

## Diseño e Implementación Electrónica de un Sistema de Gestión de Baterías LiFePO<sub>4</sub>

### Design and Electronic Implementation of a LiFePO<sub>4</sub> Battery Management System

Alan Fuentes-Garcidueñas<sup>1</sup>, José Luis López-Ramírez<sup>1,4</sup>, Juan de Anda-Suarez<sup>1</sup>, Rogelio Castro-Sanchez<sup>2</sup>, Pedro López-Rodríguez<sup>5</sup>, Gabriel Marcelo de Jesús Rosado-Ortiz<sup>3</sup>, Germán Pérez-Zúñiga<sup>3</sup>, Luis Fernando Villanueva-Jimenez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> División de Ingeniería Electromecánica, ITS de Purísima del Rincón, Tecnológico Nacional de México. luis.lr@purisima.tecnm.mx

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

<sup>3</sup> Departamento de Posgrado e Investigación, IT de Cancún, Tecnológico Nacional de México.

<sup>4</sup> Departamento de Investigación y Posgrado, Universidad Virtual del Estado de Guanajuato.

<sup>5</sup> Departamento de Ingeniería Automotriz, Universidad Politécnica de Guanajuato.

### Resumen

En la actualidad, existe una creciente necesidad de desarrollar sistemas avanzados para la conservación y gestión eficiente de la energía, especialmente en un entorno donde los dispositivos electrónicos y los sistemas de electromovilidad dependen en gran medida de baterías de litio. Entre estas, las baterías de fosfato de hierro y litio (LiFePO<sub>4</sub>) destacan por su estabilidad térmica, seguridad y larga vida útil, lo que las convierte en una opción preferente para aplicaciones de alto desempeño.

Con el propósito de optimizar su funcionamiento, se desarrolló el diseño e implementación electrónica de un sistema de gestión de baterías (BMS) LiFePO<sub>4</sub>, capaz de monitorear en tiempo real variables críticas como voltaje, corriente y temperatura durante los procesos de carga y descarga. El sistema integra una red de sensores de precisión y módulos de acondicionamiento de señal que garantizan lecturas confiables de las curvas características de la batería.

La arquitectura del sistema se basa en un microcontrolador ATmega328P que adquiere y transmite los datos hacia el entorno de programación LabVIEW, donde se realiza la visualización, almacenamiento y análisis de los parámetros eléctricos. Adicionalmente, se propone el uso de técnicas de inteligencia artificial para el procesamiento de datos históricos, con el fin de identificar patrones de degradación, predecir el estado de carga (SoC, por sus siglas en inglés) y estimar la vida útil restante (SoH, por sus siglas en inglés) de las celdas.

Este desarrollo constituye una plataforma experimental que combina instrumentación electrónica, adquisición de datos y análisis inteligente, orientada a mejorar la eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad de los sistemas basados en baterías de litio.

**Palabras clave:** Batería LiFePO<sub>4</sub>; Sistema de Gestión de Baterías; Estado de Carga; Estado de Salud; LabVIEW; Curvas Paramétricas.

### Introducción

Las baterías están experimentando un significativo aumento en la demanda del mercado. Se proyecta que el mercado global de baterías registre una tasa de crecimiento anual compuesta del 16.45% entre 2024 y 2032. Una batería es un sistema de almacenamiento de energía química que se convierte en energía eléctrica. Está compuesta por electrodos positivos y negativos, separados por un electrolito que forma parte integral de la batería. Durante el proceso de descarga, las reacciones químicas generan energía eléctrica (Inkwood Research, 2024).

Las baterías se han incorporado en dispositivos portátiles, haciéndolos más eficientes y prácticos, como computadoras, teléfonos móviles, radios, auriculares, cámaras fotográficas, sistemas de iluminación, juguetes y relojes, entre otros. Además, su uso se ha extendido a sistemas más complejos, como máquinas industriales, robots y vehículos eléctricos (Pistoia, 2007).



Numerosos estudios han explorado en profundidad el análisis de los procesos de carga y descarga de baterías. Un ejemplo destacado es el trabajo de (Saavedra Guarderas & Sibri Lazo, 2018), que se enfoca en el comportamiento de baterías utilizadas en vehículos. Este estudio emplea LabVIEW, un software que simula instrumentos de medición como osciloscopios y multímetros (véase Figura 1). Gracias a esta herramienta, se logra una adquisición precisa de datos, así como su visualización y almacenamiento, lo que permite realizar un análisis exhaustivo del rendimiento de las baterías. De este modo, es posible identificar patrones y comportamientos específicos durante el proceso de descarga, contribuyendo a una mejor comprensión de su funcionamiento y durabilidad.

