

Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones Lithium Ion Batteries: features and applications

Vanessa Quintero^{1*}, Osvaldo Che², Eleicer Ching², Orlando Auciello³, Elida de Obaldía^{2,3}

¹ Facultad de Ingeniería Eléctrica, C.R. Panamá Oeste, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

² Laboratorio Pierre y Marie Curie, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

³ Universidad de Texas en Dallas

*Autor de correspondencia: vanessa.quintero1@utp.ac.pa

RESUMEN— Las baterías han sido parte de nuestra vida por más de 100 años. Ellas han sido utilizadas en diferentes aplicaciones desde una simple calculadora científica hasta en vehículos eléctricos, robots y satélites. A través de los años diversos tipos de baterías han sido fabricados todos con la finalidad de mejorar su rendimiento. En la actualidad las baterías de iones de litio han sido usadas con mayor frecuencia debido a su alta densidad de energía, su alta eficiencia energética y a su prolongado tiempo de vida. Este trabajo presenta un resumen de aspectos relevantes sobre las baterías de iones de litio. El artículo desarrollado introduce la terminología relacionada al mundo de las baterías. Además, estudia las características y herramientas que hacen a las baterías de iones de litio una de las baterías más utilizadas actualmente. Por otro lado, este estudio menciona aspectos relevantes de un sistema de gestión de baterías, herramienta necesaria para salvaguardar el funcionamiento y vida de la batería.

Palabras clave— Baterías, Ion Litio, estado de carga, estado de salud

ABSTRACT— Batteries have been part of our life for over 100 years. They have been used in different applications from a simple scientific calculator to electric vehicles, robots, and satellites. Over the years, various types of batteries have all been manufactured for better performance. At present, lithium-ion batteries have been used more frequently thanks to their high energy density, high energy efficiency, and long life. This paper presents a summary of the relevant aspects of lithium-ion batteries. The article developed introduces the terminology related to the world of batteries. Besides, it studies the characteristics and tools that make lithium-ion batteries one of the most commonly used batteries. On the other hand, this study mentions relevant aspects of a battery management system, a necessary tool to safeguard the operation and life of the battery.

Keywords— Battery, Lithium-ion, State-of-Charge, State-of-Health

1. Introducción

Las baterías son parte de un creciente mercado que mueve billones de dólares. Por ejemplo, se estima que el mercado de las baterías de ácido plomo alcance el orden de los 70.1 mil millones de dólares para el 2023 mientras que las baterías de litio deberán alcanzar los 105 mil millones de dólares para el 2025 [1] [2]. En términos generales se espera que el mercado de baterías tenga un incremento del 6.63% en la tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) en los próximos 9 años [1].

Una batería puede estar compuesta por dos o más celdas conectadas en serio o en paralelo. Una celda es la unidad básica de una batería capaz de convertir energía química en energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas [3]. Las baterías constan de cuatro partes fundamentales que son el ánodo, el cátodo, el separador y el electrolito, ver Figura 1. El ánodo sufre una reacción de oxidación durante el proceso de descarga mientras que en el proceso de carga sufre una reacción de reducción.

Para el caso de cátodo tenemos una reacción de reducción durante el proceso de descarga y una reacción de oxidación durante el proceso de carga [2].

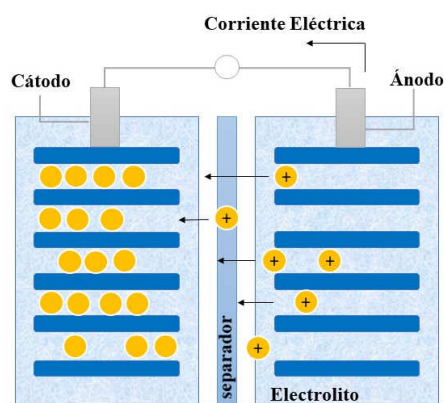


Figura 1. Partes de una batería

Durante la reacción de oxidación se presenta una pérdida de electrones mientras que en la reacción de reducción se tiene una ganancia de electrones. Ambas reacciones se complementan y podemos encontrar ejemplos de ellas en diversas actividades que se realizan diariamente como lo son la combustión de la gasolina y el proceso de respiración.

La selección del material a utilizar en el ánodo y cátodo de la batería juega un papel relevante en el rendimiento de esta. Es por ello que la selección del material del ánodo se hace considerando las características de eficiencia como agente reductor, buena conductividad, estabilidad, bajo costo y fácil implementación, mientras que el material del cátodo se selecciona considerando que sea un eficiente agente oxidante, tenga estabilidad al contactar al electrolito y que maneje una tensión de trabajo [3].

