

Conceptos técnicos para comprender los Sistemas de Gestión de Baterías BMS

Technical concepts to understand the Battery Management Systems BMS

MARCELA GONZÁLEZ VALENCIA¹

LUZ ADRIANA TREJOS GRISALES²

RESUMEN

Con el avance de las tecnologías en los sistemas de energía renovable, vehículos eléctricos e híbridos, y otros dispositivos portátiles, se ha incrementado considerablemente la necesidad de optimizar el funcionamiento de las baterías. En la actualidad, una buena opción para lograrlo, son los Sistemas de Gestión de Baterías (BMS).

Una aplicación Battery Management System (BMS) determina la calidad y duración de las baterías. En realidad, existen varios parámetros a considerar cuando se analizan los sistemas de almacenamiento de energía, como se mencionan aquí. Este artículo presenta una revisión de los tipos/modelos de baterías recargables, los *conceptos básicos de su comportamiento y algunos aspectos comerciales* relacionados con proyecciones de uso y fabricantes emergentes.

Palabras clave: Sistema de Gestión de Baterías, estado de carga, estado de salud, energías alternativas, almacenamiento de energía.

Recibido: 28/07/2017 Aceptado: 25/10/2017.

ABSTRACT

With the advancement of technologies in renewable energy systems, electric and hybrid vehicles, and other portable devices, the need to optimize the operation of batteries has increased considerably.. Currently, a good option to achieve this, are the Battery Management Systems (BMS).

A Battery Management System (BMS) application determines the quality and duration of the batteries. Actually, there are several parameters to consider when analyzing energy storage systems, as mentioned here. This article presents a review of the types / models of rechargeable batteries, the basic concepts of their behavior and some commercial aspects related to use projections and emerging manufacturers.

Keywords: Battery Management Systems, state of charge, health condition, alternative energies, energy storage.

¹Ingeniera Electrónica, Tecnoparque nodo Pereira, Línea de Electrónica y Telecomunicaciones. Correo electrónico: margonzalez@sena.edu.co

²Magíster en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico Metropolitano. Grupo de Investigación en Materiales Avanzados y Energía. Correo electrónico: luztrejos@itm.edu.co

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda en la sustitución de combustibles fósiles por electricidad y la gradual cuota de mercado de los vehículos eléctricos, ha dado lugar a una nueva Área de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) donde se espera que las baterías sean seguras, económicas y eficientes con larga vida útil (Momayyezán, Hredzak & Agelidis, 2016; Morstyn, 2016). Por ejemplo, Chevrolet (GM-Volt.com., 2007) y Tesla Motors (Markoff, 2009) han producido vehículos eléctricos utilizando varios cientos y varios miles de celdas de la batería, respectivamente.

En la actualidad, las baterías están presentes en toda clase de dispositivos electrónicos, desde relojes pequeños, portátiles, teléfonos móviles, altavoces inalámbricos, herramientas eléctricas, satélites, vehículos eléctricos, fuentes de alimentación ininterrumpida, microredes de energía, entre otras aplicaciones con fuentes renovables de energía. Los dispositivos electrónicos recientes tienen mayor movilidad, son más ecológicos que sus antecesores y presentan una alta tasa de desarrollo, gracias a los avances en la fabricación y a los nuevos tipos de baterías existentes. Además, debido a la eficiencia en la cantidad de energía que puede almacenar una batería, los tamaños han disminuido significativamente (Zuo & Zhang, 2016).

Por otro lado, es necesario considerar las condiciones de operación normales para las baterías como conexiones, temperaturas y proceso de carga/descarga. Usualmente, para aumentar el voltaje, la corriente o la capacidad, se emplean diferentes tipos de conexión, es

decir, que varias baterías se combinan por medio de uniones en serie o en paralelo. Cuando se cargan o descargan, estas deben ser manejadas con cuidado, debido a los procesos químicos internos, lo cual conlleva a utilizar Sistemas de Gestión capaces de protegerlas y de conseguir la mayor cantidad posible de energía, maximizando su tiempo de operación y vida.

