





MÉTODOS PARA DETERMINAR EL ESTADO DE CARGA Y SALUD EN BATERIAS DE IONES DE LITIO (LiBs)

METHODS FOR DETERMINING STATE OF CHARGE AND HEALTH IN LITHIUM-ION BATTERIES (LiBs)

-  **Alexis Daniel Quintana-Lázgare**, Instituto Tecnológico Nacional de México en Celaya, Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica (México) (m2403076@itcelaya.edu.mx), (<https://orcid.org/0009-0007-9362-8356>), Máster.
-  **J. Jesús Villegas-Saucillo**, Instituto Tecnológico Nacional de México en Celaya (México) (<https://orcid.org/0000-0002-2863-5302>), Doctor.
-  **José Javier Díaz-Carmona**, Instituto Tecnológico Nacional de México en Celaya (México) (<https://orcid.org/0000-0002-7363-3349>), Doctor.
-  **Francisco J. Pérez-Pinal**, Instituto Tecnológico Nacional de México en Celaya, (México) (<https://orcid.org/0000-0002-6116-6464>), Doctor.

Resumen: El presente documento muestra un análisis de los métodos para determinar el estado de carga (SoC) y el estado de salud (SoH) en baterías de iones de litio (LiBs), tecnología crucial en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos. La investigación justifica la necesidad de monitorear estas baterías debido a su degradación con el uso y el tiempo, lo que afecta su capacidad y seguridad. El objetivo principal es evaluar y comparar los diferentes enfoques utilizados para estimar el SoC y SoH, tanto métodos tradicionales como técnicas avanzadas no invasivas.

El tipo de investigación es de carácter descriptivo y exploratorio, basada en la revisión de estudios científicos previos sobre las tecnologías y métodos disponibles para la evaluación del estado de las baterías. La metodología se centra en un análisis comparativo de técnicas como la coulombimetría, medición de voltaje de circuito abierto, y espectroscopía de impedancia electroquímica, así como de enfoques no invasivos, incluidos rayos X, ultrasonido, y campos magnéticos.

Los resultados muestran que los métodos más sencillos, como la medición de voltaje y la coulombimetría, son ampliamente usados, pero pueden presentar errores acumulativos. En contraste, los métodos no invasivos, aunque más complejos, ofrecen una mayor precisión y capacidad para detectar fallos antes de que se manifiesten externamente.

Las conclusiones principales destacan la importancia de combinar múltiples enfoques para un monitoreo eficaz, así como la promesa de técnicas avanzadas no invasivas para mejorar la seguridad y la eficiencia de las baterías de iones de litio.

Palabras clave: Estado de carga (SoC), estado de salud (SoH), baterías de iones de litio, monitoreo no invasivo, campos magnéticos.

Cómo citar: Quintana Lázgare, A.D.; Villegas-Saucillo, J.J.; Díaz-Carmona, J.J.; y Pérez-Pinal, F.J. (2024). MÉTODOS PARA DETERMINAR EL ESTADO DE CARGA Y SALUD EN BATERIAS DE IONES DE LITIO (LiBs). *Tecnología, Ciencia y Estudios Organizacionales*, 6(12), pp. 170-180. <https://doi.org/10.56913/teceo.6.12.170-180>

Recepción: 16-10-2024
Aprobación: 23-10-2024

Abstract: This paper presents an analysis of methods for determining the state of charge (SoC) and state of health (SoH) in lithium-ion batteries (LiBs), a crucial technology in electronic devices and electric vehicles. The research justifies the need to monitor these batteries due to their degradation with use and time, which affects their capacity and safety. The main objective is to evaluate and compare the different approaches used to estimate the SoC and SoH, both traditional methods and advanced non-invasive techniques.

The type of research is descriptive and exploratory, based on the review of previous scientific studies on the technologies and methods available for the evaluation of the state of batteries. The methodology focuses on a comparative analysis of techniques such as coulometry, open-circuit voltage measurement, and electrochemical impedance spectroscopy, as well as non-invasive approaches, including X-rays, ultrasound, and magnetic fields.

The results show that simpler methods, such as voltage measurement and coulometry, are widely used but can present cumulative errors. In contrast, noninvasive methods, while more complex, offer greater accuracy and ability to detect faults before they become externally apparent.

Key findings highlight the importance of combining multiple approaches for effective monitoring, as well as the promise of advanced noninvasive techniques to improve the safety and efficiency of lithium-ion batteries.