Tradicionalmente las baterías han sido clasificadas en primarias o secundarias. Las baterías primarias, también conocidas como no recargables, son aquellas donde la reacción electroquímica no puede revertirse, es decir solo pueden ser descargadas una sola vez. Las baterías secundarias o recargables como su nombre lo indica permiten cargar y descargar la batería un número considerable de veces [4]. Las baterías de zinc-carbono, alcalinas (zinc/dióxido de manganeso), zinc/óxido de plata, zinc-aire y litio son consideradas baterías no recargables mientras que las baterías de ácido plomo, níquel-cadmio (Ni-Cd), níquel-metal hidruro (Ni-MH), ion de litio (Li-Ion) y polímero de litio (LiPo) son consideradas baterías recargables [4]. La Figura 2 muestra la clasificación de las baterías en primarias y secundarias, así como el periodo de tiempo en el que entraron en el mercado.

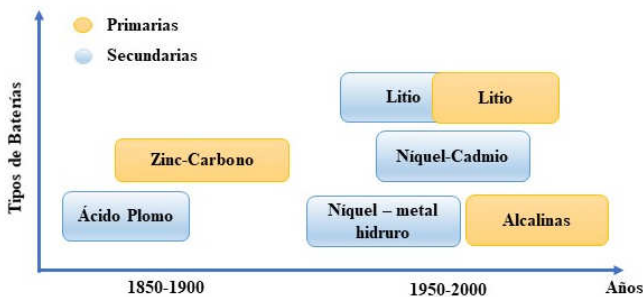


Figura 2. Años de Comercialización de los diferentes tipos de baterías.

Las baterías han sido utilizadas en dispositivos portátiles (computadoras, celulares), cámaras fotográficas, radios, calculadoras, relojes, juguetes, reproductores, dispositivos de iluminación, entre otros. Además, han sido empleadas en aplicaciones de mayor complejidad como lo son los vehículos eléctricos, las aeronaves, las máquinas industriales, los satélites, los robots, entre otros [5]. La selección del tipo de batería depende exclusivamente de los requerimientos de la aplicación donde son utilizadas. Por ejemplo, las baterías de ion-litio han sido empleadas con mayor frecuencia en aplicaciones para el cuidado de la salud, vehículos eléctricos y aeronaves debido a las características que presentan [6]. La Figura 3 muestra la versatilidad de las baterías de Litio para algunas aplicaciones al presentar un menor peso (densidad de energía gravimétrica) y mayor capacidad de energía por unidad de volumen (densidad de energía volumétrica) cuando son comparadas con otros tipos de baterías.

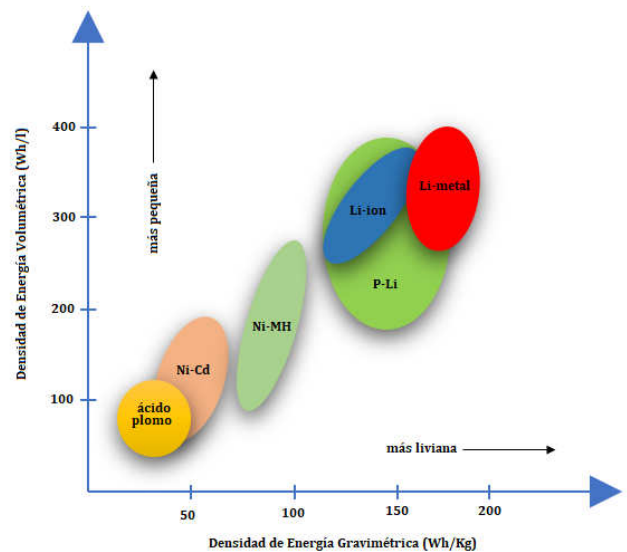


Figura 3. Densidad de energía gravimétrica y volumétrica para diferentes tipos de baterías [5].

La principal contribución de este trabajo es instruir al lector sobre conceptos, características y funcionamiento de las baterías de iones de litio. En la primera parte de este artículo se presenta la importancia que han tenido las baterías a lo largo de la historia. En la segunda sección se introduce los conceptos relacionados a las baterías. La

tercera sección se enfoca en estudiar las áreas de aplicación de las baterías de litio, así como de detallar los actuales materiales usados en su confección. La cuarta sección desarrolla los aspectos del sistema de gestión de batería permitiendo al usuario comprender cuales son los parámetros que se pueden monitorear y que permiten preservar el tiempo de vida de la batería. La última sección presenta las conclusiones de este trabajo.

2. Terminología usada en las Baterías

Para comprender el funcionamiento de las baterías, así como los métodos y herramientas utilizados para conocer su estado es necesario manejar algunos conceptos y la definición de estos. En las dos siguientes subsecciones definiremos los principales conceptos relacionados a la batería, así como la información que puede obtenerse de las hojas técnicas de los fabricantes. A continuación, se detallan más relevantes en el ámbito de las baterías.