Los Sistemas de Gestión de Baterías son necesarios para proporcionar un mejor rendimiento y, por esta razón, se deben monitorear las siguientes variables: estado de carga o State of Charge (SoC), el estado de salud o State of Health (SoH), rendimiento y duración de la batería, proceso de carga y descarga (Haq, Leksono, Edi & Iqbal, 2014; Rodríguez, Gómez & Campos, 2015; Xing, Ma, Tsui & Pecht, 2011).

En este artículo se presentan los conceptos técnicos y comerciales básicos para comprender los Sistemas de Gestión de Baterías. En la sección I se exponen los tipos y modelos de baterías recargables; luego, en la sección II se definen los conceptos básicos de su funcionamiento. En la sección III se mencionan algunos aspectos comerciales relacionados con proyecciones de uso y fabricantes emergentes (start-ups) y, posteriormente, la sección VI contiene las conclusiones y comentarios finales del artículo.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

En este artículo se ha utilizado una metodología de investigación *perceptual*, es decir, se buscó, ordenó y analizó conocimiento externo y superficial de los sistemas de gestión de baterías. En términos muy generales, por medio de la

investigación *descriptiva* se logran exponer las principales clasificaciones de los tipos y modelos de baterías, las características técnicas de operación más relevantes y algunas consideraciones comerciales importantes; es necesario mencionar el aspecto comercial de esta tecnología emergente, ya que es su rentabilidad es la que determinara si esta tecnología continuará en desarrollo o perderá vigencia en un corto plazo de tiempo.

Tipos y modelos de baterías

Los tipos de baterías se dividen según su composición química interna y los modelos según el conjunto de ecuaciones matemáticas/ condiciones iniciales asumidas.

Las baterías recargables o baterías secundarias son aquellas que se pueden cargar y descargar varias veces. Estas han ganado importancia debido a su potencial de uso, su aceptable costo de recarga y su bajo impacto ambiental, en comparación con las baterías no recargables. Basado en la química interna y los materiales utilizados, hay diferentes tipos de baterías disponibles en el mercado (Hu, Cao & Edgardt, 2017; Kanapady, Kyle & Lee, 2017; Sangwan, Sharma & Kumar, 2017).

Tipos de baterías

Plomo ácido, níquel cadmio (NiCd), el hidruro de metal de níquel (NiMH) y el ion de litio (Li-ion) son algunas de las baterías recargables conocidas. Las características de rendimiento de cada una son diferentes y dependen de sus respectivas particularidades químicas internas y estrategias de operación (Battery University, s.f.; Rao, Vrudhula & Rakhmatov,

2003; Suresh, Tanneru & Rengaswamy, 2016). A continuación, se presentan las principales propiedades de cada una de ellas:

- *Plomo Ácido*: Este es el tipo más antiguo de baterías recargables. El plomo ácido es resistente, robusto y tiene un bajo costo, pero tiene un nivel de energía específica bajo. El plomo ácido se utiliza en sillas de ruedas, coches de golf, vehículos pequeños de transporte, iluminación de emergencia y fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS). El plomo es tóxico y no se puede depositar en vertederos.

- *Níquel Cadmio (NiCd)*: Se utiliza cuando se requiere larga vida útil, alta corriente de descarga y se presentan altas temperaturas de operación. NiCd es una de las baterías más resistentes y duraderas; es la única batería química que permite un proceso de carga ultrarápida con mínimo de estrés. Las principales aplicaciones son herramientas eléctricas, dispositivos médicos, aviación y UPS. Debido a las preocupaciones medioambientales, el NiCd está siendo reemplazado por otras sustancias químicas, pero mantiene su estatus en las aeronaves, debido a su buen historial de seguridad.