Keywords: State of charge (SoC), state of health (SoH), lithium-ion batteries, non-invasive monitoring, magnetic fields.

Introducción


Actualmente las tecnologías se han inclinado por el uso de energía verde proveniente de recursos naturales, sin embargo, el mayor inconveniente de estas es que no es posible controlar la cantidad y/o su duración, por lo que deben ser usados dispositivos de almacenamiento tales como las baterías (Balagopal & Chow, 2015).

La batería es un dispositivo que se encarga de almacenar el excedente instantáneo de energía proveniente de fuentes intermitentes y proveerla cuando estas son incapaces de satisfacer la demanda. Dichos dispositivos han cobrado importancia en varias aplicaciones, tales como sistemas híbridos para la generación de energía, pues estos necesitan dispositivos de respaldo donde almacenar la energía. Recientemente en la industria automotriz los acumuladores cumplen con la función de reducir la emisión de dióxido de carbono producido por el combustible, pues el objetivo a futuro es construir automóviles que usen energía de una batería en lugar de combustible tal como la gasolina o el Diesel (Galeotti et al., 2015).

Una batería envejece en proporción a los ciclos de carga y descarga; dichos procesos degradan las sustancias químicas que componen al dispositivo de almacenamiento; una baja carga tiene como consecuencia efectos de sulfatación y estratificación que acortan la duración de la batería, mientras que la sobrecarga provoca gases y pérdidas de agua (Coleman et al., 2008).

Debido a que la energía almacenada en una batería es limitada se vuelve importante contar con la habilidad de determinar la capacidad disponible, el estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés) y el estado de salud (SOH, por sus siglas en inglés) de dicho dispositivo; esto asegura que la batería tenga la energía disponible para ser utilizada.

Tecnologías de baterías.



Las baterías han evolucionado significativamente a lo largo de los años, y hoy en día existen varios tipos de tecnologías de baterías en el mercado, cada una con sus propias características, ventajas y desventajas. Entre las más comunes se encuentran las baterías de iones de litio, baterías de sodio, baterías de litio-ferrofosfato (LiFePO₄) y baterías de cobalto. Las baterías de iones de litio han emergido como la opción preferida en muchas aplicaciones, especialmente en dispositivos electrónicos portátiles y vehículos eléctricos, debido a su alta densidad de energía, eficiencia y rendimiento general.

Las baterías de sodio son una alternativa emergente que ha ganado atención debido a la abundancia y bajo costo del sodio en comparación con el litio. Estas baterías son especialmente atractivas para aplicaciones a gran escala, como el almacenamiento de energía renovable, debido a su potencial para ser más sostenibles y menos costosas en términos de materia prima. Sin embargo, las baterías de sodio generalmente tienen una menor densidad de energía y un rendimiento inferior en comparación con las baterías de iones de litio, lo que limita su aplicabilidad en dispositivos que requieren alta eficiencia y capacidad en un espacio reducido.

Por otro lado, las baterías de litio-ferrofosfato (LiFePO₄), aunque también son una variante de las baterías de iones de litio, ofrecen ventajas en términos de seguridad y estabilidad térmica. Estas baterías son menos propensas a la fuga térmica y, por lo tanto, tienen un menor riesgo de incendio o explosión. Además, tienen una vida útil más larga y son más resistentes a las sobrecargas. Sin embargo, su densidad de energía es menor que la de las baterías de iones de litio convencionales, lo que puede hacer que no sean la opción más adecuada para aplicaciones que requieren un espacio limitado y una alta capacidad, como teléfonos móviles o vehículos eléctricos de alto rendimiento.

Las baterías de cobalto, en general, se refieren a las baterías de iones de litio que utilizan óxido de cobalto como material del cátodo. Estas baterías son conocidas por su alta densidad de energía y su capacidad para proporcionar un rendimiento excepcional. Sin embargo, la extracción de cobalto presenta preocupaciones éticas y medioambientales, ya que a menudo se obtiene en condiciones de trabajo inadecuadas en algunos países. Además, el cobalto es un recurso limitado y costoso, lo que puede influir en el costo general de las baterías. Aunque las baterías de cobalto ofrecen ventajas en términos de rendimiento, las preocupaciones sobre la sostenibilidad y la disponibilidad del cobalto han llevado a los investigadores a explorar alternativas, incluidas las combinaciones de níquel y manganeso, que pueden reducir la dependencia del cobalto.