2.1 Conceptos Básicos

A continuación, se detalla la terminología usada en el ámbito de las baterías.

- **Capacidad:** es la cantidad de corriente que puede suministrar una batería en tiempo específico. Suele medirse en Amperios - horas.
- **Ciclo:** se define como el proceso de descargar una batería que ha sido cargada completamente [7].
- **Degradación:** se define como el proceso en el que se disminuye la capacidad de almacenamiento de energía de la batería [8].
- **Electrodo Negativo:** se define como el lugar donde un elemento o componente químico se somete a una reacción electroquímica de oxidación [9].
- **Electrodo Positivo:** se define como el lugar donde un elemento o componente químico se somete a una reacción electroquímica de reducción [9].
- **Electrolito:** Es una solución acuosa o no acuosa de sales, bases y ácidos que permite el flujo de electrones [9].
- **Estado de Carga (SOC):** se define como la energía que está disponible en la batería [10].
- **Estado de Salud (SOH):** se define como el porcentaje de degradación sufrida por la batería [10].

- **Impedancia Interna:** se define como la medida de oposición al paso de la corriente en un circuito cuando se aplica un voltaje.
- **Proceso de Carga:** se define como el proceso inverso donde la reacción de oxidación ocurre en el electrodo positivo y la reacción de reducción ocurre en el electrodo negativo [4].
- **Proceso de Descarga:** se define como el flujo de electrones desde el ánodo (reacción de oxidación) hasta el cátodo (reacción de reducción) a través de una carga externa [4].
- **Profundidad de Descarga (DoD):** se define como el porcentaje de cuanta energía se ha usado [7].
- **Vida útil Remanente:** se define como la capacidad máxima de energía remanente en la batería [11].
- **Voltaje Nominal:** se define como el voltaje de operación del dispositivo o instrumento.
- **Voltaje de Corte de descarga:** se define como el voltaje mínimo al cual que puede llegar la batería durante el proceso de descarga. Se utiliza como medida de protección para evitar daños irreversibles en la batería.

2.2 Hoja Técnica

La hoja técnica es un documento emitido por los fabricantes para conocer las características de funcionamiento de las baterías. Estos datos juegan un papel relevante al momento de monitorear y controlar diversos parámetros de la batería. Dichos parámetros son cruciales para conocer el tiempo de vida de la batería. Para comprender la información suministrada por las hojas técnicas se presenta la información técnica de la batería LIR2032 [12], ver Tabla 1. Dentro de los datos enunciados en la Tabla 1 se observan las máximas corrientes que pueden ser utilizadas para cargar y descargar la batería (45mA y 90mA). Además, de establecer los voltajes de carga (4.20 V) y de corte (2.75 V). Por otro lado, se menciona la cantidad de ciclos de operación que puede manejar la batería (500 ciclos) y el método de carga de la batería (Corriente Constante - Voltaje Constante CC/CV). La información de las corrientes utilizadas para cargar y descargar la batería se hace con referencia a la capacidad de esta, por ejemplo, si se enuncia que la corriente de carga es 0.5C para la LIR2032 eso equivale a 22.5mA.

Además de los datos mencionados anteriormente, las hojas técnicas de fabricantes proveen una serie de

gráficos que permiten verificar el comportamiento y rendimiento de la batería para ciertas condiciones específicas. Por ejemplo, presentan gráficos con información sobre el comportamiento de la batería cuando es descargada a corriente constante. Además, incluyen datos sobre el efecto que tiene la temperatura sobre la batería. Es de suma importancia saber que rangos de temperaturas extremos pueden ocasionar daños considerables en la química de la batería disminuyendo así el tiempo de vida de esta.

Tabla 1. Especificaciones Técnicas de la Batería LIR2032

Voltaje Nominal		3.6 V
Capacidad Nominal	Típica	45mAh
	Mínima	40mAh
Método de Carga		CC/CV Corriente:0.5C Voltaje:4.2 V Corriente Final:0.02 C
Voltaje de Carga		4.20 V
Corriente Estándar de Carga		0.5 C
Máximas corrientes	Carga	1 C
	Descarga	2 C
Voltaje de Corte de Descarga		2.75 V
Impedancia Interna		$\leq 600\Omega$
Número de ciclos		500