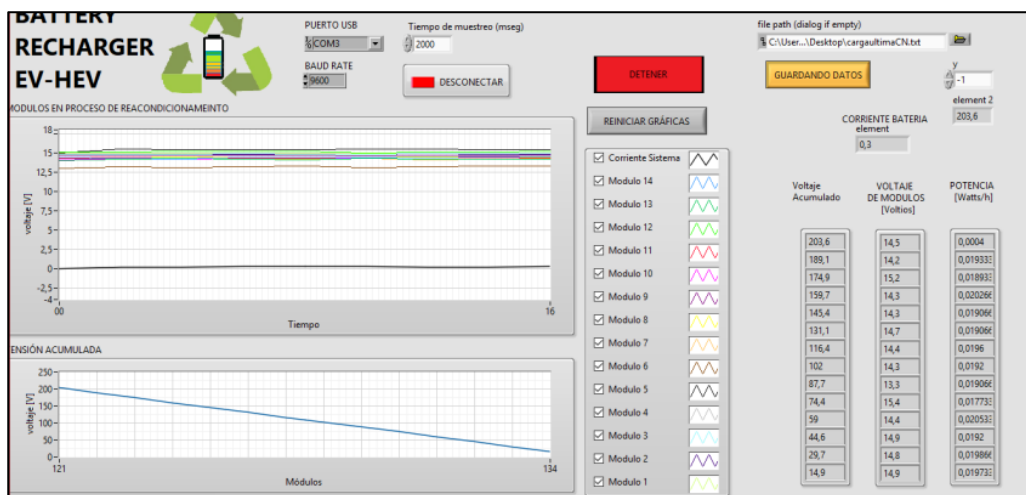


Figura 1. Programa de adquisición de datos.  
Fuente: Saavedra Guarderas & Sibri Lazo, 2018.

En un estudio reciente, Vilaragut Llanes & Díaz Cárdenas (2023) presentan una función computacional desarrollada en MATLAB orientada a la selección automática de baterías de plomo-ácido, diseñadas específicamente para sistemas de alimentación de respaldo en centros de comunicaciones. El proceso de selección se basa en tablas de datos de catálogo, las cuales contienen información técnica esencial sobre las características eléctricas y de desempeño de diferentes modelos de baterías. Este enfoque garantiza la elección del componente más adecuado según los requerimientos energéticos del sistema.

Posteriormente, los autores implementan un monitoreo detallado del proceso de descarga, representado mediante una curva de tiempo de autonomía que describe la relación entre la corriente de descarga y el tiempo durante el cual la batería mantiene un nivel operativo estable. Este análisis permite evaluar la eficiencia y fiabilidad del sistema bajo condiciones reales de operación, contribuyendo a la optimización del diseño de bancos de baterías y a la mejora de su desempeño en aplicaciones críticas.

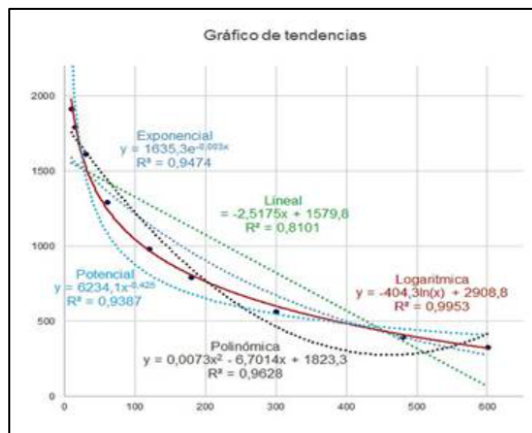


Figura 2. Líneas de tendencia, ecuaciones características y valor de varianza en MATLAB.  
 Fuente: Vilaragut Llanes & Díaz Cárdenas, 2023.

En otra investigación, Olmo Esteban (2019) examina la parametrización del modelo de envejecimiento de una batería de litio compuesta por catorce celdas, sometida a múltiples ciclos de carga y descarga durante un año. Para llevar a cabo este análisis, se recopilaron datos experimentales obtenidos bajo condiciones controladas de laboratorio, los cuales permitieron establecer las constantes de parametrización eléctrica del sistema. Además, se integraron mediciones térmicas complementarias, fundamentales para comprender el comportamiento de la batería ante variaciones de temperatura. Los resultados proporcionan una visión más completa del proceso de degradación y pérdida de capacidad a lo largo del tiempo, contribuyendo así al desarrollo de modelos predictivos más precisos sobre la vida útil de las celdas de ion-litio.