En comparación, las baterías de iones de litio son la mejor opción en muchas aplicaciones debido a varias ventajas clave. En primer lugar, ofrecen una alta densidad de energía, lo que significa que pueden almacenar más energía en un volumen y peso reducido. Esto es crucial para dispositivos portátiles, donde el espacio y el peso son limitados. Además, las baterías de iones de litio tienen una baja tasa de autodescarga, lo que significa que retienen su carga durante períodos prolongados, lo que las hace ideales para aplicaciones donde la carga frecuente no es práctica.

Otro aspecto importante es la cicabilidad de las baterías de iones de litio, que permite múltiples ciclos de carga y descarga sin una degradación significativa de su capacidad. Esto se traduce en una mayor vida útil de la batería, lo que es especialmente beneficioso en aplicaciones donde el reemplazo de la batería puede ser costoso o inconveniente. Además, la tecnología de baterías de iones de litio ha avanzado significativamente, lo que ha llevado a mejoras en la seguridad y en la gestión térmica, minimizando el riesgo de problemas como la fuga térmica.

La versatilidad de las baterías de iones de litio también las convierte en una opción preferida para una variedad de aplicaciones, desde teléfonos móviles y computadoras portátiles hasta vehículos

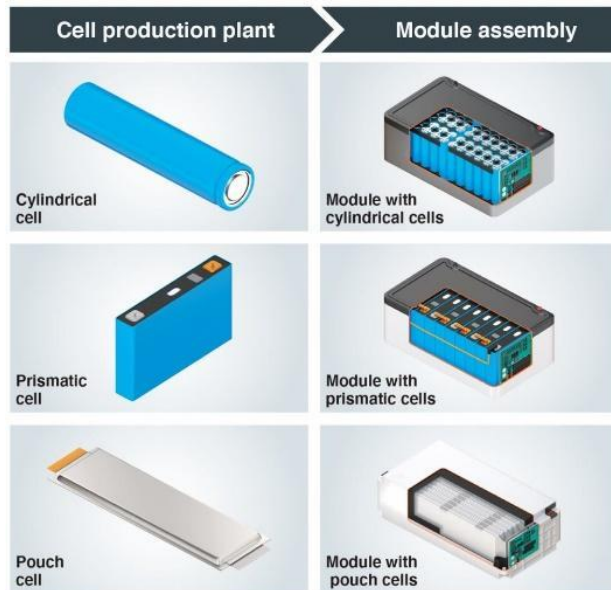
eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía en el hogar. Su capacidad para adaptarse a diferentes necesidades energéticas y su rendimiento confiable en diversas condiciones de operación son características que no se pueden pasar por alto. Además, con el avance continuo de la tecnología, se están desarrollando nuevas químicas y diseños de baterías de iones de litio que buscan mejorar aún más la densidad de energía, la seguridad y la sostenibilidad.

En resumen, aunque existen varias tecnologías de baterías disponibles en el mercado, las baterías de iones de litio se destacan por su alta densidad de energía, bajo costo de mantenimiento y rendimiento superior en comparación con otras alternativas. Las baterías de sodio y LiFePO₄ ofrecen beneficios en términos de sostenibilidad y seguridad, pero a menudo comprometen la densidad de energía y el rendimiento general. Las baterías de cobalto presentan desafíos relacionados con la ética y la sostenibilidad, a pesar de su capacidad de proporcionar un alto rendimiento. A medida que la demanda de soluciones de energía sostenible continúa creciendo, las baterías de iones de litio seguirán siendo la opción preferida para una variedad de aplicaciones, impulsadas por su capacidad para proporcionar energía de manera eficiente y confiable en un mundo en constante evolución.

¿Qué son las baterías de iones de litio?

Las baterías de iones de litio son una de las tecnologías de almacenamiento de energía más utilizadas en la actualidad. Están presentes en dispositivos como teléfonos móviles, computadoras portátiles, automóviles eléctricos e incluso en sistemas de almacenamiento para energías renovables. Su popularidad se debe a su alta densidad energética, es decir, pueden almacenar mucha energía en un tamaño relativamente pequeño y con un peso ligero en comparación con otras tecnologías de baterías. Existen tres principales tipos de geometrías para baterías de iones de litio, la unidad básica de almacenamiento de energía en una batería. Es el componente individual que convierte la energía química en energía eléctrica mediante una reacción electroquímica es conocido como una celda de batería; a partir de estas celdas se pueden conformar paquetes que forman una batería más grande que puede almacenar y entregar más energía, de acuerdo con las especificaciones y parámetros requeridos. A continuación, se muestran los tipos de formas de celdas de baterías de iones de litio (Figura 2).