Si siguiendo con la línea de información suministrada por las hojas técnicas un punto relevante es el número de ciclos de operación de la batería. En forma general para los fabricantes un ciclo de operación corresponde a una descarga completa de la batería a un valor específico de corriente constante, por ejemplo 22.5mA para el caso de la batería LIR2032. Con esta información el fabricante da un punto de referencia, ya que dependiendo del tipo de perfil de corriente que se utilice los ciclos de operación de la batería pueden aumentar o disminuir y por ende el tiempo de vida de la batería puede ser mayor o menor a lo establecido por los fabricantes. Esta situación es presentada en la Figura 4 donde se observa la pérdida de capacidad o degradación que puede sufrir la batería a medida que aumentan los ciclos de operación de la batería cuando se descarga la batería utilizando diferentes niveles de corriente. En el gráfico se observa que cuando se descarga a una corriente tres veces superior a la de referencia el proceso de degradación se presenta con un número menor de ciclos de operación.

Otra situación que debe considerarse al momento de evaluar el número de ciclos de operación de la batería es cuando se descarga utilizando diferentes niveles de corriente, tal como se muestra en la Figura 5. En este caso la batería LIR2032 fue descargada utilizando una variación de corriente entre 14mA y 22 mA.

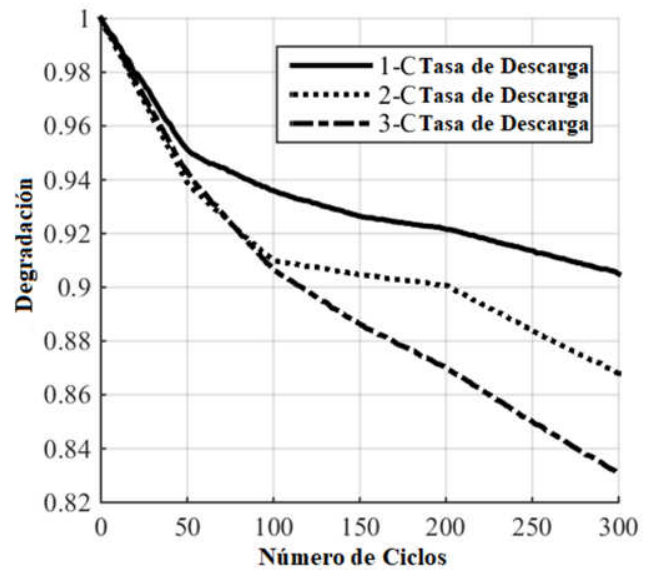


Figura 4. Degradación sufrida por la batería de acuerdo con la corriente utilizada [8].

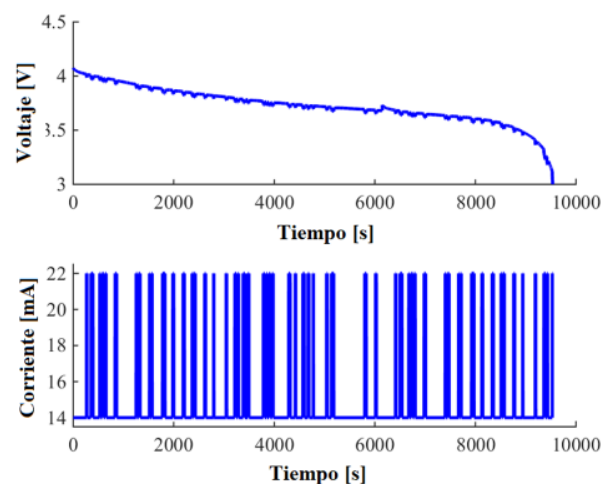


Figura 5. Curva de descarga de la batería LIR2032 [13]

3. Baterías de Litio

La comercialización de las baterías de litio inicia en el año 1991 y desde entonces han tenido un rápido crecimiento en sus ventas. La creciente preferencia por vehículos híbridos y eléctricos libres de contaminación, junto con los rápidos desarrollos tecnológicos, son algunos de los factores que han influido en la penetración en el mercado de este tipo de baterías [14]. Esta situación se observa en las ventas de baterías en Japón para el año 2018, donde del 57% de baterías primarias vendidas, el 18% corresponde a baterías de litio. En el caso de las baterías secundarias del 43% de las ventas, el 31% corresponde a baterías de litio [15].

El auge en el uso de las baterías de litio se debe principalmente a su alta densidad de energía, su alta eficiencia energética y a su prolongado tiempo de vida [6]. Por ejemplo, comparado con las baterías de ácido plomo la densidad de energía en las baterías de iones de litio puede triplicarse. Por otro lado, las baterías de iones de litio pueden alcanzar un máximo de 1000 ciclos de operación mientras que las de Ni-MH un máximo de 500 ciclos. Si se realiza una comparación de la eficiencia energética de las baterías de ácido plomo, Ni-MH y batería de iones de litio su comportamiento es similar [6].