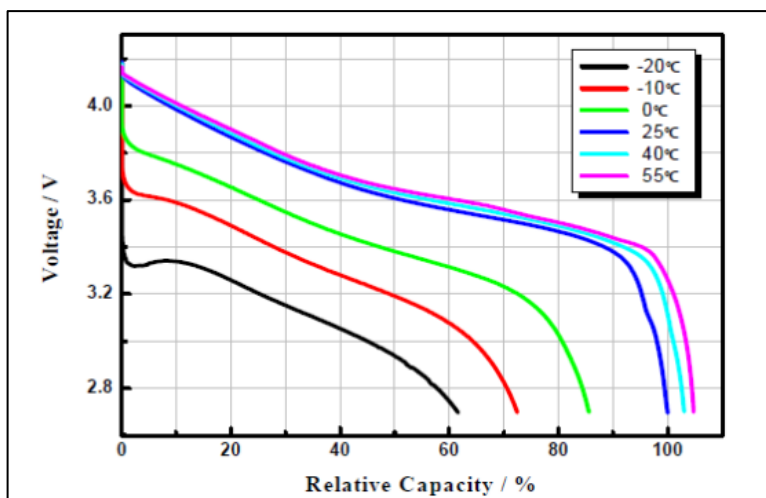


Figura 3. Curvas de descarga a 0.5 C de la batería en distintas temperaturas.  
 Fuente: Olmo Esteban, 2019.

El presente trabajo se centra en el diseño y desarrollo de un dispositivo electrónico orientado al análisis preciso de las curvas de carga y descarga de baterías de litio, con el propósito de evaluar su rendimiento y comportamiento dinámico. Este dispositivo no solo busca profundizar en la comprensión del desempeño electroquímico de las baterías, sino también proporcionar información cuantitativa que facilite el diseño de sistemas más eficientes, seguros y duraderos.

La relevancia de este análisis radica en la creciente demanda de soluciones de almacenamiento energético sostenibles y de alto rendimiento, especialmente en los sectores de la electrónica portátil, la electromovilidad y las energías renovables. Se espera que el sistema desarrollado permita identificar patrones característicos en las curvas de carga y descarga —como la tasa de carga, la capacidad de retención de energía y la respuesta térmica ante ciclos repetitivos, lo cual resulta esencial para determinar el estado de carga (SoC) y el estado de salud (SoH) de las celdas.



El análisis de estos patrones contribuirá al desarrollo de modelos predictivos de degradación capaces de optimizar la eficiencia energética y prolongar la vida útil de las baterías. En consecuencia, este proyecto representa un avance hacia el uso racional y sostenible de la energía, al reducir la necesidad de reemplazos frecuentes y minimizar el impacto ambiental asociado al desecho de componentes electrónicos.

A lo largo de este documento se presentan la metodología de desarrollo del sistema, los resultados experimentales obtenidos y la discusión de su relevancia tecnológica y científica.

## Metodología

### Fase 1: Acondicionamiento de la señal y diseño de la tarjeta PCB

En esta primera fase se desarrolló un circuito electrónico con la capacidad de registrar y analizar las curvas de carga y descarga de baterías de litio de distintos modelos. Para ello, se emplearon amplificadores operacionales, cuya función es acondicionar y amplificar la señal eléctrica proveniente de la batería, permitiendo su correcta interpretación por parte del microcontrolador (Boylestad & Nashelsky, 2009).

El circuito incorpora además una etapa de filtrado, diseñada para eliminar el ruido e interferencias no deseadas, garantizando así una señal de salida más estable y precisa (Bryars, 2023). Este proceso de acondicionamiento resulta esencial para asegurar la fidelidad de las mediciones de voltaje durante los ciclos de carga y descarga.

La Figura 4 muestra el diagrama esquemático del circuito de acondicionamiento de señal, empleado para la lectura de voltaje de las celdas de la batería.

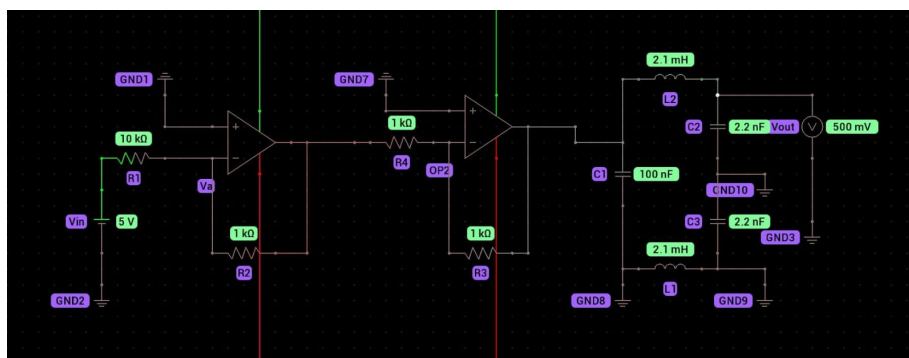


Figura 4. Diagrama de circuito de lectura de voltaje.  
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se utilizó el software de simulación y diseño electrónico Proteus para la elaboración del diseño de la tarjeta PCB, garantizando su compatibilidad eléctrica y dimensional con el microcontrolador ATmega328P seleccionado. Durante el proceso de diseño se consideraron las especificaciones físicas de los componentes, las distancias mínimas de seguridad entre pistas y la optimización del ruteo de señales, con el fin de minimizar interferencias y pérdidas de precisión en las mediciones.

El resultado de este proceso se muestra en la Figura 5, donde se aprecia el diseño final de la tarjeta PCB destinada a la medición del voltaje de las celdas de la batería.