Figura 1. Tipos de celdas de baterías de iones de litio.



Nota. Fuente: *Baterías y Amperios. Soluciones en baterías.*

La construcción de paquetes de baterías más grandes a partir de celdas individuales se debe a una combinación de factores técnicos, de seguridad y de rendimiento. Al unir múltiples celdas en un paquete, se pueden lograr niveles más altos de capacidad y voltaje, adaptándose a las necesidades específicas de diversas aplicaciones, desde dispositivos portátiles hasta vehículos eléctricos. Las celdas individuales, al tener un tamaño y diseño más manejables, permiten una mejor gestión del calor, una mayor flexibilidad en el diseño y una simplificación en la producción y el reemplazo. Además, en caso de que una celda presente fallos o degrade su rendimiento, es más fácil y seguro reemplazar una celda individual en lugar de un sistema entero.

Por otro lado, crear una celda más grande podría presentar desafíos significativos relacionados con la gestión térmica y la uniformidad en la distribución de la corriente. Las celdas de mayor tamaño pueden experimentar problemas como la acumulación de calor y la resistencia interna, lo que podría llevar a una menor eficiencia y un mayor riesgo de fallos, incluida la fuga térmica o explosiones. Al dividir la energía en múltiples celdas más pequeñas, se pueden mitigar estos riesgos, mejorando la seguridad y la eficiencia del sistema en su conjunto. Esto permite que los paquetes de baterías sean más versátiles y manejables, proporcionando una solución más efectiva para las necesidades energéticas modernas.

Las baterías de iones de litio funcionan gracias al movimiento de iones de litio entre dos electrodos: el ánodo (generalmente hecho de grafito) y el cátodo (hecho de óxidos metálicos). Durante la carga, los iones de litio se mueven desde el cátodo hacia el ánodo, mientras que durante la descarga, el proceso se invierte y los iones se desplazan del ánodo de vuelta al cátodo, liberando energía que puede alimentar dispositivos eléctricos.

Este ciclo de carga y descarga puede repetirse muchas veces, lo que hace que estas baterías sean muy duraderas. Sin embargo, con el tiempo, las baterías de iones de litio pierden capacidad, es decir, no pueden almacenar tanta energía como cuando eran nuevas. Para garantizar un uso seguro

y eficiente, es importante monitorear el estado de carga (SoC) y el estado de salud (SoH) de las baterías.

Métodos para determinar el estado de carga (SoC)

El estado de carga de una batería indica qué porcentaje de energía le queda en un momento determinado. Existen varios métodos para determinar el SoC, algunos de ellos son:

1. **Coulombimetría:** Este método mide la cantidad de corriente que entra o sale de la batería. Al integrar esta corriente a lo largo del tiempo y compararla con la capacidad total de la batería, se puede estimar el SoC. Sin embargo, esta técnica puede acumular errores si no se calibra correctamente.
2. **Tensión de circuito abierto (Open Circuit Voltage, OCV):** Existe una relación entre el voltaje de la batería y su SoC. Al medir el voltaje cuando la batería está en reposo, se puede estimar cuánto carga le queda. Este método es simple, pero su precisión depende de la curva de descarga de la batería, que no siempre es lineal.
3. **Métodos híbridos:** A menudo se combinan métodos como la coulombimetría con la medición de OCV para mejorar la precisión. El monitoreo continuo con Coulombimetría se complementa con la calibración periódica basada en el voltaje.

Métodos para determinar el estado de salud (SoH)

El estado de salud de una batería refleja cuánta capacidad ha perdido con el tiempo en comparación con su capacidad inicial. Mantener el SoH bajo control es crucial para prolongar la vida útil de la batería y garantizar su seguridad. Existen varios métodos para medir el SoH:

1. **Impedancia electroquímica (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS):** Este método mide la respuesta de la batería a pequeñas señales de corriente aplicadas en diferentes frecuencias. El análisis de estos datos proporciona información sobre la resistencia interna de la batería y otros factores clave, permitiendo evaluar su degradación.
2. **Resistencia interna:** La resistencia interna de una batería aumenta con el tiempo debido a la degradación de los materiales. Al medir cómo cambia la resistencia interna durante la carga y descarga, se puede inferir el estado de salud.
3. **Análisis termográfico:** Mediante cámaras infrarrojas, se pueden detectar patrones anormales de temperatura en la superficie de la batería. Estos patrones pueden estar relacionados con fallos internos o sobrecalentamientos, lo que ayuda a predecir fallos futuros.