3.1 Aplicaciones

Como se mencionó anteriormente las baterías de iones de litio presentan características superiores comparadas con otras. Es por ello por lo que su uso se ha incrementado considerablemente en los últimos años. Por ejemplo, el uso de este tipo de baterías ha sido significativo en el mercado de dispositivos electrónicos, específicamente en celulares, tablets y computadoras portátiles. Actualmente se tiene que el 31% de la población mundial utiliza teléfonos inteligentes, por lo que representa un mercado de relevancia para las baterías de iones de litio [16]. Durante muchos años el Mercado principal de las baterías de iones de litio han sido los dispositivos electrónicos, pero esta situación se encuentra en proceso de cambio al utilizarse cada vez más las baterías de iones de litio en dispositivos para el cuidado de la salud, vehículos eléctricos y los UAV [17].

Debido a su reducido tamaño, peso, alta densidad de energía y prolongado tiempo de vida, las baterías de iones de litio han sido seleccionadas como principales candidatas para los dispositivos para el cuidado de la

salud, mercado emergente que mueve millones de dólares anualmente. Los marcapasos, transmisores de radio implantables, estimuladores gástricos, biosensores portátiles, herramientas quirúrgicas, desfibriladores, monitores son ejemplos de algunos dispositivos médicos que utilizan este tipo de baterías [18] [19]. Desde el primer implante de marcapaso, en 1960, la industria de dispositivos médicos se ha enfocado en desarrollar baterías que reúnan características que permitan darle una mejor calidad de vida a los pacientes. Ejemplo de esta situación es el estudio presentado en [19] donde los autores mencionan las características que las aplicaciones biomédicas deben considerar para su diseño y funcionalidad. Desde el punto de vista del diseño se considera la adhesión, la degradación y la sensibilización, mientras que desde la funcionalidad se debe considerar la biocompatibilidad, la seguridad y confiabilidad, el peso y tamaño y durabilidad.

Otra de las aplicaciones donde las baterías de iones de litio juegan un papel relevante son los vehículos eléctricos. Esta industria ha tenido un incremento significativo en los últimos años gracias a las diferentes políticas implementadas por los gobiernos para disminuir la emisión de gases. Para el año 2018, se requirieron 3.3 millones de baterías para ser utilizadas en vehículos eléctricos, como se observa es una industria potente que espera tener un crecimiento del 22% del GARG para el periodo comprendido entre 2017-2025. Debido a esta demandante industria en crecimiento diversos han sido los esfuerzos de la comunidad científica por mejorar el rendimiento y seguridad de las baterías de iones de litio, ejemplo de ello es el trabajo presentado por los autores en [14] donde se analiza los problemas y soluciones de seguridad térmica presentado en los vehículos eléctricos.

3.2 Tipos de Baterías de Litio

En las secciones previas se mencionó que las baterías están compuestas por cuatro elementos: el ánodo, el cátodo, el electrolito y el separador. Las características presentadas por estos cuatro elementos influyen en el rendimiento y comportamiento de la batería. En la actualidad los cátodos de las baterías de litio primarias pueden estar compuesto por dióxido de azufre, cloruro de tionilo, cloruro de sulfurillo, óxido de bismuto (II), cloruro de cobre (II), óxido cúprico, dicloruro de cobre, sulfuro de cobre, dióxido de manganeso, sulfuro de níquel, entre otros dando así origen a las baterías primarias de litio /óxido de cobre (Li/CuO), litio/ dióxido

de manganeso (Li/MnO_2), litio/dióxido de azufre (Li/SO_2), litio/cloruro de tionilo (Li/SOCl_2), entre otras. Por otro lado, en las baterías de litio secundarias el electrodo negativo es de carbono mientras que el electrodo positivo está fabricado de los siguientes compuestos: óxido de cobalto litio (LiCoO_2), litio óxido de manganeso (LiMn_2O_4), litio ferrofosfato (LiFePO_4), litio-manganeso-níquel-óxido de cobalto (LiNiMnCoO_2), litio-níquel-cobalto-óxido de aluminio (LiNiCoAlO_2) y titanato de litio [20].

En la actualidad existen diversos estudios que nos permiten analizar y comparar las características de los diferentes tipos de baterías de litio listados anteriormente. Por ejemplo, en [21] los autores presentan un estudio comparativo entre baterías de LiFePO_4 , LiNiMnCoO_2 y LiNiCoAlO_2 donde estudian el rendimiento de las baterías de acuerdo a sus capacidades de potencia y energía, además de considerar su comportamiento térmico y los ciclos de operación. Otros ejemplos de estudios de comparación y rendimiento de las baterías son presentados en [22] y [23].

