) de las celdas Li-ion. Los resultados evidencian una relación directa y medible entre la tasa de descarga y el estrés térmico, registrándose elevaciones de temperatura de hasta 50 °C en condiciones de máxima exigencia (200%), siendo este comportamiento el que permite identificar procesos de degradación y establecer límites de seguridad operativa, generando una base técnica sólida para que, en trabajos futuros, se pueda estimar la vida útil remanente y analizar la viabilidad de estas baterías en aplicaciones de segunda vida.

Recomendaciones

Para mejorar el desempeño del prototipo, se recomienda incorporar algoritmos de compensación o filtros de hardware que corrijan la desviación de 0.2 A detectada en corrientes superiores al 30%, así como aplicar filtros digitales más robustos para reducir el ruido en las mediciones de temperatura, voltaje y corriente, garantizando señales más estables y precisas para el análisis.

Desde el punto de vista metodológico, se sugiere aumentar el número de repeticiones y ciclos completos de carga y descarga, con el fin de evaluar la repetibilidad, analizar con mayor profundidad la degradación electroquímica y estimar parámetros relacionados con la vida útil, consolidando así el prototipo como una herramienta experimental más sólida para el estudio del envejecimiento de baterías Li-ion.

Referencias bibliográficas.

[1] D. Administración de Empresas y A. Carlota Rodríguez Hebles Director, "Modelado del mercado del litio", 2024, Consultado: el 20 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/77774

[2] A. Soto Cabria, "Analysis and characterisation of lithium-ion batteries for the integration of renewable energies: modelling, energy management and applications", oct. 2022, doi: 10.48035/TESIS/2454/44257.

[3] J. Jaguemont y F. Bardé, "A critical review of lithium-ion battery safety testing and standards", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 231, p. 121014, ago. 2023, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.121014.

[4] Connor y Phoebe, "An Analysis of Lithium-ion Battery Fires in Waste Management and Recycling", 2021. Consultado: el 24 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-08/lithium-ion-battery-report-update-7.01_508.pdf

[5] G. Bandini, G. Caposciutti, M. Marracci, A. Buffi, y B. Tellini, "Characterization of lithium-batteries for high power applications", *J. Energy Storage*, vol. 50, p. 104607, jun. 2022, doi: 10.1016/J.EST.2022.104607.

[6] J. J. M. Hidalgo, "Tecnologías de almacenamiento de energía con enfasís en electroquímica", ene. 2019.

[7] H. (Claire) Xiong, E. J. Dufek, y K. L. Gering, "Batteries", en *Comprehensive Energy Systems: Volumes 1-5*, vol. 2, Elsevier, 2018, pp. V2-629-V2-662. doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00245-5.

[8] A. M. R. Carrillo, M. G. Ortiz, y J. E. Thomas, "Baterías de ion litio: presente y futuro", en *El litio en la Argentina: visiones y aportes multidisciplinarios desde la UNLP*, 2020, pp. 181–196. [En línea]. Disponible en: https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/141388

[9] M. V Reddy, A. Mauger, C. M. Julien, A. Paolella, y K. Zaghib, "Brief history of early lithium-battery development", *Materials*, vol. 13, núm. 8, ene. 2020, doi: 10.3390/MA13081884.

[10] K. Mizushima, P. C. Jones, P. J. Wiseman, y J. B. Goodenough, “LixCoO 2 (0<x~l): A NEW CATHODE MATERIAL FOR BATTERIES OF HIGH ENERGY DENSITY”, 1980.

[11] InkWoodResearch, “GLOBAL BATTERY MARKET FORECAST 2024-2032”, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.inkwoodresearch.com/reports/battery-market/

[12] J. Fleischmann *et al.*, “Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular”, ene. 2023.

[13] D. Stenclik, P. Denholm, y B. R. Chalamala, “The Role of Energy Storage for Renewable Integration”, 2017.

[14] O. M. de la Salud - OMS, “Reciclaje de baterías de plomo-ácido usadas: breve reseña para el sector sanitario”, 2017.

[15] George. Heaton, *Training course: ecologically sustainable industrial development*. UNIDO ; [United Nations], 1994.

[16] B. B. McKeon, J. Furukawa, y S. Fenstermacher, “Advanced lead-acid batteries and the development of grid-scale energy storage systems”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, núm. 6, pp. 951–963, 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2316823.

[17] D. K. Sarkar, “Steam Power Plant Systems”, *Thermal Power Plant*, pp. 315–354, ene. 2015, doi: 10.1016/B978-0-12-801575-9.00009-3.

[18] E. Blumbergs, V. Serga, E. Platacis, M. Maiorov, y A. Shishkin, “Cadmium Recovery from Spent Ni-Cd Batteries: A Brief Review”, *Metals 2021, Vol. 11, Page 1714*, vol. 11, núm. 11, p. 1714, ene. 2021, doi: 10.3390/MET11111714.

[19] Z. Abdin y K. R. Khalilpour, “Single and Polystorage Technologies for Renewable-Based Hybrid Energy Systems”, *Polygeneration with Polystorage: For Chemical and Energy Hubs*, pp. 77–131, ene. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-813306-4.00004-5.

[20] M. R. B. Portero y M. H. P. sinchi, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO SEMIAUTOMÁTICO DE MONITOREO DE VOLTAJE Y CONTROL DE TEMPERATURA PARA BATERÍAS NÍQUEL-CADMIO”, 2024.

[21] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, y J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation”, *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511–536, ene. 2015, doi: 10.1016/J.APENERGY.2014.09.081.

[22] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, y Y. Ding, “Progress in electrical energy storage system: A critical review”, *Progress in Natural Science*, vol. 19, núm. 3, pp. 291–312, ene. 2009, doi: 10.1016/J.PNSC.2008.07.014.

[23] P. Breeze, “Large-Scale Batteries”, *Power System Energy Storage Technologies*, pp. 33–45, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-812902-9.00004-3.

[24] A. B. Béléké, E. Higuchi, H. Inoue, y M. Mizuhata, “Durability of nickel–metal hydride (Ni–MH) battery cathode using nickel–aluminum layered double hydroxide/carbon (Ni–Al LDH/C) composite”, *J. Power Sources*, vol. 247, pp. 572–578, ene. 2014, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2013.08.001.

[25] J. Kang, F. Yan, P. Zhang, y C. Du, “Comparison of comprehensive properties of Ni-MH (nickel-metal hydride) and Li-ion (lithium-ion) batteries in terms of energy efficiency”, *Energy*, vol. 70, pp. 618–625, ene. 2014, doi: 10.1016/J.ENERGY.2014.04.038.

[26] J. Islam *et al.*, “Rechargeable metal-metal alkaline batteries: Recent advances, current issues and future research strategies”, *J. Power Sources*, vol. 563, p. 232777, ene. 2023, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2023.232777.

[27] T. Ikemoto, “Lithium batteries - Secondary systems – Lithium-ion systems | Separators”, *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, 2024, doi: 10.1016/B978-0-323-96022-9.00268-1.

[28] S. Visco, E. Nimon, y L. De Jonghe, “Exploratory batterie system | Lithium–air”, *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, 2024, doi: 10.1016/B978-0-323-96022-9.00299-1.

[29] de Obaldía, E. V. Quintero, y O. Auciello, "Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones Lithium Ion Batteries: features and applications", *Periodicidad: Semestral*, vol. 17, núm. 1, p. 2021, 2021.

[30] MarketsAndMarkets, "Lithium-ion Battery Market Size, Share, Industry Trends and Growth Analysis 2033", enero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/lithium-ion-battery-market-49714593.html?utm_source=chatgpt.com

[31] Sinjin Dixon-Warren, "The World of Lithium Ion Batteries - Technical Articles". Consultado: el 15 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://eepower.com/technical-articles/changing-the-world-with-lithium-ion-batteries/

[32] "Los 4 componentes principales de la batería de iones de litio - Blog - Hopax Fine Chemicals". Consultado: el 28 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.hopaxfc.com/en/blog/the-4-major-components-of-the-lithium-ion-battery

[33] M. H. Braga y J. F. Rodrigues, "O lítio e a bateria de ião-Li", *Revista de Ciência Elementar*, vol. 8, núm. 3, sep. 2020, doi: 10.24927/RCE2020.033.

[34] G. Iulian, D. Directora, L. Garcia, S. Codirector, H. Francisco, y A. Sudzuki, "Caracterización y separación de componentes de baterías Li-Ion, por encima de 500 µm", jul. 2023, Consultado: el 15 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/handle/2117/396177

[35] A. Ghafari, "Current and future prospects of Li-ion batteries: A review", *Journal of NanoScience Technology*, 2023, doi: 10.52319/J.NANOSCITEC.2023.21.

[36] T. Wulandari, D. Fawcett, S. B. Majumder, y G. E. J. Poinern, "Lithium-based batteries, history, current status, challenges, and future perspectives", *Battery Energy*, vol. 2, núm. 6, p. 20230030, nov. 2023, doi: 10.1002/BTE2.20230030.

[37] N. Wang *et al.*, "N-doped catalytic graphitized hard carbon for high-performance lithium/sodium-ion batteries", *Scientific Reports 2018 8:1*, vol. 8, núm. 1, pp. 1–8, jul. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-28310-3.