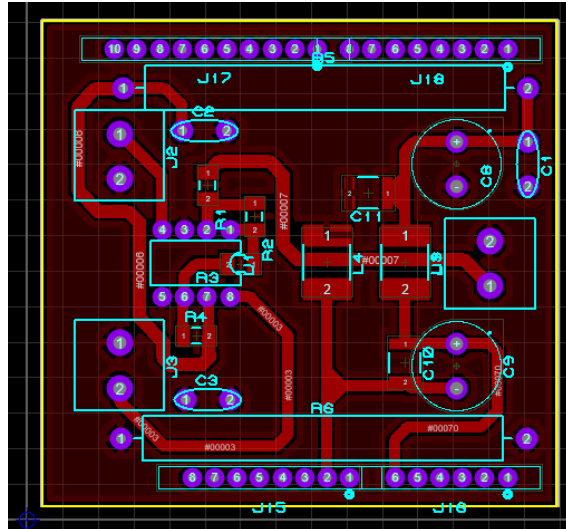


Figura 5. Diseño de pcb del circuito para medir voltaje.  
Fuente: Elaboración propia.

## Fase 2: Creación del circuito para la lectura de corriente

Siguiendo los mismos pasos establecidos en la Fase 1, se desarrolla el diseño de la placa PCB encargada de realizar la lectura de corriente, la cual trabaja en conjunto con la primera placa de medición de voltaje. Para esta etapa, se integra el sensor ACS712-20A, responsable de convertir la corriente que circula a través del circuito en una señal analógica proporcional, apta para ser procesada por el microcontrolador.

El diseño de esta PCB se elabora respetando las dimensiones y la disposición de componentes del circuito anterior, garantizando así la compatibilidad mecánica y eléctrica entre ambas placas. En la Figura 6 se presenta el diseño final de la tarjeta PCB, en el cual se aprecian las medidas y la ubicación del sensor ACS712-20A.

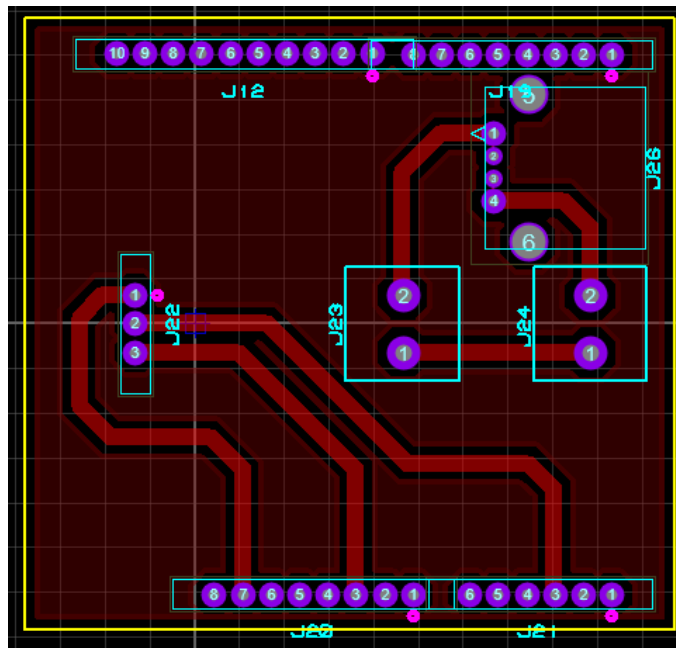


Figura 6. Diseño de PCB del circuito para medir corriente.  
Fuente: Elaboración propia.

### Fase 3: Creación del circuito para la lectura de temperatura

En esta Fase se desarrolla un circuito basado en un puente de Wheatstone, conformado por dos resistencias variables, una resistencia fija y un sensor de temperatura, de acuerdo con los principios descritos por Pallas-Areny (2017). Este diseño permite obtener una señal proporcional a la variación térmica, la cual posteriormente es acondicionada y procesada por el microcontrolador.

Se realizaron pruebas experimentales de comparación de temperatura utilizando un sensor de referencia, con el propósito de calibrar las resistencias variables y ajustar la salida del circuito de modo que refleje valores de temperatura reales. Dichas pruebas se efectuaron tras la implementación del programa encargado de adquirir las lecturas de voltaje, corriente y temperatura.

Asimismo, se elaboró el diseño del circuito en el software Proteus, respetando las dimensiones y disposición de los componentes de las placas anteriores, con el fin de asegurar un ensamble modular y compatible entre todas las tarjetas. En la Figura 7 se muestra el diseño final de la placa PCB destinada a la lectura de temperatura.