Métodos para determinar el estado de salud (SoH)

Existen técnicas más sofisticadas para monitorear baterías de iones de litio de manera no invasiva:

- **Rayos X:** Utilizados en estudios de laboratorio, los rayos X permiten visualizar el interior de la batería y analizar posibles fallos estructurales, como el crecimiento de dendritas o cambios en los electrodos.
- **Ultrasonido:** Esta técnica emergente utiliza ondas de sonido para detectar cambios en la densidad y estructura interna de la batería. Puede identificar problemas como la hinchazón o la degradación de los materiales.

- **Campos magnéticos:** La actividad interna de una batería genera pequeños campos magnéticos que se pueden medir para inferir su comportamiento. Este método está en desarrollo, pero promete ser una herramienta no invasiva para monitorear las baterías en tiempo real.

Método

De lo anterior se propone un proyecto, a partir de un enfoque teórico, basado en la medición de campos magnéticos generados durante los ciclos de carga y descarga de las baterías de iones de litio para monitorear tanto el estado de carga (SoC) como el estado de salud (SoH). Esta propuesta sugiere que, al utilizar sensores magnetométricos de alta sensibilidad, se puede captar la intensidad y el comportamiento de los campos magnéticos inducidos por el flujo de corriente dentro de la batería. Estos datos permitirían inferir la cantidad de iones de litio en movimiento, lo que está directamente relacionado con el SoC. Además, la degradación de los materiales internos, como el crecimiento de dendritas o el aumento de la resistencia interna, afectaría la uniformidad de los campos magnéticos, proporcionando indicios del deterioro en el SoH. Este método, al ser no invasivo y sin necesidad de contacto directo con la batería, ofrece la ventaja de un monitoreo en tiempo real, lo que puede mejorar la seguridad y el rendimiento de las baterías en aplicaciones críticas como vehículos eléctricos o sistemas de almacenamiento energético.

Analizar la vida útil de las baterías es fundamental debido a su creciente uso en una amplia gama de aplicaciones, desde dispositivos electrónicos portátiles hasta vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía renovable. A medida que estas tecnologías se integran cada vez más en nuestra vida diaria, comprender cómo y por qué las baterías se degradan con el tiempo se vuelve crucial. La vida útil de una batería se refiere al período durante el cual puede funcionar de manera efectiva antes de que su capacidad de retener carga disminuya significativamente. Monitorear y analizar esta degradación permite a los fabricantes y consumidores anticipar fallos, optimizar el rendimiento y, en última instancia, garantizar la seguridad y la eficiencia de los dispositivos alimentados por baterías. Además, el análisis de la vida útil también ayuda a reducir el desperdicio y a promover prácticas de reciclaje responsables en un mundo cada vez más consciente del medio ambiente.

Las explosiones de baterías, particularmente en baterías de iones de litio, son un fenómeno preocupante que puede tener consecuencias graves tanto para la seguridad de los usuarios como para el medio ambiente. Estas explosiones pueden ocurrir por diversas razones, incluyendo sobrecarga, cortocircuitos, daños físicos, o la formación de dendritas en el interior de la celda, lo que puede provocar un cortocircuito interno. La acumulación de calor durante el uso o la carga puede llevar a una condición llamada fuga térmica, en la que la temperatura dentro de la batería se eleva rápidamente, causando la liberación de gases inflamables y, en algunos casos, una explosión. Por lo tanto, entender los factores que afectan la vida útil y la seguridad de las baterías no solo es vital para el desarrollo de tecnologías más robustas y seguras, sino también para la implementación de prácticas de monitoreo y gestión adecuadas que minimicen los riesgos asociados con su uso.

En esta propuesta, se utilizarán la Ley de Biot-Savart y la Ley de Ampère para detectar y analizar el campo magnético generado en la batería durante los ciclos de carga y descarga. Durante estos ciclos, el movimiento de los electrones a través del circuito interno de la batería genera un campo eléctrico debido a la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo. Este flujo de corriente, según la Ley de Biot-Savart, induce un campo magnético cuya intensidad y dirección están directamente relacionadas con la cantidad de corriente que atraviesa la batería en cada momento.