- *Hidruro de metal de níquel (NiMH)*: Sirve como un reemplazo para el NiCd, ya que solo tiene metales tóxicos suaves y proporciona un mayor nivel de energía específica. NiMH se utiliza para instrumentos médicos, vehículos híbridos y aplicaciones industriales.

- *Ion de litio*: está reemplazando muchas aplicaciones que usaban anteriormente baterías de plomo y de níquel. Debido a problemas de seguridad, Li-ion necesita un circuito de protección. Este tipo de baterías son más costosas que la mayoría, pero el alto recuento de ciclos y el bajo mantenimiento reducen

el costo por ciclo, en comparación con otras baterías químicas. Las baterías de ion de litio, que tienen un alto nivel de energía específica y una baja tasa de autodescarga, son actualmente muy populares y han sido consideradas para una amplia gama de aplicaciones. Por esto son las baterías más populares y usadas en la actualidad.

a. Modelos de Baterías

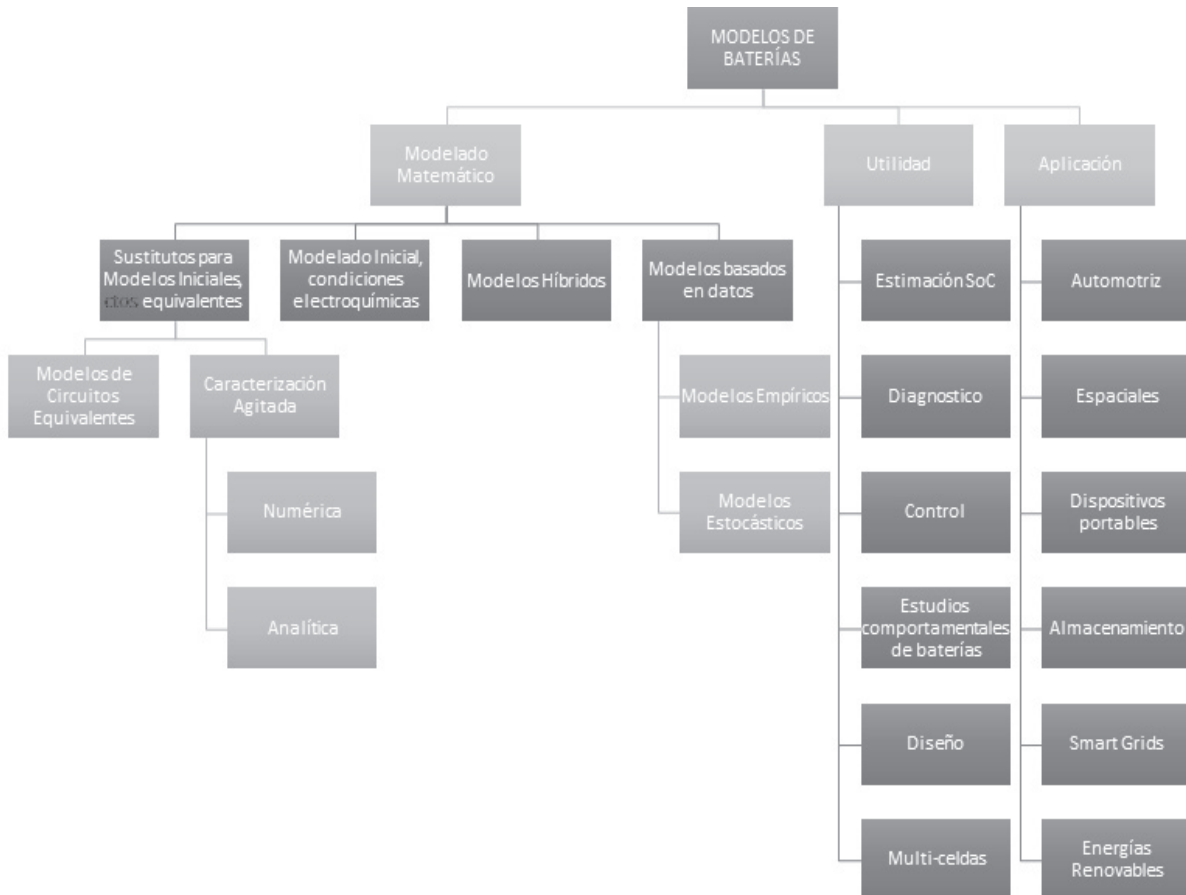
El desarrollo de modelos precisos y en tiempo real para baterías recargables es esencial para una gestión eficiente hacia su funcionamiento seguro. El comportamiento y operación de las baterías recargables se ha modelado de diversas