[38] R. Ding *et al.*, "Carbon Anode Materials for Rechargeable Alkali Metal Ion Batteries and in-situ Characterization Techniques", *Front. Chem.*, vol. 8, p. 607504, dic. 2020, doi: 10.3389/FCHEM.2020.607504/BIBTEX.

[39] M. Armand *et al.*, "Lithium-ion batteries – Current state of the art and anticipated developments", *J. Power Sources*, vol. 479, p. 228708, dic. 2020, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2020.228708.

[40] Q. Shi *et al.*, "A review of recent developments in Si/C composite materials for Li-ion batteries", *Energy Storage Mater.*, vol. 34, pp. 735–754, ene. 2021, doi: 10.1016/J.ENSM.2020.10.026.

[41] H. Cheng, J. G. Shapter, Y. Li, y G. Gao, "Recent progress of advanced anode materials of lithium-ion batteries", *Journal of Energy Chemistry*, vol. 57, pp. 451–468, jun. 2021, doi: 10.1016/J.JECHEM.2020.08.056.

[42] C. Zhang *et al.*, "Challenges and Recent Progress on Silicon-Based Anode Materials for Next-Generation Lithium-Ion Batteries", *Small Struct.*, vol. 2, núm. 6, p. 2100009, jun. 2021, doi: 10.1002/SSTR.202100009.

[43] Y. Wu, X. Li, Q. Xiao, G. Lei, Z. Li, y J. Guan, "The coaxial MnO2/CNTs nanocomposite freestanding membrane on SSM substrate as anode materials in high performance lithium ion batteries", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 834, pp. 161–166, feb. 2019, doi: 10.1016/J.JELECHEM.2019.01.001.

[44] N. Mohamed y N. K. Allam, "Recent advances in the design of cathode materials for Li-ion batteries", *RSC Adv.*, vol. 10, núm. 37, pp. 21662–21685, jun. 2020, doi: 10.1039/D0RA03314F.

[45] Z. Ren, X. Shi, y Z.-S. Wu, "Recent advancements and next of aqueous rechargeable lithium-ion batteries", *Next Energy*, vol. 1, núm. 4, p. 100068, ene. 2023, doi: 10.1016/J.NXENER.2023.100068.

[46] Y. Song, L. Sheng, L. Wang, H. Xu, y X. He, "From separator to membrane: Separators can function more in lithium ion batteries", *Electrochem. commun.*, vol. 124, p. 106948, mar. 2021, doi: 10.1016/J.ELECOM.2021.106948.

[47] C. M. Costa, Y. H. Lee, J. H. Kim, S. Y. Lee, y S. Lanceros-Méndez, "Recent advances on separator membranes for lithium-ion battery applications: From porous membranes to solid electrolytes", *Energy Storage Mater.*, vol. 22, pp. 346–375, nov. 2019, doi: 10.1016/J.ENSM.2019.07.024.

[48] J. Jang, J. Oh, H. Jeong, W. Kang, y C. Jo, "A Review of Functional Separators for Lithium Metal Battery Applications", *Materials*, vol. 13, núm. 20, p. 4625, oct. 2020, doi: 10.3390/MA13204625.

[49] "BU-205: Tipos de baterías de iones de litio - Universidad de Baterías". Consultado: el 19 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion

[50] A. K. Koech, G. Mwandila, F. Mulolani, y P. Mwaanga, "Lithium-ion battery fundamentals and exploration of cathode materials: A review", *S. Afr. J. Chem. Eng.*, vol. 50, pp. 321–339, oct. 2024, doi: 10.1016/J.SAJCE.2024.09.008.

[51] J. J. Fang *et al.*, "Surface Structures and Properties of High-Voltage $LiCoO_2$: Reviews and Prospects", *Journal of Electrochemistry*, vol. 30, núm. 6, pp. 231–400, 2024, doi: 10.61558/2993-074X.3445.

[52] C. Gervillié-Mouravieff, W. Bao, D. A. Steingart, y Y. S. Meng, "Non-destructive characterization techniques for battery performance and lifecycle assessment", *Nature Reviews Electrical Engineering*, vol. 1, núm. 8, pp. 547–558, oct. 2023, doi: 10.1038/s44287-024-00069-y.

[53] X. C. A. Chacón, S. Laureti, M. Ricci, y G. Cappuccino, "A Review of Non-Destructive Techniques for Lithium-Ion Battery Performance Analysis", *World Electric Vehicle Journal 2023, Vol. 14, Page 305*, vol. 14, núm. 11, p. 305, nov. 2023, doi: 10.3390/WEVJ14110305.

[54] A. Barai *et al.*, "A comparison of methodologies for the non-invasive characterisation of commercial Li-ion cells", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 72, pp. 1–31, may 2019, doi: 10.1016/J.PECS.2019.01.001.

[55] C. Pastor-Fernández, T. F. Yu, W. D. Widanage, y J. Marco, "Critical review of non-invasive diagnosis techniques for quantification of degradation modes in

lithium-ion batteries", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 109, pp. 138–159, jul. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2019.03.060.

[56] W. Choi, H. C. Shin, J. M. Kim, J. Y. Choi, y W. S. Yoon, "Modeling and Applications of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) for Lithium-ion Batteries", *Journal of Electrochemical Science and Technology*, vol. 11, núm. 1, pp. 1–13, feb. 2020, doi: 10.33961/JECST.2019.00528.

[57] D. Li, L. Wang, C. Duan, Q. Li, y K. Wang, "Temperature prediction of lithium-ion batteries based on electrochemical impedance spectrum: A review", *Int. J. Energy Res.*, vol. 46, núm. 8, pp. 10372–10388, jun. 2022, doi: 10.1002/ER.7905.

[58] A. Moradpour, M. Kasper, J. Hoffmann, y F. Kienberger, "Measurement Uncertainty in Battery Electrochemical Impedance Spectroscopy", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3198466.

[59] J. He, X. Bian, L. Liu, Z. Wei, y F. Yan, "Comparative study of curve determination methods for incremental capacity analysis and state of health estimation of lithium-ion battery", *J. Energy Storage*, vol. 29, p. 101400, jun. 2020, doi: 10.1016/J.EST.2020.101400.

[60] F. Xia, K. Wang, y J. Chen, "State of health and remaining useful life prediction of lithium-ion batteries based on a disturbance-free incremental capacity and differential voltage analysis method", *J. Energy Storage*, vol. 64, p. 107161, ago. 2023, doi: 10.1016/J.EST.2023.107161.

[61] X. Chen, H. Lei, R. Xiong, W. Shen, y R. Yang, "A novel approach to reconstruct open circuit voltage for state of charge estimation of lithium ion batteries in electric vehicles", *Appl. Energy*, vol. 255, p. 113758, dic. 2019, doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.113758.

[62] Z. Ren, C. Du, Z. Wu, J. Shao, y W. Deng, "A comparative study of the influence of different open circuit voltage tests on model-based state of charge estimation for lithium-ion batteries", *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, núm. 9, pp. 13692–13711, jul. 2021, doi:

10.1002/ER.6700;SUBPAGE:STRING:ABSTRACT;WEBSITE:WEBSITE:PERICLES;JOURNAL:JOURNAL:1099114X;WGROUP:STRING:PUBLICATION.

[63] Y. Chen, G. Yang, X. Liu, y Z. He, "A Time-Efficient and Accurate Open Circuit Voltage Estimation Method for Lithium-Ion Batteries", *Energies 2019, Vol. 12, Page 1803*, vol. 12, núm. 9, p. 1803, may 2019, doi: 10.3390/EN12091803.

[64] R. Xiao, Y. Hu, X. Jia, y G. Chen, "A novel estimation of state of charge for the lithium-ion battery in electric vehicle without open circuit voltage experiment", *Energy*, vol. 243, p. 123072, mar. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.123072.

[65] S. Wang *et al.*, "Determination of Lithium-Ion Battery Capacity for Practical Applications", *Batteries 2023, Vol. 9, Page 459*, vol. 9, núm. 9, p. 459, sep. 2023, doi: 10.3390/BATTERIES9090459.

[66] M. Dubarry y G. Baure, "Perspective on Commercial Li-ion Battery Testing, Best Practices for Simple and Effective Protocols", *Electronics 2020, Vol. 9, Page 152*, vol. 9, núm. 1, p. 152, ene. 2020, doi: 10.3390/ELECTRONICS9010152.

[67] M. M. Camboim *et al.*, "State of health estimation of second-life batteries through electrochemical impedance spectroscopy and dimensionality reduction", *J. Energy Storage*, vol. 78, p. 110063, feb. 2024, doi: 10.1016/J.EST.2023.110063.

[68] A. A. Kebede *et al.*, "Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application", *J. Energy Storage*, vol. 40, p. 102748, ago. 2021, doi: 10.1016/J.EST.2021.102748.

[69] V. S, H. S. Che, J. Selvaraj, y K. S. Tey, "Need of voltage and capacity profile reconstruction in incremental capacity analysis for second life batteries from repurposer perspective", *J. Energy Storage*, vol. 100, p. 113453, oct. 2024, doi: 10.1016/J.EST.2024.113453.