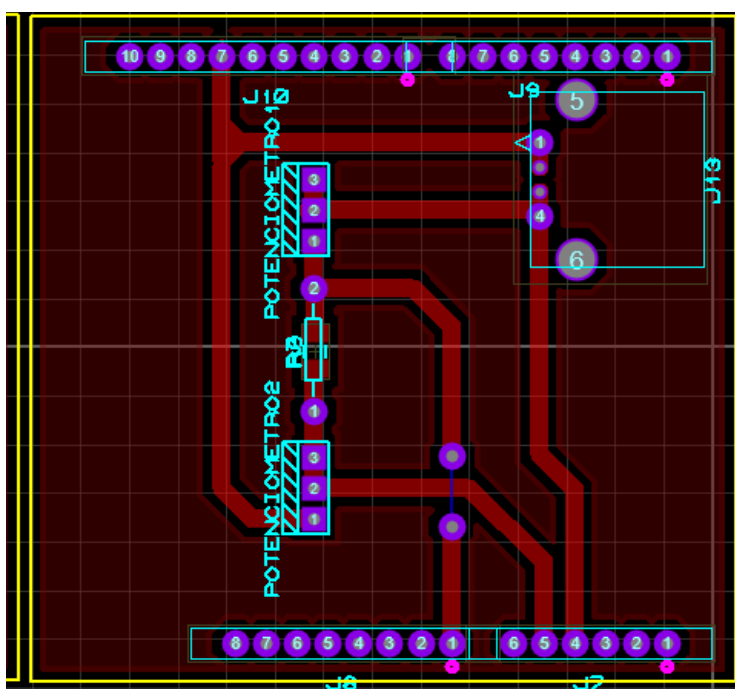


Figura 7. Diseño de PCB del circuito para medir temperatura.  
Fuente: Elaboración propia.

### Fase 4: Generación de código G y maquinado de las placas PCB

Una vez completados los diseños de las placas PCB en **Proteus**, se genera el archivo **Gerber**, el cual contiene la información de las capas de cobre, perforaciones y contornos de las tarjetas. Posteriormente, mediante el software **FlatCam**, estos archivos son convertidos a **código G**, necesario para el proceso de maquinado en un **Router CNC**.

Se implementan los mismos parámetros de configuración para cada diseño, considerando que cada placa se maquinará de forma individual con el propósito de **evitar errores de desplazamiento o superposición** durante el fresado.

El control del **Router CNC** se lleva a cabo mediante el programa **Candle**, el cual permite ejecutar las trayectorias de maquinado correspondientes a las pistas, perforaciones y cortes finales de las tarjetas. Una vez concluidas las operaciones de fresado, se realiza una **verificación de continuidad eléctrica** en cada placa con el fin de detectar posibles interrupciones o cortocircuitos.



Finalmente, tras confirmar la correcta integridad de las pistas, se procede con la **soldadura e integración de los componentes electrónicos** en las placas. En la **Figura 8** se muestra el proceso de maquinado y ensamble de las placas PCB.

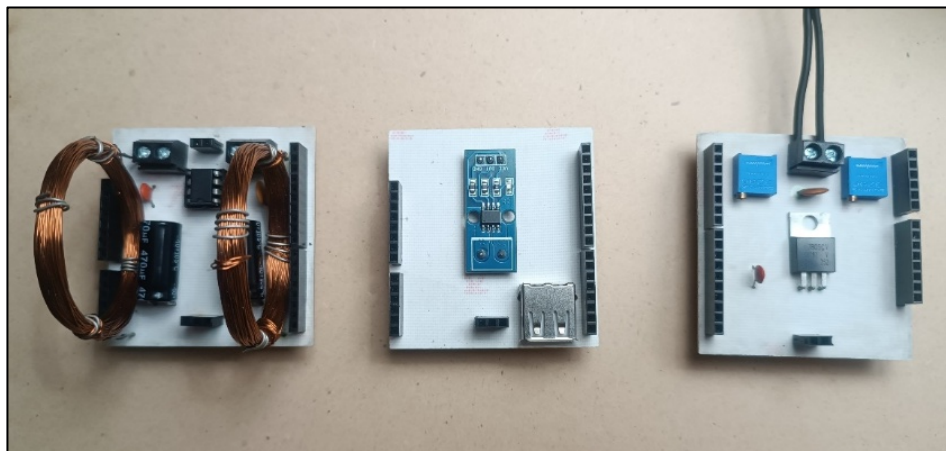


Figura 8. Componentes montados a las placas PCB.  
Fuente: Elaboración propia.

### Fase 5: Programación de la interfaz de lectura de voltaje, corriente y temperatura

Se desarrolla una interfaz de monitoreo y adquisición de datos utilizando el software LabVIEW, con el propósito de visualizar en tiempo real las lecturas obtenidas de las variables de voltaje, corriente y temperatura provenientes de las placas diseñadas en las fases anteriores.

El programa se implementa mediante un diagrama de bloques, en el cual se integran las funciones necesarias para la comunicación con el microcontrolador, el procesamiento de las señales adquiridas y la representación gráfica de los parámetros eléctricos y térmicos.