formas; por ejemplo, usando modelos empíricos, electroquímicos, térmicos, entre otros (Suresh, *et al.*, 2016). Entre esas aproximaciones sobresale el modelo basado en circuitos equivalentes para las baterías de ion de litio, debido a su balance aceptable entre complejidad y precisión (Barcellona, Piegari, Tironi & Musolino, 2015; Hu, Shengbo & Peng, 2012; Ramadesigan, Northrop, Sumitava, De., Santhanagopalan, Braatz, & Subramanian, 2012).

Conceptos básicos

Para asegurar la confiabilidad y eficiencia de las baterías, en especial en aplicaciones industriales, automotrices y sistemas basados

Figura 1. Clasificación modelos de batería



Fuente: Elaboración Propia

en energía renovable, es necesario contar con un Sistema de Gestión de Baterías o BMS por sus siglas en inglés *Battery Management System*. Este sistema lleva a cabo el monitoreo de las condiciones de operación de la batería, que se basa en el cálculo de los parámetros más relevantes de la batería: el estado de carga o SoC y el estado de salud o SoH.

Esos parámetros no son medibles directamente por medio de sensores, por tanto, se deben estimar a través de algoritmos basados en modelos equivalentes de la batería. Como se expone en la figura 1 existen diversos modelos equivalentes para representar el comportamiento de la batería, y la complejidad y precisión del método de cálculo de los parámetros de diagnóstico depende en cierto grado del modelo elegido. Sin embargo, la forma de operar las variables del modelo (el algoritmo de cálculo) juega también un papel fundamental en el desempeño del SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS (Liu Henke, Scherler & Jacobitz, 2017; Trejos & Ramos-Paja, 2015).

Es importante mencionar que el monitoreo constante del voltaje de celda, de cada celda en un paquete de baterías, es esencial para determinar la salud del paquete en general. Todas las celdas tienen una ventana de voltaje de operación en la que debe realizarse el proceso de carga/descarga para asegurar un funcionamiento apropiado y una vida útil y duradera a la batería (Jeon, Yun & Bae, 2015; Jin Park, Young Choi & Young Kim, 2014).

La combinación de estas mediciones con los datos del modelo de la batería, la temperatura y la información del envejecimiento, mejora la precisión de los valores de los parámetros de la

misma. Dependiendo de los algoritmos elegidos, se obtendrán diferentes niveles de lectura y estimación del rendimiento del sistema (Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS, 2013).

Estado de Carga

El estado de carga se define como la relación entre la capacidad actual de la batería Q_a y la capacidad nominal Q_n (Young, 2013), tal y como se expresa en (1).

$$SoC = \frac{Q_c}{Q_n} \quad (1)$$

Existen diversos métodos para calcular el SoC, tales como los de medida directa, que son aquellos en los cuales se utilizan propiedades físicas de la batería, como el voltaje o la impedancia. En esta categoría se destaca el método de espectroscopia de impedancia electroquímica (Lasia, 2002). *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*. Los métodos de estimación por conteo utilizan la integración en el tiempo de corrientes de carga y descarga inyectadas a la batería; a esta categoría pertenecen métodos como el contador de Coulomb y su versión mejorada. Por su parte, los sistemas adaptivos utilizan métodos matemáticos avanzados para ajustarse automáticamente a los cambios del sistema y aproximar el SoC para diferentes condiciones de operación. A esta categoría pertenecen métodos como redes neuronales, lógica difusa y filtros de Kalman. Finalmente, los sistemas híbridos combinan métodos de las categorías mencionadas anteriormente, para beneficiarse de las ventajas de cada método (Trejos & Ramos-Paja, 2015).