Por otro lado, la Ley de Ampère permitirá relacionar el campo magnético producido con la corriente total dentro del conductor y su geometría, lo que facilita modelar el comportamiento del campo magnético a lo largo de diferentes puntos alrededor de la batería. Mediante la implementación de sensores externos de campo magnético que apliquen estos principios, se puede obtener información precisa sobre el flujo de corriente dentro de la batería, y por tanto, inferir el estado de carga (SoC) y detectar anomalías que puedan indicar degradación o fallos en la estructura interna, ayudando así a evaluar el estado de salud (SoH) de manera no invasiva.

Los campos magnéticos son una manifestación de la fuerza electromagnética, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Se generan por el movimiento de cargas eléctricas, como ocurre cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor. Estos campos están representados por líneas de fuerza que muestran la dirección y magnitud de la fuerza magnética que actúa sobre otras cargas o materiales magnéticos en su proximidad. La dirección del campo magnético es perpendicular al flujo de corriente, siguiendo la regla de la mano derecha. Los campos magnéticos juegan un papel crucial en fenómenos naturales y en la tecnología, desde la formación de auroras boreales y el comportamiento de imanes, hasta su uso en motores eléctricos, sistemas de generación de energía y dispositivos de almacenamiento de datos.

Los campos magnéticos se describen y cuantifican mediante varias leyes físicas y matemáticas fundamentales. Una de las más importantes es la Ley de Biot-Savart, que establece que el campo magnético en un punto en el espacio es proporcional a la corriente que fluye a través de un conductor y disminuye con el cuadrado de la distancia a dicho punto. Esta ley se utiliza para calcular el campo magnético generado por corrientes eléctricas en geometrías complejas. Otra ley clave es la Ley de Ampère, que relaciona la circulación del campo magnético alrededor de un conductor cerrado con la corriente total que atraviesa la superficie delimitada por dicho conductor. Ambas leyes son fundamentales en la formulación matemática del electromagnetismo, que culmina en las ecuaciones de Maxwell, un conjunto de cuatro ecuaciones que describen cómo los campos eléctricos y magnéticos interactúan y se propagan. Estas leyes permiten predecir el comportamiento de los campos magnéticos en sistemas naturales y artificiales, y son esenciales en aplicaciones tecnológicas como motores eléctricos, generadores y sensores magnéticos.

Un sensor de campos magnéticos funciona midiendo las variaciones en la intensidad y dirección de un campo magnético generado por una corriente eléctrica o un imán. El principio básico detrás de estos sensores se basa en el hecho de que cualquier corriente eléctrica que circula a través de un conductor genera un campo magnético a su alrededor, conforme a la Ley de Biot-Savart. Estos sensores están diseñados para detectar estos campos magnéticos y convertirlos en señales eléctricas que pueden ser analizadas. La sensibilidad de estos dispositivos permite captar incluso pequeños cambios en los campos magnéticos, lo que los hace útiles para aplicaciones como la medición de corrientes internas en baterías, el monitoreo de posiciones en motores o la detección de campos magnéticos terrestres. El sensor de efecto Hall, uno de los más comunes, funciona detectando la fuerza de Lorentz generada cuando un campo magnético interactúa con los portadores de carga en un material conductor.

Existen varios tipos de sensores magnéticos, cada uno con características específicas dependiendo de la aplicación. Los más utilizados son los sensores de efecto Hall, que son compactos y económicos; los magnetorresistivos, que ofrecen mayor sensibilidad y son utilizados en aplicaciones más precisas como el posicionamiento; y los sensores fluxgate, que se emplean para medir campos magnéticos extremadamente pequeños y se usan en aplicaciones de alta precisión como el monitoreo geofísico. También están los superconductores de interferencia cuántica

(SQUID), que son los sensores más sensibles disponibles, capaces de detectar campos magnéticos ínfimos, y se emplean en investigaciones científicas avanzadas. La elección del sensor adecuado depende de la magnitud del campo magnético a medir, la precisión requerida y las condiciones operativas del entorno.

Resultados

Por lo cual, de la misma forma se propone una plataforma (sistema detector) que realice este procedimiento mediante dichos sensores y de esta manera obtener los datos suficientes para poder hacer conclusiones de las baterías, así como de sus parámetros y estados de carga y salud. A continuación, se presentan imágenes ilustrativas como referencia del sistema propuesto. (Figura 2 y 3).