Esta interfaz permite observar las curvas de carga y descarga de las baterías de litio, así como los cambios de temperatura asociados a las pruebas experimentales, facilitando el análisis del comportamiento del sistema en distintas condiciones operativas.

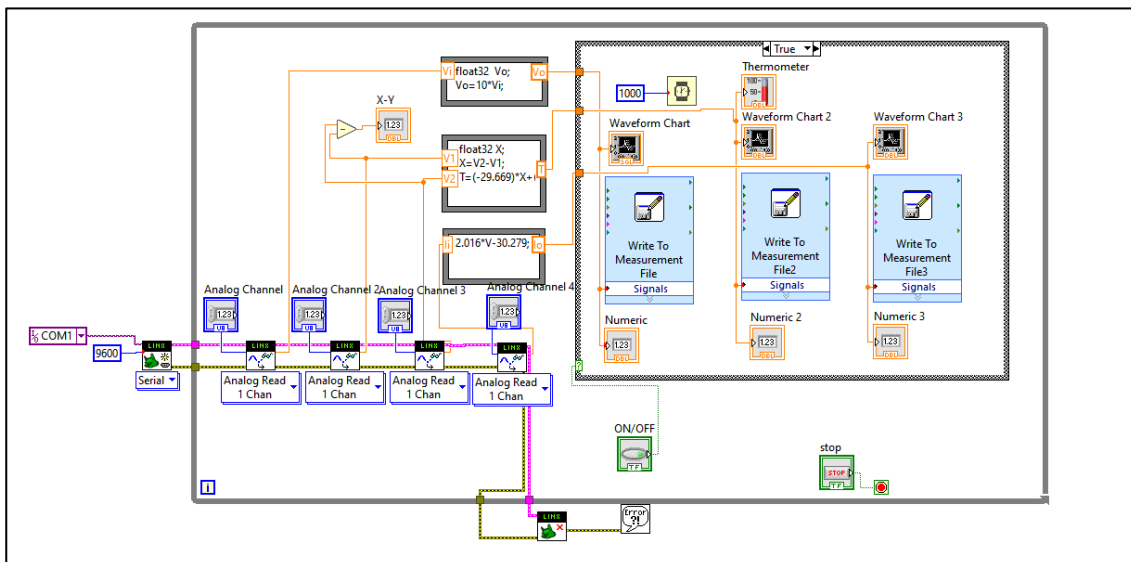


Figura 9. Diagrama de bloques en LABVIEW.  
Fuente: Elaboración propia.

### Ensamble final de las placas PCB con el microcontrolador

Como etapa final, se procede al ensamble de las tres placas PCB junto con el microcontrolador Arduino UNO, respetando el orden de integración para asegurar la correcta funcionalidad del sistema. Inicialmente, se monta la placa de lectura de temperatura, seguida de la placa encargada de la medición de corriente, y finalmente se ensambla la placa destinada a la lectura de voltaje.

Este ensamblaje secuencial garantiza que todas las conexiones eléctricas y mecánicas sean compatibles y que las señales adquiridas por cada sensor puedan ser correctamente procesadas y visualizadas mediante la interfaz desarrollada en LabVIEW.

En la Figura 10 se muestra el ensamble final de las tres placas PCB junto con el microcontrolador, listo para su operación y pruebas experimentales.

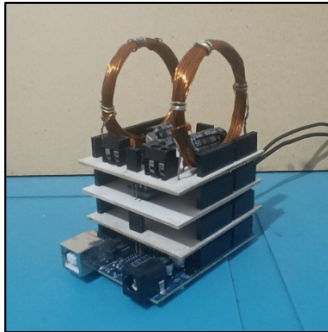


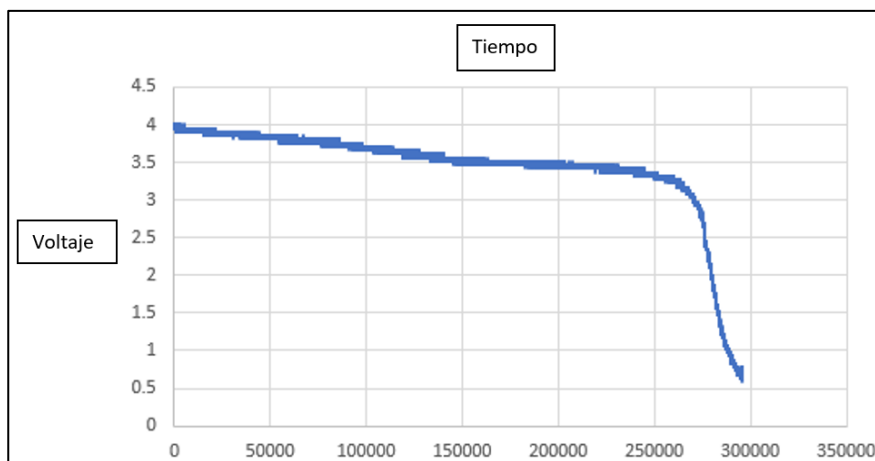
Figura 10. Ensamble final de las tres placas PCB y el microcontrolador.  
Fuente: Elaboración propia.