Estado de salud

El estado de salud se define como la relación de la capacidad máxima instantánea entregable por la batería en un momento $t - Q_{\max}(t)$ - y su capacidad cuando la batería estaba nueva Q_{nuevo} (Juang, Kollmeyer & Jahns, 2012). La ecuación (2) expresa la relación a través de la cual se calcula el SoH. Por tanto, este parámetro es un indicador del nivel de degradación del desempeño de la batería, indica su envejecimiento, y sirve para estimar su tiempo de vida restante (Juang, 2010; Trejos & Ramos-Paja, 2015).

$$\text{SoH}(t) = \frac{Q_{\max}(t)}{Q_{\text{nuevo}}} \quad (2)$$

Equilibrio de celdas

Las celdas se pueden conectar en serie y en paralelo para formar un paquete de baterías. Una conexión en paralelo aumenta la corriente total de la batería, mientras que una conexión en serie aumenta el voltaje total (Danilov, Lyedovskikh & Notten, 2011; Yun, Yeo & Park, 2013); en general las condiciones de la carga definen los requerimientos de conexión de las celdas (Berdichevsky, Kelty, Straubel & Toomre, 2006; Ci, Lin & Wu, 2016; Lee & Drury, 2013).

Debido a las diferencias de material, fabricación y temperatura, estas celdas no se cargan o descargan en la misma proporción. Como consecuencia, su voltaje diferirá más pronto o más tarde, esto conlleva a que cualquier celda se aproxime al límite de descarga y disminuya la capacidad de todo el sistema. Los circuitos de equilibrio de celdas igualan los niveles variables de voltaje de cada celda para restaurar

la capacidad de la batería diseñada inicialmente; esto presenta como resultado una configuración distribuida en un paquete de baterías (Dewey, Chandler & Tamura, 1995; Roderick, 2015; Yun, Yeo & Park, 2013).

Existen diferentes técnicas de equilibrio de celdas que difieren en la eficiencia energética, el esfuerzo físico y el espacio de la tarjeta electrónica (Kauer, Narayanaswamy, & Steinhorst 2017; Juang, 2010; Räber, Abdeslam & Heinzelmann, 2017).

Temperatura

Las mediciones de temperatura se usan no solo para evitar incendios y garantizar un sistema de almacenamiento confiable, sino también, para determinar si es deseable cargar o descargar una batería en tiempos específicos (Ashdown & Tullius, 1998; Gepp, Filimon & Koffel, 2015; Roderick, 2015).

Los sensores de temperatura monitorean cada celda de los sistemas de almacenamiento de energía. Los termistores son alimentados por una referencia de voltaje interna que se usa comúnmente para monitorear la temperatura de cada circuito. De esta forma, una referencia interna contribuye a reducir las imprecisiones de la lectura de temperatura frente a los cambios de temperatura externa (Hui Chang, Jie Huang, Pang Huang & Shi Lu, 2010; Lu, Wei & Pour, 2017; Chin Wang, Je Lu, & Yi Tsai, 2013; Chin Wang, Je Lu, & Yi Tsai, 2014).

Aspectos comerciales

A pesar de la gran necesidad de una mejor tecnología de almacenamiento, cualquier start-

up que lo intente se enfrenta a varias realidades de enormes proporciones, por dos razones importantes: el primero, el mercado para el almacenamiento avanzado presenta un desarrollo lento, ya que las tecnologías aún son incipientes y costosas. Y segundo, a corto plazo el precio de la tecnología existente; las baterías de iones de litio han caído mucho más rápido de lo esperado, situación que está reduciendo los beneficios prometidos por el enfoque de usar más fuentes de energía renovables (Casals & García, 2014; Teodorescu, Sauer & Rodríguez, 2013).