Figura 2. Esquema general del Sistema de Medición.

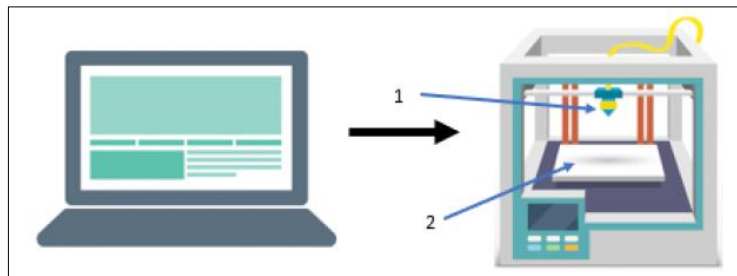
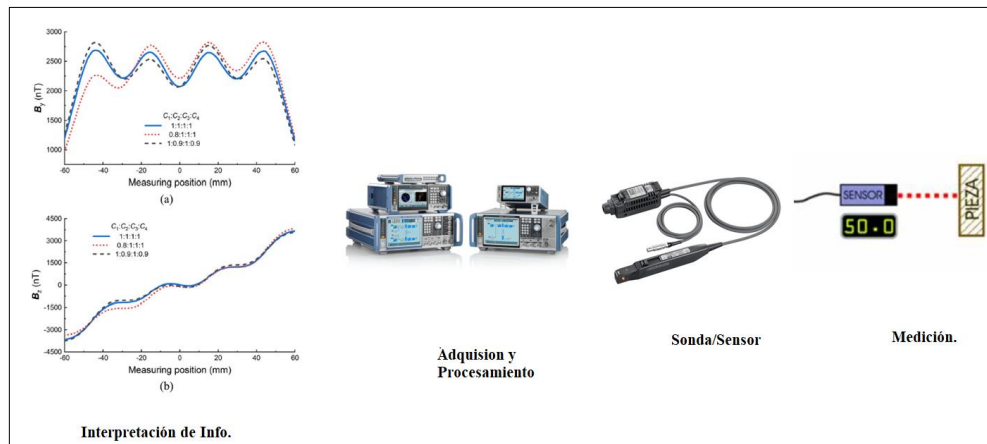


Figura 3. Diagrama a bloques del Sistema.



El método de monitoreo de baterías basado en campos magnéticos ofrece varias ventajas frente a otros métodos tradicionales. En primer lugar, es completamente no invasivo, lo que significa que no es necesario insertar sensores dentro de la batería o modificar su estructura. Esto elimina riesgos de daño físico, fallos de operación o interferencia en el rendimiento de la batería. A diferencia de la coulombimetría, que puede acumular errores con el tiempo, o la medición de voltaje de circuito abierto, que requiere que la batería esté en reposo para obtener una lectura precisa, el monitoreo magnético permite mediciones en tiempo real mientras la batería está operando, sin necesidad de

interrumpir su funcionamiento. Esto es crucial en aplicaciones de alta demanda, como los vehículos eléctricos, donde se requiere un monitoreo constante.

Además, el uso de campos magnéticos puede proporcionar una visión más detallada de los procesos internos de la batería. A diferencia de métodos puramente eléctricos como la impedancia electroquímica, que mide indirectamente la resistencia interna y el estado de los materiales, el monitoreo magnético puede detectar cambios en los patrones de corriente y posibles irregularidades que señalen fallos futuros, como la formación de dendritas o la degradación de los electrodos. Este enfoque, al captar información directamente relacionada con el movimiento de electrones y la corriente interna, ofrece una mayor sensibilidad a cambios sutiles en la batería, lo que puede mejorar la precisión y confiabilidad en la estimación del estado de carga (SoC) y el estado de salud (SoH).

Discusión

Es importante resaltar cómo el uso de campos magnéticos para monitorear el estado de carga (SoC) y el estado de salud (SoH) en baterías de iones de litio (LiBs) representa un avance significativo frente a los métodos tradicionales. Los enfoques actuales, como la coulombimetría o la medición de voltaje de circuito abierto, aunque efectivos en ciertas aplicaciones, presentan limitaciones cuando se trata de obtener mediciones precisas en tiempo real y durante el uso activo de las baterías. El monitoreo magnético, en cambio, ofrece la posibilidad de capturar información continua y sin interrupciones, lo que lo hace ideal para aplicaciones donde la precisión y la constancia del monitoreo son críticas, como en los vehículos eléctricos o los sistemas de almacenamiento de energía renovable.