3.3 Problemas presentados en las Baterías de Litio

Las baterías de litio pueden presentar diversos problemas que pueden originar que el rendimiento de esta sea menor o incluso que se conviertan en un peligro. Diversos son los factores que pueden alterar la condición de la batería desde caídas, aplastamientos hasta uso inadecuado al someter a la batería a niveles de corriente, voltaje y temperatura superiores a los establecidos en la hoja técnica [24]. Tres de las problemáticas más comunes presentadas por las baterías de litio, que pueden causar cortocircuitos y explosiones de estas, son la sobrecarga, la fuga térmica y el crecimiento de dendritas de litio [24]. El proceso de sobrecarga se relaciona con el flujo de corriente inyectado a la celda aun cuando esta se encuentra en su máxima capacidad. El concepto de fuga térmica se refiere al aumento de temperatura producto de un uso incorrecto y el crecimiento de dendritas de litio se refiere al proceso a través del cual se perfora el separador y se conectan los electrodos de la batería. A través del estudio de la literatura diversos han sido los mecanismos desarrollados para abordar estas problemáticas por ejemplo en [25] los autores proponen un circuito eléctrico de protección para evitar sobrecargas de voltaje. Por otro lado en [26] los autores presentan un sistema para evitar la fuga térmica y en se aborda la formación de dendritas de litio [27].

4. Sistema de Gestión de Batería (BMS)

El Sistema de Gestión de Baterías (BMS) es una herramienta que es indispensable en aplicaciones que involucran el uso de baterías iones de litio. El BMS es una herramienta que permite obtener información del estado de la batería al monitorear la corriente y el voltaje de entrada y salida, la temperatura, la impedancia, la pérdida de capacidad, el sistema de control de carga y descarga, el control de gestión de energía. Además, el BMS es el encargado de diagnosticar fallas, así como de estimar parámetros como el Estado de Carga (SOC), Estado de Salud (SOH).

3.1 Sistema de Monitoreo

A través del BMS se pueden monitorear diversos parámetros asociados a la batería como los son la corriente, el voltaje, la temperatura, la impedancia interna, entre otros. La información obtenida de estas variables es fundamental para garantizar el rendimiento y durabilidad de las baterías. En la actualidad existen diversas herramientas que contribuyen a monitorear estas variables asociadas a las baterías. Por ejemplo, comercialmente se puede tener acceso a equipos como cargas programables, unidades de fuente y medida (SMU), potencióstato/galvanostato, cámara de temperatura, entre otros. La carga programable es un equipo que permite hacer cargas y descargas de la batería usando diversos perfiles de corrientes. Este tipo de pruebas permite estudiar el comportamiento y definir la cantidad de ciclos de operación de la batería. La unidad de fuente y medida funciona como una fuente de alimentación y a la vez como instrumento de medición de voltaje y corriente. Además, puede trabajar como carga programable disipando energía de una batería u otro dispositivo de almacenamiento de energía. Por otro lado, el potencióstato/galvanostato es un dispositivo capaz de realizar espectroscopia de impedancia electroquímica, ver Figura 7.



Figura 7. Autolab PGSTAT302N [28]

Varios de los equipos enunciados anteriormente son utilizados para obtener la curva de voltaje de circuito (OCV). Esta curva es utilizada para estudiar los cambios en la energía electrónica de los electrodos y además poder estimar el SOC. El modelado de la curva OCV es de gran importancia ya que a través de este se pueden proponer aproximaciones matemáticas que caractericen el comportamiento de la batería. Ejemplo de esta situación son los trabajos presentados en [29] y [30].

3.2 Estimación del SOC y SOH

El SOC y el SOH son dos indicadores que brindan información sobre el estado de la batería. Estos dos indicadores son usados con mucha frecuencia y proveen información que sirve para la toma de decisiones en el BMS. El SOC es un concepto que hace referencia a cuanta energía está disponible en la batería, mientras que el SOH denota la degradación que ha sufrido la misma [10]. Ambos indicadores son empleados para determinar el tiempo de vida de la batería aspecto importante en las aplicaciones donde se utilizan baterías de iones de litio. El SOC y SOH no pueden ser medidos directamente por ende se requiere información de variables como como la corriente de descarga, el voltaje, la temperatura, la resistencia interna/impedancia, ciclo de vida, tasa de degradación de la capacidad para ser estimados [10] [30]. Diversos métodos han sido explorados para estimar el SOC tal es el caso del contador Ampere-hora [31], medición de Voltaje de Circuito Abierto (OCV, *Open Circuit voltage*) [32], la Espectroscopia de Impedancia electroquímica (EIS, *Electrochemical Impedance Spectroscopy*) [33] y los métodos basados en modelamiento de la batería [10] [34] [35]. De igual forma para la estimación del SOH se han utilizado técnicas experimentales y métodos adaptativos [36]. Para trabajar con las técnicas descritas anteriormente es necesario conocer en primer lugar las características químicas de las baterías y en segundo lugar se requiere un modelo que permita caracterizar su comportamiento. Actualmente existen diversos modelos que pueden ser clasificados en físicos, empíricos, abstractos, electroquímicos, eléctricos y estocásticos [37].