Las empresas generadoras de energías renovables deben hacer una inversión inicial significativa para desarrollar nuevos equipos y escalar la fabricación, mientras derivan por los cambiantes precios y rendimientos provocados por las mejoras constantes de las tecnologías establecidas. Frente a estos desafíos son muy pocas las instituciones que tienen éxito (Jomaux, Latiers & De Jaeger, 2015; Maier, Bastos & Schmid, 2014; Mangum, 2016).

Otro aspecto fundamental que debe ser considerado es el mantenimiento y los costos económicos que esta actividad puede generar. Ahora bien, ocurre lo siguiente, luego de conocer las principales variables de interés: SoC, SoH, temperatura, entre otros; es importante realizar un mantenimiento adecuado para asegurar que los problemas con las baterías se eviten a largo plazo. El mantenimiento es un compromiso entre asegurar una gran potencia de respaldo y mantener los costos bajos. Además, tradicionalmente ocupa un lugar bajo en la lista de prioridades técnicas y, por lo tanto, debe ser tan sencillo como sea posible. La manera más segura de minimizar el costo y el tiempo que se invierte en esta actividad es ser lo más proactivo posible.

CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

En este artículo se muestra una descripción básica de los sistemas de gestión de baterías. Se revisaron los tipos de baterías recargables de acuerdo con su composición química interna; los modelos matemáticos con base en las condiciones iniciales asumidas; sus principales características (SoH, SoC, ...) y, para finalizar, se menciona su posición comercial, dado que los fabricantes emergentes son emprendedores que están aprovechando el auge de las energías alternativas y aunque tienen un futuro promisorio, aún no es muy seguro.

Cada tipo de batería recargable posee requisitos únicos de desempeño según su composición química interna y por esto es importante definir correctamente sus principales variables de funcionamiento. Lo anterior, con el fin de realizar un Sistema de Gestión de Baterías conveniente y así, maximizar la capacidad, la seguridad de operación y la vida útil de las baterías.

Tradicionalmente se ha buscado aumentar la eficiencia de los sistemas basados en baterías, a través del Sistema de Gestión de Baterías, SoH, SoC, circuitos de seguridad que evitan cambios bruscos de temperatura y estrategias de equilibrio de celdas; sin embargo, las actividades más recientes en (I+D+i) están enfocadas al diseño de paquetes reconfigurables de baterías, ya que representan una solución satisfactoria ante sus problemas convencionales y los sistemas de gestión de batería asociados.

Por último, las baterías ion de litio han dominado el mercado de baterías recargables durante mucho tiempo y siguen siendo la principal opción en sistemas de alta demanda

de consumo y confiabilidad. Sin embargo, en la actualidad se buscan alternativas y esto se denota en un alto grado en los mercados emergentes; los fabricantes —principales clientes— siguen probando y buscando un sistema de almacenamiento de energía que mejor se adapte a sus necesidades.