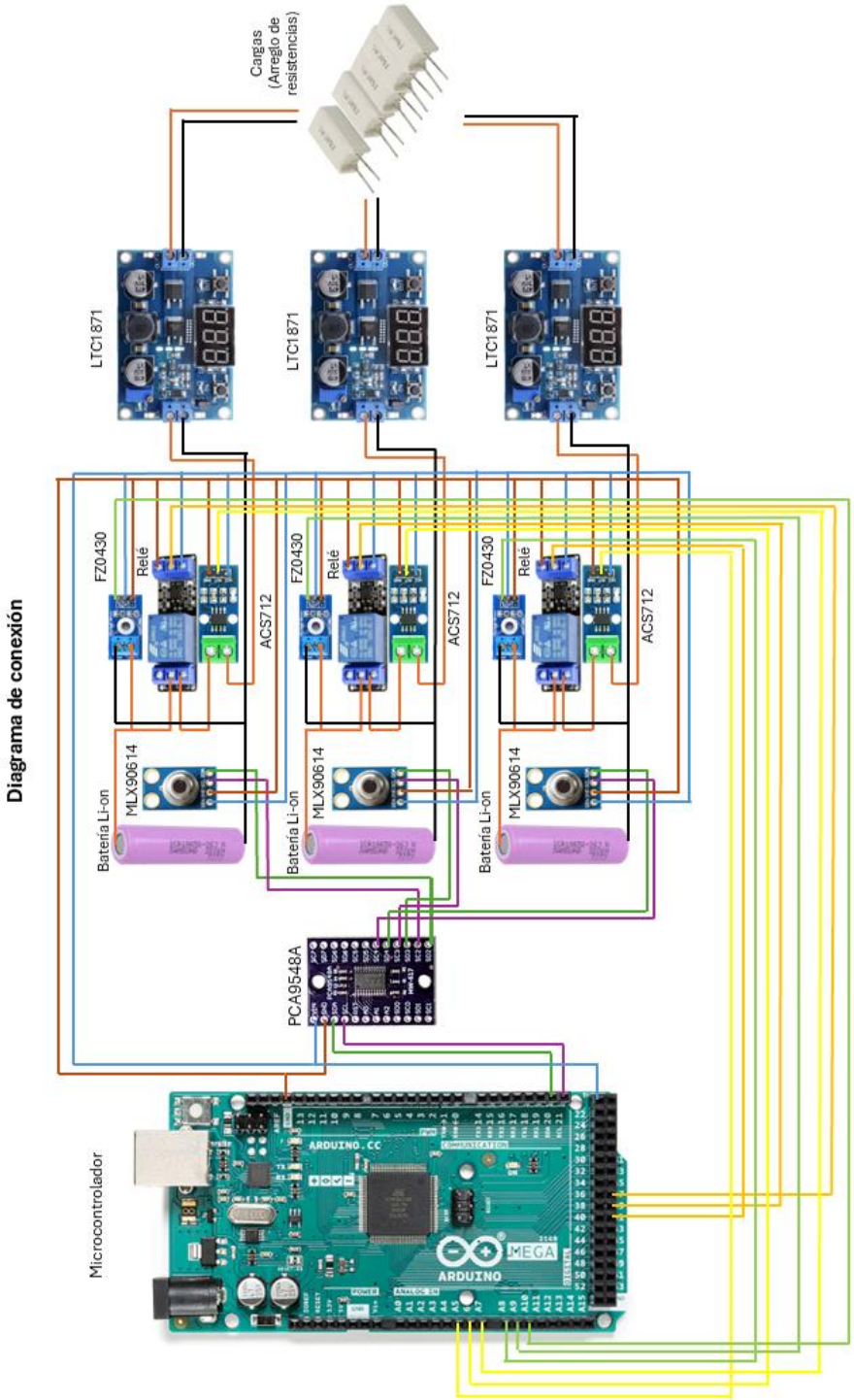
[70] A. Fly y R. Chen, "Rate dependency of incremental capacity analysis (dQ/dV) as a diagnostic tool for lithium-ion batteries", *J. Energy Storage*, vol. 29, p. 101329, jun. 2020, doi: 10.1016/J.EST.2020.101329.

[71] M. Shahjalal *et al.*, "A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues", *Energy*, vol. 241, p. 122881, feb. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.122881.

[72] lygte-info.dk, "Test of Samsung ICR18650-26J 2600mAh (Pink)". Consultado: el 30 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Samsung%20ICR18650-26J%202600mAh%20%28Pink%29%20UK.html