Como se observa el BMS es una parte fundamental en las aplicaciones que involucran el uso de baterías. El monitoreo y control de las diversas variables asociadas al comportamiento de la batería son determinantes para

determinar la cantidad de energía remanente, el tiempo de vida y sobre todo garantizar las medidas de seguridad que protejan la durabilidad de la batería, así como la aplicación y los agentes actuantes en la misma.

4. Conclusiones

En este trabajo se abordan los conceptos fundamentales relacionados a las baterías de litio, desde los materiales que componen el ánodo y el cátodo de la batería hasta los indicadores que han sido establecidos para conocer su estado y rendimiento. Conocer todos estos conceptos contribuye a entender con mayor claridad el funcionamiento de las baterías de litio, así como las problemáticas que presentan las mismas. El manejo y entendimiento de estos conceptos permite evaluar de forma correcta el tipo de batería de litio requerida en una aplicación específica.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por SENACYT mediante el proyecto FID17-018. Además, los autores quieren agradecer a al Sistema Nacional de Investigación SNI – SENACYT.

6. Referencias

- [1] "Global Battery Market Trends, Share, Size, Stats & Analysis 2019-2027." [Online]. Available: <https://www.inkwoodresearch.com/reports/global-battery-market/>. [Accessed: 28-Feb-2020].
- [2] H. Xiong, E. J. Dufek, and K. L. Gering, *Batteries*, vol. 2–5. 2018.
- [3] T. Horiba, "Lithium-ion battery systems," *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 939–950, 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2319832.
- [4] D. Linden and T. B. Reddy, [3rd edition] *Handbook Of Batteries.pdf*.
- [5] Gianfranco Pistoia, Ed., "Chapter 4 Primary Batteries," in *Batteries for Portable Devices*, 2007, pp. 33–76.
- [6] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, and P. J. Ker, "State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19362–19378, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2817655.
- [7] A. Pérez, V. Quintero, H. Rozas, F. Jaramillo, R. Moreno, and M. Orchard, "Modelling the Degradation Process of Lithium-Ion Batteries When Operating at Erratic State-of-Charge Swing Ranges," in