REFERENCIAS

- Ashdown, B., & Tullius, N. (Octubre de 1998). Prevention of thermal runaway in VRLA batteries. *En Twentieth International Telecommunications Energy Conference INTELEC. Twentieth International. Conferencia llevada a cabo en San Francisco, USA.*
- Barcellona, S., Piegari, L., Tironi, E., & Musolino, V. (Noviembre de 2015). A methodology for a correct sizing of electrochemical storage devices. *Power and Energy Engineering Conference APPEEC. Conferencia llevada a cabo en Brisbane, Australia.*
- Battery University. (s.f.). *Comparison Table of Secondary Batteries*. Recuperado de: http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries
- Berdichevsky, G., Kelty, K., Straubel, JB., & Toomre, E. (2006). *The Tesla Roadster Battery System Tesla Motors*. Recuperado de: <http://large.stanford.edu/publications/coal/references/docs/tesla.pdf>
- Casals, L. C., & García, B. A. (Junio de 2014). A review of the complexities of applying second life electric car batteries on energy businesses. *Energy Syst. Conf. Conferencia llevada a cabo en Inglaterra.*
- Ci, S., Lin, N., & Wu, D. (2016). Reconfigurable battery techniques and systems: A survey. *IEEE Access*, (4), 1175-1189. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2545338
- Chin Wang, C., Je Lu, W., & Yi Tsai, T. (Noviembre de 2013). A temperature detector with process compensation and non-linear calibration for Battery Management Systems with HV ESD protection. *SoC Design Conference (ISOC), 2013 International*, 095-098. Conferencia llevada a cabo en Busan, Corea del Sur.
- Chin Wang, C., Je Lu, W., & Yi Tsai, T. (Junio de 2014). A CMOS wide-range temperature sensor with process compensation and second-order calibration for Battery Management Systems. *Circuits and Systems (ISCAS) 2014 IEEE International Symposium on*. Simposio llevado a cabo en Melbourne, Australia.
- Danilov, D. L., Lyedovskikh, A., & Notten, P.H.L. (Septiembre de 2011). Voltage and temperature dynamic simulations for advanced Battery Management Systems. *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Conferencia llevada a cabo en Chicago, USA.
- Dewey, M. Chandler, D., & Tamura, A. (Noviembre de 1995). Battery pack circuit design for safety and protection. *Microelectronics Communications Technology Producing Quality Products Mobile and Portable Power Emerging Technologies*. Conferencia llevada a cabo en San Francisco, USA.
- Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS. (2013). *Fraunhofer IIS*. Recuperado de: https://www.iis.fraunhofer.de/content/dam/iis/de/doc/lv/los/energie/Power-und_Batteriemanagement/batterymangement_2013-4.pdf
- Gepp, M. F., Filimon, R., & Koffel, S. (Junio de 2015). Advanced thermal management for temperature homogenization in high-power lithium-ion battery systems based on prismatic cells. *Industrial Electronics (ISIE), 2015 IEEE 24th International Symposium on*. Conferencia llevada a cabo en Buzios, Brasil.
- GM-Volt.com. (29 de agosto de 2007). Latest Chevy Volt Battery Pack and Generator Details and Clarifications. Recuperado de: <http://gm-volt.com/2007/08/29/latest-chevy-volt-battery-pack-and-generator-details-and-clarifications/>
- Haq, I. N., Leksono, Edi., & Iqbal, M. (Noviembre de 2014). Development of Battery Management System for cell monitoring and protection. *Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS), 2014 International Conference on IEEE*. Conferencia llevada a cabo en Kuta, Indonesia.
- Hu, X. Shengbo, L., & Peng, H. (2012). A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, (198), 359-367. doi: doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.013.
- Hu, X. C., Cao, D., & Egardt, B. (2017). Condition Monitoring in Advanced Battery Management Systems: Moving Horizon Estimation Using a Reduced Electrochemical Model. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, volumen (PP), 1. doi: 10.1109/TMECH.2017.2675920
- Hui Chang, M., Jie Huang, Y., Pang Huang, H., & Shi Lu, S. (2010). Chip implementation with a combined temperature sensor and reference devices based on DZTC principle. *Sensors*, 11(11), 10308-10325. doi: 10.3390/s111110308
- Jin Park, D., Young Choi, S., & Young Kim, R. (2014). A novel battery cell balancing circuit using an auxiliary circuit for fast equalization. *Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the*