Anexos

Anexo A. Diagrama de conexión – Prototipo de descargas múltiple



Anexo B. Código Arduino

```
/*
UNVIERSIDAD TECNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS
INGENIERIA ELECTRICA
PROTOTIPO DE DESCARGAS MULTIPLE PARA CARACTERIZAR BATERIAS LI-ION
ALEXIS POZO

Activacion mediante Monitor serial
A1 --- Activa bateria 1
A2 --- Activa bateria 2
A3 --- Activa bateria 3

Desactivacion mediante Monitor serial
P1 --- Desactiva bateria 1
P2 --- Desactiva bateria 2
P3 --- Desactiva bateria 3

*/

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>

// Pines sensores
#define VOLTAGE_SENSOR_1_PIN A10
#define VOLTAGE_SENSOR_2_PIN A9
#define VOLTAGE_SENSOR_3_PIN A8
#define CURRENT_SENSOR_1_PIN A7
#define CURRENT_SENSOR_2_PIN A6
#define CURRENT_SENSOR_3_PIN A5

// Pines relés
#define RELAY_1_PIN 41
#define RELAY_2_PIN 39
#define RELAY_3_PIN 37

// Constantes
const float VOLTAGE_DIVIDER_FACTOR = 25.0 / 1023.0;
const float CURRENT_SENSOR_SENSITIVITY_1 = 0.190;
const float CURRENT_SENSOR_SENSITIVITY_2 = 0.070;
const float CURRENT_SENSOR_SENSITIVITY_3 = 0.190;

const float ACS712_ZERO_POINT = 2.5;
const float VOLTAGE_REF = 5.0;
const int ADC_RES = 1023;
```

```
float K = 0.914;

// ---- PROMEDIOS ----
const int VOLTAGE_AVG_SAMPLES = 200;
const int CURRENT_AVG_SAMPLES = 300;

// Umbral ruido
const float CURRENT_NOISE_FLOOR = 0.01;

// Ajustes por canal
float CURRENT_ADJUST_1 = 0.00;
float CURRENT_ADJUST_2 = 0.00;
float CURRENT_ADJUST_3 = 0.00;

float VOLTAGE_ADJUST = 0.00;
float VOLTAGE_ADJUST_1 = 0.00;
float VOLTAGE_ADJUST_2 = 0.00;

// Estados
bool scanBattery1 = false;
bool scanBattery2 = false;
bool scanBattery3 = false;

// Auto-pausa flags
bool autoPaused1 = false;
bool autoPaused2 = false;
bool autoPaused3 = false;

unsigned long lastSend = 0;
const unsigned long SEND_PERIOD_MS = 1000;

// MUX y sensores
#define TCA9548A_ADDR 0x70
Adafruit_MLX90614 mlx1 = Adafruit_MLX90614();
Adafruit_MLX90614 mlx2 = Adafruit_MLX90614();
Adafruit_MLX90614 mlx3 = Adafruit_MLX90614();

void tcaSelect(uint8_t channel) {
  if (channel > 7) return;
  Wire.beginTransmission(TCA9548A_ADDR);
  Wire.write(1 << channel);
  Wire.endTransmission();
}

// --------- HOLD TEMPERATURAS (evitar valor NaN) ---------
float lastObjT1 = 0.0, lastAmbT1 = 0.0;
```

```
float lastObjT2 = 0.0, lastAmbT2 = 0.0;
float lastObjT3 = 0.0, lastAmbT3 = 0.0;

// --------- AJUSTE AUTOMÁTICO DE K (VOLTAJE) SEGÚN BATERÍAS ACTIVAS ----
-----
void updateK() {
  int activeCount = 0;
  if (scanBattery1) activeCount++;
  if (scanBattery2) activeCount++;
  if (scanBattery3) activeCount++;

  if (activeCount == 1) {
    K = 0.914;  // SOLO UNA BATERÍA
    VOLTAGE_ADJUST = -0.07;
    VOLTAGE_ADJUST_1 = -0.04;
    VOLTAGE_ADJUST_2 = -0.04;
  } else if (activeCount == 2) {
    K = 0.940;  // DOS BATERÍAS
    VOLTAGE_ADJUST = -0.02;
    VOLTAGE_ADJUST_1 = -0.03;
    VOLTAGE_ADJUST_2 = 0.00;

  } else if (activeCount == 3) {
    K = 0.980;  // TRES BATERÍAS
    VOLTAGE_ADJUST = 0.00;
    VOLTAGE_ADJUST_1 = -0.03;
    VOLTAGE_ADJUST_2 = -0.01;

  } else {
    K = 0.914;  // Ninguna activa (default)
    VOLTAGE_ADJUST = 0.0;
    VOLTAGE_ADJUST_1 = 0.0;
    VOLTAGE_ADJUST_2 = 0.0;
  }
}

// --------- AJUSTE AUTOMÁTICO DE K_I (CORRIENTE) (Ajuste por canal) ----
-----
void updateKI() {
  int activeCount = 0;
  if (scanBattery1) activeCount++;
  if (scanBattery2) activeCount++;
  if (scanBattery3) activeCount++;

  if (activeCount == 1) {
    CURRENT_ADJUST_1 = -0.05;
```

```
    CURRENT_ADJUST_2 = 0.01;
    CURRENT_ADJUST_3 = 0.0;

  } else if (activeCount == 2) {
    CURRENT_ADJUST_1 = -0.04;
    CURRENT_ADJUST_2 = 0.10;
    CURRENT_ADJUST_3 = 0.0;

  } else if (activeCount == 3) {
    CURRENT_ADJUST_1 = -0.0;
    CURRENT_ADJUST_2 = 0.20;
    CURRENT_ADJUST_3 = 0.0;

  } else {
    CURRENT_ADJUST_1 = 0.0;
    CURRENT_ADJUST_2 = 0.0;
    CURRENT_ADJUST_3 = 0.0;
    // ninguna activa
  }
}

// --------- PROMEDIO DE VOLTAJE ---------
float readAveragedBatteryVoltage(uint8_t pin, int samples) {
  long sum = 0;
  for (int i = 0; i < samples; i++) {
    sum += analogRead(pin);
    delayMicroseconds(200);
  }
  float adc = (float)sum / samples;
  return (adc * VOLTAGE_DIVIDER_FACTOR);
}

// --------- PROMEDIO DE CORRIENTE ---------
float promedio_I(uint8_t pin, int muestras, float sensibilidad) {
  float intensidad = 0.0;
  for (int i = 0; i < muestras; i++) {
    float sensorV = analogRead(pin) * (VOLTAGE_REF / ADC_RES);
    intensidad += (sensorV - ACS712_ZERO_POINT) / sensibilidad;
  }
  return intensidad / muestras;
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin();
```

```
pinMode(RELAY_1_PIN, OUTPUT);
pinMode(RELAY_2_PIN, OUTPUT);
pinMode(RELAY_3_PIN, OUTPUT);
digitalWrite(RELAY_1_PIN, LOW);
digitalWrite(RELAY_2_PIN, LOW);
digitalWrite(RELAY_3_PIN, LOW);

Serial.println("--- Sistema de Monitoreo Individual de Baterías ---");

tcaSelect(2);
if (!mlx1.begin()) {
  Serial.println("ERROR: MLX90614 [1] no detectado");
  while (1) { ; }
}

tcaSelect(3);
if (!mlx2.begin()) {
  Serial.println("ERROR: MLX90614 [2] no detectado");
  while (1) { ; }
}

tcaSelect(4);
if (!mlx3.begin()) {
  Serial.println("ERROR: MLX90614 [3] no detectado");
  while (1) { ; }
}

// Inicialización sensores temperatura
tcaSelect(2);
lastObjT1 = mlx1.readObjectTempC();
lastAmbT1 = mlx1.readAmbientTempC();
if (isnan(lastObjT1)) lastObjT1 = 0.0;
if (isnan(lastAmbT1)) lastAmbT1 = 0.0;

tcaSelect(3);
lastObjT2 = mlx2.readObjectTempC();
lastAmbT2 = mlx2.readAmbientTempC();
if (isnan(lastObjT2)) lastObjT2 = 0.0;
if (isnan(lastAmbT2)) lastAmbT2 = 0.0;

tcaSelect(4);
lastObjT3 = mlx3.readObjectTempC();
lastAmbT3 = mlx3.readAmbientTempC();
if (isnan(lastObjT3)) lastObjT3 = 0.0;
if (isnan(lastAmbT3)) lastAmbT3 = 0.0;
```

```
  Serial.println("Sensores inicializados. Esperando comandos...");
}

void loop() {

  // ---------------- LECTURA DE COMANDOS ----------------
  if (Serial.available() > 0) {
    char cmd = Serial.read();

    switch (cmd) {
      case 'A':  // Activar batería Ax
        while (!Serial.available()) { ; }
        switch (Serial.read()) {
          case '1':
            scanBattery1 = true;
            autoPaused1 = false;
            break;
          case '2':
            scanBattery2 = true;
            autoPaused2 = false;
            break;
          case '3':
            scanBattery3 = true;
            autoPaused3 = false;
            break;
        }
        break;

      case 'P':  // Pausar batería Px
        while (!Serial.available()) { ; }
        switch (Serial.read()) {
          case '1':
            scanBattery1 = false;
            digitalWrite(RELAY_1_PIN, LOW);
            break;
          case '2':
            scanBattery2 = false;
            digitalWrite(RELAY_2_PIN, LOW);
            break;
          case '3':
            scanBattery3 = false;
            digitalWrite(RELAY_3_PIN, LOW);
            break;
        }
        break;
    }
```

```
  }

  // --------- ACTUALIZAR K y ajustes de corriente segun baterias activas
---------
  updateK();
  updateKI();

  // ---------------- VARIABLES PARA SALIDA ----------------
  float voltage1 = 0, current1 = 0, objT1 = 0, ambT1 = 0;
  float voltage2 = 0, current2 = 0, objT2 = 0, ambT2 = 0;
  float voltage3 = 0, current3 = 0, objT3 = 0, ambT3 = 0;

  // ---------------- BATERIA 1 ----------------
  if (scanBattery1) {
    voltage1 = (readAveragedBatteryVoltage(VOLTAGE_SENSOR_1_PIN,
VOLTAGE_AVG_SAMPLES) * K) + VOLTAGE_ADJUST;

    if (voltage1 < 3.0) {
      digitalWrite(RELAY_1_PIN, LOW);
      scanBattery1 = false;
      if (!autoPaused1) {
        Serial.println("P1");
        autoPaused1 = true;
      }
    } else {
      digitalWrite(RELAY_1_PIN, HIGH);

      current1 = promedio_I(CURRENT_SENSOR_1_PIN, CURRENT_AVG_SAMPLES,
CURRENT_SENSOR_SENSITIVITY_1) + CURRENT_ADJUST_1;
      if (current1 < CURRENT_NOISE_FLOOR) current1 = 0.0;
      if (current1 < 0) current1 = 0.0;

      tcaSelect(2);
      float tObj = mlx1.readObjectTempC();
      float tAmb = mlx1.readAmbientTempC();

      if (!isnan(tObj)) lastObjT1 = tObj;
      if (!isnan(tAmb)) lastAmbT1 = tAmb;

      objT1 = lastObjT1;
      ambT1 = lastAmbT1;
    }
  }

  // ---------------- BATERIA 2 ----------------
  if (scanBattery2) {
```

```
    voltage2 = (readAveragedBatteryVoltage(VOLTAGE_SENSOR_2_PIN,
VOLTAGE_AVG_SAMPLES) * K) + VOLTAGE_ADJUST_1;

    if (voltage2 < 3.0) {
      digitalWrite(RELAY_2_PIN, LOW);
      scanBattery2 = false;
      if (!autoPaused2) {
        Serial.println("P2");
        autoPaused2 = true;
      }
    } else {
      digitalWrite(RELAY_2_PIN, HIGH);

      current2 = promedio_I(CURRENT_SENSOR_2_PIN, CURRENT_AVG_SAMPLES,
CURRENT_SENSOR_SENSITIVITY_2) + CURRENT_ADJUST_2;
      if (current2 < CURRENT_NOISE_FLOOR) current2 = 0.0;
      if (current2 < 0) current2 = 0.0;

      tcaSelect(3);
      float tObj = mlx2.readObjectTempC();
      float tAmb = mlx2.readAmbientTempC();

      if (!isnan(tObj)) lastObjT2 = tObj;
      if (!isnan(tAmb)) lastAmbT2 = tAmb;

      objT2 = lastObjT2;
      ambT2 = lastAmbT2;
    }
  }

  // ---------------- BATERIA 3 ----------------
  if (scanBattery3) {
    voltage3 = (readAveragedBatteryVoltage(VOLTAGE_SENSOR_3_PIN,
VOLTAGE_AVG_SAMPLES) * K) + VOLTAGE_ADJUST_2;

    if (voltage3 < 3.0) {
      digitalWrite(RELAY_3_PIN, LOW);
      scanBattery3 = false;
      if (!autoPaused3) {
        Serial.println("P3");
        autoPaused3 = true;
      }
    } else {
      digitalWrite(RELAY_3_PIN, HIGH);
```

```
      current3 = promedio_I(CURRENT_SENSOR_3_PIN, CURRENT_AVG_SAMPLES,
CURRENT_SENSOR_SENSITIVITY_3) + CURRENT_ADJUST_3;
      if (current3 < CURRENT_NOISE_FLOOR) current3 = 0.0;
      if (current3 < 0) current3 = 0.0;

      tcaSelect(4);
      float tObj = mlx3.readObjectTempC();
      float tAmb = mlx3.readAmbientTempC();

      if (!isnan(tObj)) lastObjT3 = tObj;
      if (!isnan(tAmb)) lastAmbT3 = tAmb;

      objT3 = lastObjT3;
      ambT3 = lastAmbT3;
    }
  }

  // Seguridad: si voltaje = 0, apaga relé
  if (voltage1 == 0.0) digitalWrite(RELAY_1_PIN, LOW);
  if (voltage2 == 0.0) digitalWrite(RELAY_2_PIN, LOW);
  if (voltage3 == 0.0) digitalWrite(RELAY_3_PIN, LOW);

  // Envío CSV cada 1s
  if (millis() - lastSend >= SEND_PERIOD_MS) {
    lastSend = millis();

    Serial.print(voltage1);
    Serial.print(",");
    Serial.print(current1);
    Serial.print(",");
    Serial.print(objT1);
    Serial.print(",");
    Serial.print(ambT1);
    Serial.print(",");

    Serial.print(voltage2);
    Serial.print(",");
    Serial.print(current2);
    Serial.print(",");
    Serial.print(objT2);
    Serial.print(",");
    Serial.print(ambT2);
    Serial.print(",");

    Serial.print(voltage3);
    Serial.print(",");
```

```
    Serial.print(current3);
    Serial.print(",");
    Serial.print(objT3);
    Serial.print(",");
    Serial.println(ambT3);
  }
}
```