Otro punto a discutir es la sensibilidad del método de campos magnéticos en comparación con otros enfoques no invasivos, como la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Mientras que EIS proporciona datos detallados sobre la resistencia interna de la batería y la integridad de los materiales, su implementación puede ser compleja y requiere condiciones específicas para obtener mediciones precisas. En cambio, la detección de campos magnéticos es menos intrusiva y más adaptable a una variedad de condiciones operativas, lo que permite una mayor flexibilidad en su aplicación. Además, el monitoreo magnético puede identificar irregularidades internas que podrían no ser detectables mediante otros métodos, como la formación de microdendritas, que representan un riesgo para la seguridad de la batería.

Finalmente, es relevante discutir las implicaciones prácticas de este método en términos de su adopción a gran escala. Aunque la tecnología de sensores magnéticos ha avanzado considerablemente, todavía existen desafíos relacionados con la calibración de los sensores y la correlación precisa entre las señales magnéticas y los estados de la batería. Sin embargo, estos desafíos técnicos pueden superarse con el desarrollo de modelos predictivos más robustos y una mayor integración con sistemas de gestión de baterías (BMS). A largo plazo, la implementación de esta tecnología podría mejorar la seguridad, la vida útil y la eficiencia de las baterías de iones de litio, haciendo este método una opción atractiva para el monitoreo avanzado en industrias clave como la automotriz y la energética.

En conclusión, el presente artículo ha explorado el uso de campos magnéticos como un método innovador y no invasivo para monitorear el estado de carga (SoC) y el estado de salud (SoH) de las baterías de iones de litio. A través de la aplicación de principios físicos como la Ley de Biot-Savart y la Ley de Ampère, se ha demostrado cómo los sensores magnéticos pueden detectar y analizar las variaciones en los campos magnéticos generados por el flujo de corriente en la batería

durante los ciclos de carga y descarga. Este enfoque no solo ofrece la ventaja de realizar mediciones en tiempo real sin interrumpir el funcionamiento de la batería, sino que también puede proporcionar información valiosa sobre el estado interno de la batería, identificando problemas potenciales antes de que se conviertan en fallos críticos.

La comparación de este método con técnicas tradicionales revela sus múltiples ventajas, incluyendo una mayor precisión y sensibilidad en la detección de cambios sutiles en el estado de la batería. A medida que la demanda de sistemas de energía más eficientes y seguros sigue creciendo, la implementación de tecnologías de monitoreo basadas en campos magnéticos se convierte en una opción atractiva para la gestión de baterías en aplicaciones críticas, como vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía renovable. Futuras investigaciones y desarrollos en este campo pueden allanar el camino para la adopción generalizada de este método, mejorando así la seguridad, la eficiencia y la vida útil de las baterías de iones de litio.

Referencias

- Balagopal, B., & Chow, M.-Y. (2015). The state of the art approaches to estimate the state of health (SOH) and state of function (SOF) of lithium ion batteries. En *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (pp. 2). IEEE. <https://doi:10.1109/INDIN.2015.7281923>
- Baterías y Amperios. (n.d.). Tipos de celdas de baterías de litio. <https://bateriasyamperios.com/tipos-de-celdas-de-baterias-de-litio/>
- Galeotti, M., Giammanco, C., Cinà, L., Cordiner, S., & Di Carlo, A. (2015). Synthetic methods for the evaluation of the state of health (SOH) of nickel-metal hydride (NiMH) batteries. *Energy Conversion and Management*. <https://doi:10.1016/j.enconman.2014.12.040>
- Coleman, M., Hurley, W. G., & Lee, C. K. (2008). An improved battery characterization method using a two-pulse load test. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(2), 442-448. doi:10.1109/TEC.2007.914329
- Contreras Sillero, A. A. (2018). *Estimación de los estados de carga y salud de una batería de ion-litio* [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Celaya]. Repositorio Institucional del Instituto Tecnológico de Celaya.
- Huaian Zhao, Ziyuan Zhan, Bingham Cui, Yaxuan Wang, Geping Yin, Guokang Han, Lizhi Xiang, Chunyu Du. (2024). *Non-destructive detection techniques for lithium-ion batteries based on magnetic field characteristics - A model-based study*. *Journal of Power Sources*, 586, 234511. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234511>