### Resultados

En este trabajo se evaluó el comportamiento de carga y descarga de una batería de litio modelo 18650, con una capacidad nominal de 2200 mAh y un voltaje de 3.7 V, con el objetivo de obtener sus curvas características de descarga y carga.

Las baterías fueron sometidas a un ciclo de descarga controlado mediante un motor, registrando las variables de voltaje y corriente en tiempo real a través del sistema desarrollado. La duración total del ciclo de descarga se estimó en aproximadamente 42 horas, permitiendo capturar de manera detallada la dinámica de la batería durante todo el proceso.

En la Gráfica 1 se presenta la curva de descarga de la batería 18650, obtenida a partir de las mediciones registradas por el sistema de adquisición de datos, lo que permite analizar el comportamiento del voltaje a lo largo del tiempo y comparar los resultados con estudios previos sobre baterías de características similares.



Grafica 1. Curva de descarga de batería 18650.  
 Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos fueron registrados con una frecuencia de adquisición de un dato por segundo, permitiendo analizar de manera detallada la variación del voltaje durante el proceso de descarga. Debido al volumen total de información recopilada aproximadamente 295,890 registros de voltaje; a continuación, se presenta una fracción representativa de los datos obtenidos, que resume los cambios de voltaje en función del tiempo.

En la Tabla 1 se muestran los valores seleccionados para ilustrar la evolución del voltaje durante la descarga de la batería modelo 18650.

**Tabla 1.** Tabla representa tiempo y voltaje de descarga.

Time	Time*	Unitted
15/12/2024 11:05:41.701 AM	1	4.00390625
15/12/2024 11:05:42.225 AM	2	3.955078125
15/12/2024 11:05:42.748 AM	3	3.955078125
15/12/2024 11:05:43.273 AM	4	3.955078125
15/12/2024 11:05:43.796 AM	5	3.955078125
15/12/2024 11:05:44.318 AM	6	3.955078125
15/12/2024 11:05:44.841 AM	7	3.955078125
15/12/2024 11:05:45.364 AM	8	3.955078125
15/12/2024 11:05:45.886 AM	9	4.00390625
15/12/2024 11:05:46.408 AM	10	3.955078125
15/12/2024 11:05:46.932 AM	11	3.955078125
15/12/2024 11:05:47.458 AM	12	3.955078125
15/12/2024 11:05:47.981 AM	13	3.955078125
15/12/2024 11:05:48.503 AM	14	3.955078125
15/12/2024 11:05:49.027 AM	15	3.955078125
15/12/2024 11:05:49.551 AM	16	3.955078125
15/12/2024 11:05:50.076 AM	17	3.955078125
15/12/2024 11:05:50.599 AM	18	4.00390625
15/12/2024 11:05:51.121 AM	19	3.955078125
15/12/2024 11:05:51.648 AM	20	3.955078125
15/12/2024 11:05:52.169 AM	21	3.955078125
15/12/2024 11:05:52.692 AM	22	3.955078125
15/12/2024 11:05:53.217 AM	23	3.955078125
15/12/2024 11:05:53.739 AM	24	3.955078125
15/12/2024 11:05:54.261 AM	25	3.955078125
15/12/2024 11:05:54.786 AM	26	3.955078125
15/12/2024 11:05:55.309 AM	27	3.955078125
15/12/2024 11:05:55.833 AM	28	3.955078125
15/12/2024 11:05:56.355 AM	29	3.955078125
15/12/2024 11:05:56.878 AM	30	3.955078125
15/12/2024 11:05:57.401 AM	31	3.955078125
15/12/2024 11:05:57.924 AM	32	3.955078125
15/12/2024 11:05:58.446 AM	33	3.955078125
15/12/2024 11:05:58.968 AM	34	3.955078125
15/12/2024 11:05:59.492 AM	35	3.955078125
15/12/2024 11:06:00.015 AM	36	3.955078125
15/12/2024 11:06:00.538 AM	37	3.955078125

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los resultados obtenidos con estudios previos sobre la descarga de baterías, se observa que la curva de descarga registrada en este trabajo coincide estrechamente con la reportada por Ufine (2024). Esta concordancia valida la precisión del sistema desarrollado para la adquisición de datos y confirma que las mediciones realizadas reflejan fielmente el comportamiento real de la batería durante el ciclo de descarga, como se muestra en la Figura 11.