Anexo C. Código App Designer - Matlab

```
classdef AppTesisFinal < matlab.apps.AppBase

    % Properties that correspond to app components
    properties (Access = public)
        UIFigure                        matlab.ui.Figure
        StartAllButton                  matlab.ui.control.Button
        CargaPctEdit3                   matlab.ui.control.NumericEditField
        deDescargaEditField_3Label      matlab.ui.control.Label
        CargaPctEdit2                   matlab.ui.control.NumericEditField
        deDescargaEditField_2Label      matlab.ui.control.Label
        CargaPctEdit1                   matlab.ui.control.NumericEditField
        deDescargaEditFieldLabel        matlab.ui.control.Label
        Image2                          matlab.ui.control.Image
        Image                           matlab.ui.control.Image
        CaracterizaciondebateriasLion18650Label  matlab.ui.control.Label
        INGENIERIAELECTRICALabel        matlab.ui.control.Label
        FACULTADDEINGENIERAENCIENCIASAPLICADASLabel  matlab.ui.control.Label
        UNIVERSIDADTECNICADELNORTELabel  matlab.ui.control.Label
        StartStopButton3                matlab.ui.control.StateButton
        StartStopButton2                matlab.ui.control.StateButton
        StartStopButton1                matlab.ui.control.StateButton
        ElapsedTimeEdit3                matlab.ui.control.NumericEditField
        TiempotranscurridosEditFieldLabel_3  matlab.ui.control.Label
        StartTimeEdit3                  matlab.ui.control.EditField
        HoradeinicioEditFieldLabel_3    matlab.ui.control.Label
        TempAmbEdit3                    matlab.ui.control.NumericEditField
        TemperaturaambienteEditFieldLabel_3  matlab.ui.control.Label
        TempObjEdit3                    matlab.ui.control.NumericEditField
        TemperaturadebateraEditFieldLabel_3  matlab.ui.control.Label
        Bateria3Label                   matlab.ui.control.Label
        ElapsedTimeEdit2                matlab.ui.control.NumericEditField
        TiempotranscurridosEditFieldLabel_2  matlab.ui.control.Label
        StartTimeEdit2                  matlab.ui.control.EditField
        HoradeinicioEditFieldLabel_2    matlab.ui.control.Label
        TempAmbEdit2                    matlab.ui.control.NumericEditField
        TemperaturaambienteEditFieldLabel_2  matlab.ui.control.Label
        TempObjEdit2                    matlab.ui.control.NumericEditField
        TemperaturadebateraEditFieldLabel_2  matlab.ui.control.Label
        Bateria2Label                   matlab.ui.control.Label
        Bateria1Label                   matlab.ui.control.Label
        ElapsedTimeEdit1                matlab.ui.control.NumericEditField
        TiempotranscurridosEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
```

```
        StartTimeEdit1                matlab.ui.control.EditField
        HoradeinicioEditFieldLabel    matlab.ui.control.Label
        TempAmbEdit1                  matlab.ui.control.NumericEditField
        TemperaturaambienteEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
        TempObjEdit1                  matlab.ui.control.NumericEditField
        TemperaturadebateraLabel      matlab.ui.control.Label
        UIAxes3                       matlab.ui.control.UIAxes
        UIAxes2                       matlab.ui.control.UIAxes
        UIAxes                        matlab.ui.control.UIAxes
    end


    properties (Access = private)
    serialObj % Objeto de comunicación serial
    isReading1 = false
    isReading2 = false
    isReading3 = false
    startTime1
    startTime2
    startTime3
    timerObj % Timer para actualización continua

    lastPlotTime = datetime('now');
    PLOT_PERIOD_S = 0.5;


    % Datos históricos
    V1 = []
    I1 = []
    V2 = []
    I2 = []
    V3 = []
    I3 = []
    T1 = []
    T2 = []
    T3 = []
    TempObj1 = []
    TempAmb1 = []
    TempObj2 = []
    TempAmb2 = []
    TempObj3 = []
    TempAmb3 = []

    end

    methods (Access = private)

        function connectArduino(app)
    try
        app.serialObj = serialport("COM3", 115200); % Cambia COM si es
necesario
        configureTerminator(app.serialObj, "LF");
        app.serialObj.Timeout = 0.2;    % <- CLAVE (en segundos)
        flush(app.serialObj);
        pause(2);
        disp("Arduino conectado");
```

```
    catch e
        uialert(app.UIFigure, "Error: " + e.message, "Fallo de conexión");
    end

        end

function updateData(app)
% - Detecta P1/P2/P3 (auto-pausa desde Arduino) y sincroniza botones
% - Valida que lleguen 12 datos numéricos


    try
        if isempty(app.serialObj) || ~isvalid(app.serialObj)
            return;
        end

    maxLines = 200;
    n = 0;

    while app.serialObj.NumBytesAvailable > 0 && n < maxLines   % <-- AQUI
        n = n + 1;

        try
            line = readline(app.serialObj);
        catch
            break;
        end

        line = strtrim(string(line));

        if strlength(line) == 0
            continue;
        end

            % ---------------- AUTO-PAUSA DESDE ARDUINO ----------------
            if strcmp(line, "P1")
                app.isReading1 = false;
                app.StartStopButton1.Value = false;
                app.StartStopButton1.Text  = "Iniciar lectura";
                exportBattery1(app);   %

                continue;
            elseif strcmp(line, "P2")
                app.isReading2 = false;
                app.StartStopButton2.Value = false;
                app.StartStopButton2.Text  = "Iniciar lectura";
                exportBattery2(app);

                continue;
            elseif strcmp(line, "P3")
                app.isReading3 = false;
                app.StartStopButton3.Value = false;
                app.StartStopButton3.Text  = "Iniciar lectura";
                exportBattery3(app);

                continue;
```

```
end

% ---------------- PARSEO Y VALIDACIÓN CSV ----------------
data = str2double(split(line, ','));

if numel(data) ~= 12 || any(isnan(data))
    continue;
end

% ---------------- BATERÍA 1 ----------------
if app.isReading1
    V = data(1); I = data(2);

    app.V1(end+1) = V;
    app.I1(end+1) = I;

    app.T1(end+1) = numel(app.T1);
    tNow = app.T1(end);

    app.TempObjEdit1.Value = data(3);
    app.TempAmbEdit1.Value = data(4);
    app.TempObj1(end+1) = data(3);
    app.TempAmb1(end+1) = data(4);

    app.ElapsedTimeEdit1.Value = tNow;
end

% ---------------- BATERÍA 2 ----------------
if app.isReading2
    V = data(5); I = data(6);

    app.V2(end+1) = V;
    app.I2(end+1) = I;

    app.T2(end+1) = numel(app.T2);
    tNow = app.T2(end);

    app.TempObjEdit2.Value = data(7);
    app.TempAmbEdit2.Value = data(8);
    app.TempObj2(end+1) = data(7);
    app.TempAmb2(end+1) = data(8);

    app.ElapsedTimeEdit2.Value = tNow;
end

% ---------------- BATERÍA 3 ----------------
if app.isReading3
    V = data(9); I = data(10);

    app.V3(end+1) = V;
    app.I3(end+1) = I;

    app.T3(end+1) = numel(app.T3);
    tNow = app.T3(end);

    app.TempObjEdit3.Value = data(11);
```

```
                app.TempAmbEdit3.Value = data(12);
                app.TempObj3(end+1) = data(11);
                app.TempAmb3(end+1) = data(12);

                app.ElapsedTimeEdit3.Value = tNow;
            end
        end

        % ---------------- GRAFICACION ----------------

        if ~isprop(app, "lastPlotTime") || isempty(app.lastPlotTime)
            app.lastPlotTime = datetime('now');
        end
        if ~isprop(app, "PLOT_PERIOD_S") || isempty(app.PLOT_PERIOD_S)
            app.PLOT_PERIOD_S = 1.0;
        end

        if seconds(datetime('now') - app.lastPlotTime) >= app.PLOT_PERIOD_S

            if app.isReading1 && ~isempty(app.I1) && ~isempty(app.V1)
                plot(app.UIAxes, app.I1, app.V1);
                grid(app.UIAxes, 'on');
            end

            if app.isReading2 && ~isempty(app.I2) && ~isempty(app.V2)
                plot(app.UIAxes2, app.I2, app.V2);
                grid(app.UIAxes2, 'on');
            end

            if app.isReading3 && ~isempty(app.I3) && ~isempty(app.V3)
                plot(app.UIAxes3, app.I3, app.V3);
                grid(app.UIAxes3, 'on');
            end

            app.lastPlotTime = datetime('now');
        end

    catch ME
        disp("ERROR en updateData: " + ME.message);
    end
end

% EXPORTACIÓN AUTOMÁTICA BATERÍA 1

function exportBattery1(app)

    if isempty(app.T1) || isempty(app.V1) || isempty(app.I1) ||
isempty(app.TempObj1) || isempty(app.TempAmb1)
        return;
    end

    fecha = datestr(now, 'yyyy-mm-dd_HH-MM-SS');

    % Asegurar mismo largo
    N = min([length(app.T1), length(app.V1), length(app.I1),
length(app.TempObj1), length(app.TempAmb1)]);
```

```
    if N <= 0, return; end

    tiempo    = app.T1(1:N)';
    voltaje   = app.V1(1:N)';
    corriente = app.I1(1:N)';

    temp_obj  = app.TempObj1(1:N)';
    temp_amb  = app.TempAmb1(1:N)';

    fecha_muestra = repmat(string(datetime('today','Format','yyyy-MM-dd')),
N, 1);

    tabla = table(fecha_muestra, tiempo, voltaje, corriente, temp_obj,
temp_amb, ...
        'VariableNames',
{'Fecha','Tiempo_s','Voltaje','Corriente','TempBateria','TempAmbiente'});

    pct = app.CargaPctEdit1.Value;
    pctStr = sprintf('%g', pct);

    nombre_archivo = fullfile(pwd, ['Bateria1_' pctStr '%Descarga_' fecha
'.xlsx']);
    writetable(tabla, nombre_archivo);
end


% 2) EXPORTACIÓN AUTOMÁTICA BATERÍA 2

function exportBattery2(app)

    if isempty(app.T2) || isempty(app.V2) || isempty(app.I2) ||
isempty(app.TempObj2) || isempty(app.TempAmb2)
        return;
    end

    fecha = datestr(now, 'yyyy-mm-dd_HH-MM-SS');

    N = min([length(app.T2), length(app.V2), length(app.I2),
length(app.TempObj2), length(app.TempAmb2)]);
    if N <= 0, return; end

    tiempo    = app.T2(1:N)';
    voltaje   = app.V2(1:N)';
    corriente = app.I2(1:N)';

    temp_obj  = app.TempObj2(1:N)';
    temp_amb  = app.TempAmb2(1:N)';

    fecha_muestra = repmat(string(datetime('today','Format','yyyy-MM-dd')),
N, 1);

    tabla = table(fecha_muestra, tiempo, voltaje, corriente, temp_obj,
temp_amb, ...
        'VariableNames',
{'Fecha','Tiempo_s','Voltaje','Corriente','TempBateria','TempAmbiente'});
```

```
    pct = app.CargaPctEdit2.Value;
    pctStr = sprintf('%g', pct);

    nombre_archivo = fullfile(pwd, ['Bateria2_' pctStr '%Descarga_' fecha
'.xlsx']);
    writetable(tabla, nombre_archivo);
end


% 3) EXPORTACIÓN AUTOMÁTICA BATERÍA 3

function exportBattery3(app)

    if isempty(app.T3) || isempty(app.V3) || isempty(app.I3) ||