- International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, 2017.
- [8] A. Perez *et al.*, “Characterization of the Degradation Process of Lithium-ion Batteries when Discharged at Different Current Rates,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, vol. 232, pp. 1075–1089, 2018, doi: 10.1177/ToBeAssigned.
- [9] Gianfranco Pistoia, “Chapter 1 - Basic Battery Concepts,” *Batter. Portable Devices*, pp. 1–15, 2005, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-044451672-5/50001-6>.
- [10] D. A. Pola *et al.*, “Particle-filtering-based discharge time prognosis for lithium-ion batteries with a statistical characterization of use profiles,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 64, no. 2, pp. 710–720, 2015, doi: 10.1109/TR.2014.2385069.
- [11] “Determinando el estado de salud de las baterías de manera rápida y precisa | Revista Española de Electrónica.” [Online]. Available: <https://www.redeweb.com/articulos/determinando-el-estado-de-salud-de-las-baterias-de-manera-rapida-y-precisa/>. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [12] “(No Title).” [Online]. Available: http://www.asc.ru/data/delivery_list/content/eemb/pdf/LIR2032.pdf. [Accessed: 18-Feb-2020].
- [13] V. Quintero, A. Perez, F. Jaramillo, C. Estevez, and M. Orchard, “Procedure for selecting a transmission mode dependent on the state-of-charge and state-of-health of a lithium-ion battery in wireless sensor networks with energy harvesting devices,” *Proc. Annu. Conf. Progn. Heal. Manag. Soc. PHM*, pp. 1–7, 2018.
- [14] J. Zhang, L. Zhang, F. Sun, and Z. Wang, “An Overview on Thermal Safety Issues of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Application,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 23848–23863, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2824838.
- [15] “Secondary Battery Market | Growth, Trends, and Forecast (2020 - 2025).” [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-secondary-battery-market-industry>. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [16] E. Devices and T. Batteries, “Chapter 2 CHARACTERISTICS OF BATTERIES FOR.”
- [17] K. Wei, J. Wu, W. Ma, and H. Li, “State of charge prediction for UAVs based on support vector machine,” vol. 2019, no. Ista1 2018, pp. 9133–9136, 2019, doi: 10.1049/joe.2018.9201.
- [18] “Transporting Lithium Batteries Used In Medical Devices - Medical Product Outsourcing.” [Online]. Available: https://www.mpo-mag.com/contents/view_online-exclusives/2019-04-16/transporting-lithium-batteries-used-in-medical-devices/. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [19] J. Su, S. Ki, K. Chul, and H. Seok, “Electrode materials for biomedical patchable and implantable energy storage devices,” *Energy Storage Mater.*, no. April, 2019, doi: 10.1016/j.ensm.2019.04.032.
- [20] “Chapter 5,” 1909.
- [21] N. Omar and P. Van Den Bossche, “Assessment of Performance of Lithium Iron Phosphate Oxide , Nickel Manganese Cobalt Oxide and Nickel Cobalt Aluminum Oxide Based cells for Using in Plug-in Battery Electric Vehicle Applications,” 2011.
- [22] R. Benato, S. D. Sessa, and F. Bevilacqua, “Measurement-Based Lithium-Manganese Oxide Battery Model.”
- [23] F. P. Tredeau and Z. M. Salameh, “Evaluation of Lithium Iron Phosphate Batteries for Electric Vehicles Application,” pp. 1266–1270, 2009.
- [24] J. Wen, Y. Yu, and C. Chen, “A review on lithium-ion batteries safety issues: Existing problems and possible solutions,” *Mater. Express*, vol. 2, no. 3, pp. 197–212, 2012, doi: 10.1166/mex.2012.1075.
- [25] Michael, R. P. Sujatmiko, T. Abuzairi, M. Rizkinia, and T. A. Kurniawan, “Design of overcharging protection and passive balancing circuits using dioda for lithium-ion battery management system,” *2019 16th Int. Conf. Qual. Res. QIR 2019 - Int. Symp. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/QIR.2019.8898267.
- [26] M. Hartmann and J. Kelly, “Thermal Runaway Prevention of Li-ion Batteries by Novel Thermal Management System Mark Hartmann – CTO , Outlast Technologies LLC Joe Kelly – Senior Scientist , Outlast Technologies LLC,” *2018 IEEE Transp. Electr. Conf. Expo*, pp. 477–481.
- [27] M. Klinsmann, F. E. Hildebrand, M. Ganser, and R. M. McMeeking, “Dendritic cracking in solid electrolytes driven by lithium insertion,” *J. Power Sources*, vol. 442, no. August, p. 227226, 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227226.
- [28] “Autolab PGSTAT302N.” [Online]. Available: <https://www.metrohm.com/es/productos/potenciostatos/autolab-modular-line/PSTAT302N>. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [29] D. Pola, F. Guajardo, E. Jofr, V. Quintero, and P. Aramis, “Particle-Filtering-Based State-of-Health Estimation and End-of-Life Prognosis for Lithium-Ion Batteries at Operation Temperature,” 2010, pp. 1–10.
- [30] B. E. Olivares, M. A. Cerda Muñoz, M. E. Orchard, and J. F. Silva, “Particle-filtering-based prognosis framework for energy storage devices with a statistical

- characterization of state-of-health regeneration phenomena,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 2, pp. 364–376, 2013, doi: 10.1109/TIM.2012.2215142.
- [31] K. S. Ng, C. S. Moo, Y. P. Chen, and Y. C. Hsieh, “Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1506–1511, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.11.021.
- [32] I. Snihir, W. Rey, E. Verbitskiy, A. Belfadhel-Ayeb, and P. H. L. Notten, “Battery open-circuit voltage estimation by a method of statistical analysis,” *J. Power Sources*, vol. 159, no. 2, pp. 1484–1487, 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.11.090.
- [33] L. Ran, W. Junfeng, and L. Gechen, “Prediction of State of Charge of Lithium-ion Rechargeable Battery with Electrochemical Impedance Spectroscopy Theory,” *2010 5th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, pp. 684–688, 2010, doi: 10.1109/ICIEA.2010.5516984.
- [34] A. J. Salkind, C. Fennie, P. Singh, T. Atwater, and D. E. Reisner, “Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology,” *J. Power Sources*, vol. 80, no. 1, pp. 293–300, 1999, doi: 10.1016/S0378-7753(99)00079-8.
- [35] M. Charkhgard and M. Farrokhi, “State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using neural networks and EKF,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4178–4187, 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2043035.
- [36] M. Berecibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van Den Bossche, “Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 572–587, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.042.
- [37] W. Guo and W. M. Healy, “Power Supply Issues in Battery Reliant Wireless Sensor Networks: A Review,” *Int. J. Intell. Control Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 15–23, 2014.