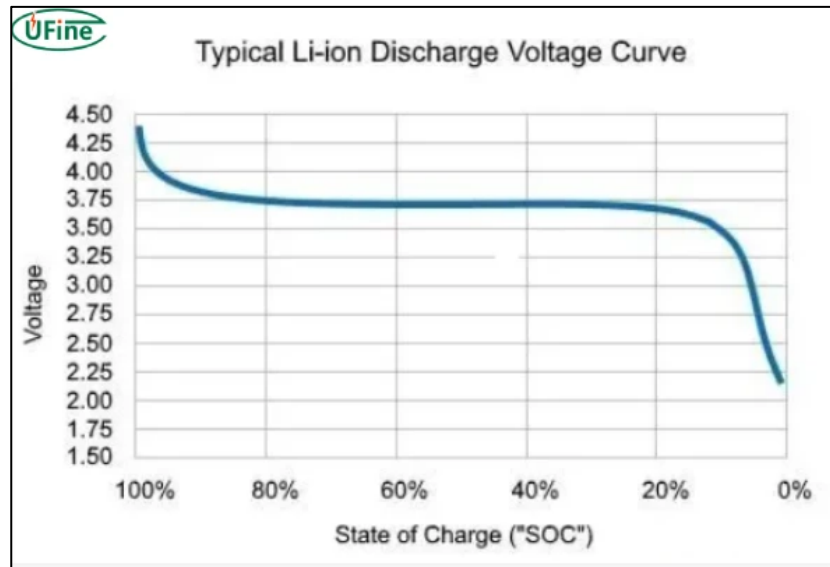


Figura 11. Curva de descarga de baterías.  
Fuente: Ufine, 2024.

## Conclusiones

- **Desarrollo y funcionalidad del sistema:** Se diseñó e implementó con éxito un sistema de adquisición de datos para el análisis de baterías LiFePO<sub>4</sub>, integrando la medición de voltaje, corriente y temperatura mediante placas PCB específicas y un microcontrolador Arduino UNO. El sistema permitió monitorear en tiempo real los parámetros críticos durante los ciclos de carga y descarga, validando su correcta operación y precisión.
- **Validación experimental:** Las pruebas realizadas con baterías modelo 18650 demostraron que el dispositivo es capaz de capturar con detalle las curvas de descarga y carga, proporcionando información confiable para el análisis del comportamiento de las baterías. La curva de descarga obtenida coincidió estrechamente con resultados reportados en estudios previos (Ufine, 2024), confirmando la exactitud del sistema.
- **Importancia de la instrumentación electrónica:** La implementación de circuitos de acondicionamiento de señal, filtrado y calibración permitió minimizar interferencias y errores de medición, asegurando la integridad de los datos adquiridos. El diseño modular de las placas PCB facilitó el ensamblaje y la compatibilidad entre los diferentes sensores, optimizando la operación del sistema.
- **Aplicaciones futuras y sostenibilidad:** El sistema desarrollado constituye una plataforma experimental para estudios avanzados de baterías de litio, que puede ser utilizada para evaluar el estado de carga (SoC) y el estado de salud (SoH) de las celdas. Esta información es crucial para optimizar el diseño de baterías más eficientes y duraderas, contribuyendo a la eficiencia energética y la sostenibilidad de los sistemas de almacenamiento de energía.
- **Posibilidad de integración con análisis inteligente:** La plataforma diseñada abre la posibilidad de incorporar técnicas de inteligencia artificial y modelado predictivo para anticipar patrones de degradación, mejorar la gestión de energía y prolongar la vida útil de las baterías, ampliando su aplicabilidad en sectores como electromovilidad, energías renovables y electrónica avanzada.

## Referencias

- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2009). *Electronica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos* (10th ed.). (L. M. Cruz castillo, Ed.) Naucalpan de juarez, Estado de Mexico, Mexico: Pearson Educacion.
- Bryars, A. (27 de abril de 2023). *redeweb. Revista española de electronica*.  
<https://www.redeweb.com/articulos/seleccion-de-filtros-modulares-de-emi-para-convertidores-ca-cc/>
- Inkwood Research. (2024). *Pronóstico del mercado mundial de baterías 2024-2032*. inkwoodresearch.  
<https://www.inkwoodresearch.com/reports/battery-market/>
- Olmo Esteban, G. (2019). *Caracterizacion de baterias de litio para el estudio del envejecimiento*. Madris: Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- Pallas Areny, R. (2017). *Sensores y acondicionadores de señal* (4 ed.). Mexico D.F., Maxico: Alfaomega.
- Pistoia, G. (2007). *Batteries for Portable Devices*. Roma, Italia: Elsevier.
- Saavedra Guarderas, J. A., & Sibri Lazo, J. G. (2018). *Analisis del comportamiento de baterias usadas en vehiculos hibridos durante el proceso de recuperacion*. Cuenca: Universidad politecnica Salesiana Sede Cuenca.
- Ufine. (22 de abril de 2024). *ufinebattery. ufineblog*. <https://www.ufinebattery.com/blog/how-to-read-lithium-battery-discharge-curve-and-charging-curve/>
- Vilaragut Llanes, M., & Díaz Cárdenas, C. (2023). Método de selección de baterías mediante un modelo de análisis de datos. *Ingeniería Energética*, XLIV(3), 104-113, 2023.