isempty(app.TempObj3) || isempty(app.TempAmb3)
        return;
    end

    fecha = datestr(now, 'yyyy-mm-dd_HH-MM-SS');

    N = min([length(app.T3), length(app.V3), length(app.I3),
length(app.TempObj3), length(app.TempAmb3)]);
    if N <= 0, return; end

    tiempo    = app.T3(1:N)';
    voltaje   = app.V3(1:N)';
    corriente = app.I3(1:N)';

    temp_obj  = app.TempObj3(1:N)';
    temp_amb  = app.TempAmb3(1:N)';

    fecha_muestra = repmat(string(datetime('today','Format','yyyy-MM-dd')),
N, 1);

    tabla = table(fecha_muestra, tiempo, voltaje, corriente, temp_obj,
temp_amb, ...
        'VariableNames',
{'Fecha','Tiempo_s','Voltaje','Corriente','TempBateria','TempAmbiente'});

    pct = app.CargaPctEdit3.Value;
    pctStr = sprintf('%g', pct);

    nombre_archivo = fullfile(pwd, ['Bateria3_' pctStr '%Descarga_' fecha
'.xlsx']);
    writetable(tabla, nombre_archivo);
end



    end


    % Callbacks that handle component events
    methods (Access = private)
```

```
        % Code that executes after component creation
        function startupFcn(app)
    connectArduino(app);
    app.timerObj = timer( ...
     'ExecutionMode','fixedRate', ...
     'Period',0.3, ...
     'BusyMode','queue', ...
     'TimerFcn',@(src,event) updateData(app));

    start(app.timerObj);
        end

        % Close request function: UIFigure
        function UIFigureCloseRequest(app, event)
                stop(app.timerObj);
    delete(app.timerObj);
    if ~isempty(app.serialObj)
        clear app.serialObj;
    end
    delete(app);
        end

        % Value changed function: StartStopButton1
        function StartStopButton1ValueChanged(app, event)
    if app.StartStopButton1.Value
        app.isReading1 = true;
        app.startTime1 = datetime('now');
        app.V1 = []; app.I1 = []; app.T1 = []; app.TempObj1 = [];
app.TempAmb1 = [];
        app.StartTimeEdit1.Value = datestr(app.startTime1, 'HH:MM');
        app.StartStopButton1.Text = "Detener lectura";
        writeline(app.serialObj, "A1");
   else
    app.isReading1 = false;
    exportBattery1(app);
    app.StartStopButton1.Text = "Iniciar lectura";
    writeline(app.serialObj, "P1");
end

        end

        % Value changed function: StartStopButton2
        function StartStopButton2ValueChanged(app, event)
     if app.StartStopButton2.Value
        app.isReading2 = true;
        app.startTime2 = datetime('now');
        app.V2 = []; app.I2 = []; app.T2 = []; app.TempObj2 = [];
app.TempAmb2 = [];
        app.StartTimeEdit2.Value = datestr(app.startTime2, 'HH:MM');
        app.StartStopButton2.Text = "Detener lectura";
        writeline(app.serialObj, "A2");
     else
        app.isReading2 = false;
        exportBattery2(app);
        app.StartStopButton2.Text = "Iniciar lectura";
        writeline(app.serialObj, "P2");
```

```
    end
        end

        % Value changed function: StartStopButton3
        function StartStopButton3ValueChanged(app, event)
    if app.StartStopButton3.Value
        app.isReading3 = true;
        app.startTime3 = datetime('now');
        app.V3 = []; app.I3 = []; app.T3 = []; app.TempObj3 = [];
app.TempAmb3 = [];
        app.StartTimeEdit3.Value = datestr(app.startTime3, 'HH:MM');
        app.StartStopButton3.Text = "Detener lectura";
        writeline(app.serialObj, "A3");
    else
        app.isReading3 = false;
        exportBattery3(app);
        app.StartStopButton3.Text = "Iniciar lectura";
        writeline(app.serialObj, "P3");
    end
        end

        % Button pushed function: StartAllButton
        function StartAllButtonPushed(app, event)

    % --- BATERÍA 1 ---
    app.isReading1 = true;
    app.startTime1 = datetime('now');
    app.V1 = []; app.I1 = []; app.T1 = []; app.TempObj1 = []; app.TempAmb1 =
[];
    app.StartTimeEdit1.Value = datestr(app.startTime1, 'HH:MM');
    app.StartStopButton1.Value = true;
    app.StartStopButton1.Text  = "Detener lectura";

    % --- BATERÍA 2 ---
    app.isReading2 = true;
    app.startTime2 = datetime('now');
    app.V2 = []; app.I2 = []; app.T2 = []; app.TempObj2 = []; app.TempAmb2 =
[];
    app.StartTimeEdit2.Value = datestr(app.startTime2, 'HH:MM');
    app.StartStopButton2.Value = true;
    app.StartStopButton2.Text  = "Detener lectura";

    % --- BATERÍA 3 ---
    app.isReading3 = true;
    app.startTime3 = datetime('now');
    app.V3 = []; app.I3 = []; app.T3 = []; app.TempObj3 = []; app.TempAmb3 =
[];
    app.StartTimeEdit3.Value = datestr(app.startTime3, 'HH:MM');
    app.StartStopButton3.Value = true;
    app.StartStopButton3.Text  = "Detener lectura";

    % --- Enviar comandos a Arduino (ordenado y con mini pausa) ---
    if ~isempty(app.serialObj) && isvalid(app.serialObj)
        writeline(app.serialObj, "A1"); pause(0.05);
        writeline(app.serialObj, "A2"); pause(0.05);
        writeline(app.serialObj, "A3");
```

```
    end

        end
    end

    % Component initialization
    methods (Access = private)

        % Create UIFigure and components
        function createComponents(app)

            % Get the file path for locating images
            pathToMLAPP = fileparts(mfilename('fullpath'));

            % Create UIFigure and hide until all components are created
            app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
            app.UIFigure.Position = [100 100 950 763];
            app.UIFigure.Name = 'MATLAB App';
            app.UIFigure.CloseRequestFcn = createCallbackFcn(app,
@UIFigureCloseRequest, true);

            % Create UIAxes
            app.UIAxes = uiaxes(app.UIFigure);
            title(app.UIAxes, 'Bateria 1 (V vs A)')
            xlabel(app.UIAxes, 'Amperios (A)')
            ylabel(app.UIAxes, 'Voltaje (V)')
            zlabel(app.UIAxes, 'Z')
            app.UIAxes.XGrid = 'on';
            app.UIAxes.YGrid = 'on';
            app.UIAxes.Position = [558 432 331 185];

            % Create UIAxes2
            app.UIAxes2 = uiaxes(app.UIFigure);
            title(app.UIAxes2, 'Bateria 2 (V vs A)')
            xlabel(app.UIAxes2, 'Amperios (A)')
            ylabel(app.UIAxes2, 'Voltaje (V)')
            zlabel(app.UIAxes2, 'Z')
            app.UIAxes2.XGrid = 'on';
            app.UIAxes2.YGrid = 'on';
            app.UIAxes2.Position = [558 223 331 185];

            % Create UIAxes3
            app.UIAxes3 = uiaxes(app.UIFigure);
            title(app.UIAxes3, 'Bateria 3 (V vs A)')
            xlabel(app.UIAxes3, 'Amperios (A)')
            ylabel(app.UIAxes3, 'Voltaje (V)')
            zlabel(app.UIAxes3, 'Z')
            app.UIAxes3.XGrid = 'on';
            app.UIAxes3.YGrid = 'on';
            app.UIAxes3.Position = [558 24 331 185];

            % Create TemperaturadebateraLabel
            app.TemperaturadebateraLabel = uilabel(app.UIFigure);
            app.TemperaturadebateraLabel.HorizontalAlignment = 'right';
            app.TemperaturadebateraLabel.FontSize = 14;
            app.TemperaturadebateraLabel.Position = [177 534 161 22];
```

```
            app.TemperaturadebateraLabel.Text = 'Temperatura de batería
        ';

            % Create TempObjEdit1
            app.TempObjEdit1 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.TempObjEdit1.FontSize = 14;
            app.TempObjEdit1.Position = [355 534 100 22];

            % Create TemperaturaambienteEditFieldLabel
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel.HorizontalAlignment =
'right';
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel.FontSize = 14;
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel.Position = [177 513 161
22];
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel.Text = 'Temperatura
ambiente     ';

            % Create TempAmbEdit1
            app.TempAmbEdit1 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.TempAmbEdit1.FontSize = 14;
            app.TempAmbEdit1.Position = [355 513 100 22];

            % Create HoradeinicioEditFieldLabel
            app.HoradeinicioEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
            app.HoradeinicioEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
            app.HoradeinicioEditFieldLabel.FontSize = 14;
            app.HoradeinicioEditFieldLabel.Position = [178 482 98 22];
            app.HoradeinicioEditFieldLabel.Text = 'Hora de inicio      ';

            % Create StartTimeEdit1
            app.StartTimeEdit1 = uieditfield(app.UIFigure, 'text');
            app.StartTimeEdit1.FontSize = 14;
            app.StartTimeEdit1.Position = [355 482 100 22];

            % Create TiempotranscurridosEditFieldLabel
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel.HorizontalAlignment =
'right';
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel.FontSize = 14;
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel.Position = [177 461 161
22];
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel.Text = 'Tiempo transcurrido
(s)    ';

            % Create ElapsedTimeEdit1
            app.ElapsedTimeEdit1 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.ElapsedTimeEdit1.FontSize = 14;
            app.ElapsedTimeEdit1.Position = [355 461 100 22];

            % Create Bateria1Label
            app.Bateria1Label = uilabel(app.UIFigure);
            app.Bateria1Label.FontSize = 24;
            app.Bateria1Label.FontWeight = 'bold';
            app.Bateria1Label.Position = [59 573 106 32];
            app.Bateria1Label.Text = 'Bateria 1';
```

```
            % Create Bateria2Label
            app.Bateria2Label = uilabel(app.UIFigure);
            app.Bateria2Label.FontSize = 24;
            app.Bateria2Label.FontWeight = 'bold';
            app.Bateria2Label.Position = [59 371 106 32];
            app.Bateria2Label.Text = 'Bateria 2';

            % Create TemperaturadebateraEditFieldLabel_2
            app.TemperaturadebateraEditFieldLabel_2 = uilabel(app.UIFigure);
            app.TemperaturadebateraEditFieldLabel_2.HorizontalAlignment =
'right';
            app.TemperaturadebateraEditFieldLabel_2.FontSize = 14;
            app.TemperaturadebateraEditFieldLabel_2.Position = [175 336 161
22];
            app.TemperaturadebateraEditFieldLabel_2.Text = 'Temperatura de
batería      ';

            % Create TempObjEdit2
            app.TempObjEdit2 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.TempObjEdit2.FontSize = 14;
            app.TempObjEdit2.Position = [355 336 100 22];

            % Create TemperaturaambienteEditFieldLabel_2
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel_2 = uilabel(app.UIFigure);
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel_2.HorizontalAlignment =
'right';
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel_2.FontSize = 14;
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel_2.Position = [176 315 161
22];
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel_2.Text = 'Temperatura
ambiente      ';

            % Create TempAmbEdit2
            app.TempAmbEdit2 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.TempAmbEdit2.FontSize = 14;
            app.TempAmbEdit2.Position = [355 315 100 22];

            % Create HoradeinicioEditFieldLabel_2
            app.HoradeinicioEditFieldLabel_2 = uilabel(app.UIFigure);
            app.HoradeinicioEditFieldLabel_2.HorizontalAlignment = 'right';
            app.HoradeinicioEditFieldLabel_2.FontSize = 14;
            app.HoradeinicioEditFieldLabel_2.Position = [177 284 98 22];
            app.HoradeinicioEditFieldLabel_2.Text = 'Hora de inicio    ';

            % Create StartTimeEdit2
            app.StartTimeEdit2 = uieditfield(app.UIFigure, 'text');
            app.StartTimeEdit2.FontSize = 14;
            app.StartTimeEdit2.Position = [355 284 100 22];

            % Create TiempotranscurridosEditFieldLabel_2
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel_2 = uilabel(app.UIFigure);
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel_2.HorizontalAlignment =
'right';
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel_2.FontSize = 14;
```

```
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel_2.Position = [176 263 161
22];
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel_2.Text = 'Tiempo
transcurrido (s)    ';

            % Create ElapsedTimeEdit2
            app.ElapsedTimeEdit2 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.ElapsedTimeEdit2.FontSize = 14;
            app.ElapsedTimeEdit2.Position = [355 263 100 22];

            % Create Bateria3Label
            app.Bateria3Label = uilabel(app.UIFigure);
            app.Bateria3Label.FontSize = 24;
            app.Bateria3Label.FontWeight = 'bold';
            app.Bateria3Label.Position = [59 172 106 32];
            app.Bateria3Label.Text = 'Bateria 3';

            % Create TemperaturadebateraEditFieldLabel_3
            app.TemperaturadebateraEditFieldLabel_3 = uilabel(app.UIFigure);
            app.TemperaturadebateraEditFieldLabel_3.HorizontalAlignment =
'right';
            app.TemperaturadebateraEditFieldLabel_3.FontSize = 14;
            app.TemperaturadebateraEditFieldLabel_3.Position = [180 132 161
22];
            app.TemperaturadebateraEditFieldLabel_3.Text = 'Temperatura de
batería      ';

            % Create TempObjEdit3
            app.TempObjEdit3 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.TempObjEdit3.FontSize = 14;
            app.TempObjEdit3.Position = [355 132 100 22];

            % Create TemperaturaambienteEditFieldLabel_3
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel_3 = uilabel(app.UIFigure);
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel_3.HorizontalAlignment =
'right';
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel_3.FontSize = 14;
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel_3.Position = [178 111 161
22];
            app.TemperaturaambienteEditFieldLabel_3.Text = 'Temperatura
ambiente     ';

            % Create TempAmbEdit3
            app.TempAmbEdit3 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.TempAmbEdit3.FontSize = 14;
            app.TempAmbEdit3.Position = [355 111 100 22];

            % Create HoradeinicioEditFieldLabel_3
            app.HoradeinicioEditFieldLabel_3 = uilabel(app.UIFigure);
            app.HoradeinicioEditFieldLabel_3.HorizontalAlignment = 'right';
            app.HoradeinicioEditFieldLabel_3.FontSize = 14;
            app.HoradeinicioEditFieldLabel_3.Position = [180 81 98 22];
            app.HoradeinicioEditFieldLabel_3.Text = 'Hora de inicio    ';

            % Create StartTimeEdit3
            app.StartTimeEdit3 = uieditfield(app.UIFigure, 'text');
```

```
            app.StartTimeEdit3.FontSize = 14;
            app.StartTimeEdit3.Position = [355 81 100 22];

            % Create TiempotranscurridosEditFieldLabel_3
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel_3 = uilabel(app.UIFigure);
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel_3.HorizontalAlignment =
'right';
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel_3.FontSize = 14;
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel_3.Position = [178 60 161
22];
            app.TiempotranscurridosEditFieldLabel_3.Text = 'Tiempo
transcurrido (s)    ';

            % Create ElapsedTimeEdit3
            app.ElapsedTimeEdit3 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.ElapsedTimeEdit3.FontSize = 14;
            app.ElapsedTimeEdit3.Position = [355 60 100 22];

            % Create StartStopButton1
            app.StartStopButton1 = uibutton(app.UIFigure, 'state');
            app.StartStopButton1.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@StartStopButton1ValueChanged, true);
            app.StartStopButton1.Text = 'Iniciar lectura';
            app.StartStopButton1.Position = [178 578 100 23];

            % Create StartStopButton2
            app.StartStopButton2 = uibutton(app.UIFigure, 'state');
            app.StartStopButton2.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@StartStopButton2ValueChanged, true);
            app.StartStopButton2.Text = 'Iniciar lectura';
            app.StartStopButton2.Position = [178 376 100 23];

            % Create StartStopButton3
            app.StartStopButton3 = uibutton(app.UIFigure, 'state');
            app.StartStopButton3.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@StartStopButton3ValueChanged, true);
            app.StartStopButton3.Text = 'Iniciar lectura';
            app.StartStopButton3.Position = [178 177 100 23];

            % Create UNIVERSIDADTECNICADELNORTELabel
            app.UNIVERSIDADTECNICADELNORTELabel = uilabel(app.UIFigure);
            app.UNIVERSIDADTECNICADELNORTELabel.HorizontalAlignment =
'center';
            app.UNIVERSIDADTECNICADELNORTELabel.FontSize = 24;
            app.UNIVERSIDADTECNICADELNORTELabel.FontWeight = 'bold';
            app.UNIVERSIDADTECNICADELNORTELabel.Position = [258 711 436 32];
            app.UNIVERSIDADTECNICADELNORTELabel.Text = 'UNIVERSIDAD TECNICA
DEL NORTE';

            % Create FACULTADDEINGENIERAENCIENCIASAPLICADASLabel
            app.FACULTADDEINGENIERAENCIENCIASAPLICADASLabel =
uilabel(app.UIFigure);
            app.FACULTADDEINGENIERAENCIENCIASAPLICADASLabel.FontWeight =
'bold';
            app.FACULTADDEINGENIERAENCIENCIASAPLICADASLabel.Position = [318
690 315 22];
```

```
            app.FACULTADDEINGENIERAENCIENCIASAPLICADASLabel.Text = 'FACULTAD
DE INGENIERA EN CIENCIAS APLICADAS';

            % Create INGENIERIAELECTRICALabel
            app.INGENIERIAELECTRICALabel = uilabel(app.UIFigure);
            app.INGENIERIAELECTRICALabel.FontWeight = 'bold';
            app.INGENIERIAELECTRICALabel.Position = [402 669 147 22];
            app.INGENIERIAELECTRICALabel.Text = 'INGENIERIA ELECTRICA';

            % Create CaracterizaciondebateriasLion18650Label
            app.CaracterizaciondebateriasLion18650Label =
uilabel(app.UIFigure);
            app.CaracterizaciondebateriasLion18650Label.FontSize = 14;
            app.CaracterizaciondebateriasLion18650Label.FontWeight = 'bold';
            app.CaracterizaciondebateriasLion18650Label.Position = [336 640
279 22];
            app.CaracterizaciondebateriasLion18650Label.Text =
'Caracterizacion de baterias Li - on 18650';

            % Create Image
            app.Image = uiimage(app.UIFigure);
            app.Image.Position = [789 630 100 100];
            app.Image.ImageSource = fullfile(pathToMLAPP, 'logo-
colegio.png');

            % Create Image2
            app.Image2 = uiimage(app.UIFigure);
            app.Image2.Position = [45 630 100 100];
            app.Image2.ImageSource = fullfile(pathToMLAPP, '1.png');

            % Create deDescargaEditFieldLabel
            app.deDescargaEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
            app.deDescargaEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
            app.deDescargaEditFieldLabel.Position = [301 578 90 22];
            app.deDescargaEditFieldLabel.Text = '% de  Descarga';

            % Create CargaPctEdit1
            app.CargaPctEdit1 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.CargaPctEdit1.Position = [406 578 100 22];

            % Create deDescargaEditField_2Label
            app.deDescargaEditField_2Label = uilabel(app.UIFigure);
            app.deDescargaEditField_2Label.HorizontalAlignment = 'right';
            app.deDescargaEditField_2Label.Position = [301 376 90 22];
            app.deDescargaEditField_2Label.Text = '% de  Descarga';

            % Create CargaPctEdit2
            app.CargaPctEdit2 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.CargaPctEdit2.Position = [406 376 100 22];

            % Create deDescargaEditField_3Label
            app.deDescargaEditField_3Label = uilabel(app.UIFigure);
            app.deDescargaEditField_3Label.HorizontalAlignment = 'right';
            app.deDescargaEditField_3Label.Position = [301 177 90 22];
            app.deDescargaEditField_3Label.Text = '% de  Descarga';
```

```
            % Create CargaPctEdit3
            app.CargaPctEdit3 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
            app.CargaPctEdit3.Position = [406 177 100 22];

            % Create StartAllButton
            app.StartAllButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
            app.StartAllButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@StartAllButtonPushed, true);
            app.StartAllButton.Position = [175 639 100 23];
            app.StartAllButton.Text = 'Iniciar Lecturas';

            % Show the figure after all components are created
            app.UIFigure.Visible = 'on';
        end
    end

    % App creation and deletion
    methods (Access = public)

        % Construct app
        function app = AppTesisFinal

            % Create UIFigure and components
            createComponents(app)

            % Register the app with App Designer
            registerApp(app, app.UIFigure)

            % Execute the startup function
            runStartupFcn(app, @startupFcn)

            if nargout == 0
                clear app
            end
        end

        % Code that executes before app deletion
        function delete(app)

            % Delete UIFigure when app is deleted
            delete(app.UIFigure)
        end
    end
end
```

Anexo D. Especificaciones de batería Li-ion ICR18650-26J M

Item	Specification
3.1 Nominal Capacity	2600mAh (0.2C, 2.75V discharge)
3.2 Minimum Capacity	2550mAh(0.2C, 2.75V discharge)
3.3 Charging Voltage	4.2 ±0.05 V
3.4 Nominal Voltage	3.63V
3.5 Charging Method	CC-CV (constant voltage with limited current)
3.6 Charging Current	Standard charge: 1300mA Rapid charge : 2600mA
3.7 Charging Time	Standard charge : 3hours Rapid charge : 2.5hours
3.8 Max. Charge Current	2600mA(ambient temperature 25℃)
3.9 Max. Discharge Current	5200mA(ambient temperature 25℃)
3.10 Discharge Cut-off Voltage	2.75V
3.11 Cell Weight	45.0g max
3.12 Cell Dimension	Height : 65.00mm max Diameter : 18.40mm max
3.13 Operating Temperature	Charge : 0 to 45℃ Discharge: -20 to 60℃
3.14 Storage Temperature	1 year : -20~25℃(1*) 3 months : -20~45℃(1*) 1 month : -20~60℃(1*)

Cronograma de actividades

Objetivos específicos	Actividades	sept-24	oct-24	nov-24	dic-24	ene-25	feb-25	mar-25	abr-25	may-25	jun-25	jul-25	ago-25	sept-25	oct-25	nov-25	dic-25	ene-26	feb-26	Porcentaje ponderado (%)
1. Describir los diferentes tipos de baterías de Li-ion y sus aplicaciones.	1.1 Investigar las características principales de los diferentes tipos de baterías Li-ion	X	X	X																30%
	1.2 Identificar las aplicaciones comunes de cada tipo de batería		X	X																
	1.3 Comparar ventajas y limitaciones de cada tipo de batería de Li-ion				X															
2. Analizar los métodos de caracterización no invasiva para baterías de Li-ion.	2.1 Investigar los métodos de caracterización no invasiva en baterías de Li-ion				X	X	X													30%
	2.2 Analizar las limitaciones de cada método de caracterización no invasiva					X	X	X												
	2.3 Selección y justificación del método del método más adecuado para el prototipo							X	X											
3. Implementar un prototipo de descargas múltiple para la caracterización de baterías Li-ion.	3.1 Diseñar el esquema básico del prototipo de descargas múltiple									X	X	X								40%
	3.2 Programar el sistema embebido tipo Arduino para recolección de datos y MATLAB para la presentación de datos											X	X	X	X					
	3.3 Realizar pruebas preliminares con baterías de muestra y ajuste del prototipo según los resultados obtenidos													X	X	X	X	X	X	

Recursos y presupuesto

Para el desarrollo del presente trabajo de integración curricular se consideraron diversos recursos, materiales, equipos y herramientas necesarias para la implementación del prototipo de descargas múltiple para la caracterización de baterías Li-ion. A continuación, se presenta una estimación del presupuesto requerido en la ejecución del proyecto, organizada por rubros y considerando un porcentaje adicional destinado a imprevistos.

Tabla 7 Resumen de recursos y presupuesto por rubro.

Nº	RUBROS	GASTOS ($)	PORCENTAJE
1	Equipos	226,00	45,19
2	Recursos Bibliográficos y Software	10,00	2,00
3	Materiales y Suministros	235,20	47,04
4	Transferencia de resultados	0,00	0,00
5	Subcontratos y servicios	0,00	0,00
6	Transporte	0,00	0,00
7	Imprevistos (10%)	47,12	9,42
	TOTAL	500,32	100%

El financiamiento del presente trabajo es de carácter propio, ya que los gastos asociados a la adquisición de materiales, componentes y equipos necesarios para el desarrollo del prototipo fueron cubiertos directamente por el autor del proyecto.