- IEEE*. Conferencia llevada a cabo en Dallas, USA.
- Jeon, S., Yun, J., & Bae, S. (Junio de 2015). Active cell balancing circuit for series-connected battery cells. *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 2015 9th International Conference on*. Conferencia llevada a cabo en Seoul, Corea del Sur.
- Jomaux, J., Latiers, A., & De Jaeger, E. (Julio de 2015). Cost-based dimensioning of Battery Energy Storage and energy management system for Frequency Containment Reserves provision. *Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE*. Conferencia llevada a cabo en Denver, USA.
- Juang, L. W. (2010). *Online battery monitoring for state-of-charge and power capability prediction* (Tesis de maestría). University of Wisconsin Madison. Madison, Wisconsin, USA.
- Juang, L. W., Kollmeyer, P. J., & Jahns, T. M. (Septiembre de 2012). Implementation of online battery state-of-power and state-of-function estimation in electric vehicle applications. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Conferencia llevada a cabo en Raleigh, USA.
- Kanapady, R., Kyle, K., & Lee, J. (Marzo de 2017). Battery life estimation model and analysis for electronic buses with auxiliary energy storage systems. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2017 IEEE*. Conferencia llevada a cabo en Tampa, USA.
- Kauer, M., Narayanaswamy, S., & Steinhorst, S. (2017). Rapid Analysis of Active Cell Balancing Circuits. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 36, 694-698. doi: 10.1109/TCAD.2016.2597224
- Lasia, A. (2002). Electrochemical impedance spectroscopy and its applications. En B. E. Conway, J. O'M. & R. E., White (Ed). *Modern aspects of electrochemistry* (pp. 143-248). US: Springer.
- Lee, W., & Drury, D. (2013). Development of a hardware-in-the-loop simulation system for testing cell balancing circuits. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28, 5949-5959. doi: 10.1109/TPEL.2013.2256799
- Liu-Henke, X., Scherler, S., & Jacobitz, S. (Abril de 2017). Verification oriented development of a scalable Battery Management System for lithium-ion batteries. *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2017 Twelfth International Conference on*. Conferencia llevada a cabo en Monte Carlo, Mónaco.
- Lu, J., Wei, L., & Pour, M. (Junio de 2017). Modeling discharge characteristics for predicting battery remaining life. *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2017 IEEE*. Conferencia llevada a cabo en Chicago, USA.
- Maier, W., Bastos, I., & Schmid, A. (Mayo de 2014). Low-Cost, Precision Battery Management System with Active Balancing up to ± 10 A. *PCIM Europe 2014; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. Conferencia llevada a cabo en Nuremberg, Alemania.
- Mangum, C. (01 de agosto de 2016). Top Four Considerations for Battery Management in a Connected World. *Battery Power*. Recuperado de: <http://www.batterypoweronline.com/main/articles/top-four-considerations-for-battery-management-in-a-connected-world/>
- Markoff, J. (14 de septiembre de 2009). *The New York Times/Science*. Recuperado de: <http://www.nytimes.com/2009/09/15/science/15batt.html?scp=1&sq=electricvehicletesla20ibm&st=cse>
- Momayyezani, M., Hredzak, & Agelidis, V. (2015). Integrated reconfigurable converter topology for high-voltage battery systems, 31, 1968-1979. doi: 10.1109/TPEL.2015.2440441.
- Morstyn, T. M. (2016). Distributed Control for State-of-Charge Balancing Between the Modules of a Reconfigurable Battery Energy Storage System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, (págs. 7986-7995).
- Räber, M., Abdeslam, D., & Heinzelmann, A. (2017). Performance estimation of a cell-to-cell-type active balancing circuit for lithium-ion battery systems. *Industrial Electronics (ISIE), 2017 IEEE 26th International Symposium on*. Conferencia llevada a cabo en Edinburgh, UK.
- Rao, R., Vrudhula, S., & Rakhmatov, D. (Diciembre de 2003). Battery modeling for energy aware system design. *Computer*, 36(12), 77-87. doi: 10.1109/MC.2003.1250886
- Ramadesigan, V., Northrop, P., Sumitava, De., Santhanagopalan, S., Braatz, R., & Subramanian, R. (2012). Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective. *Journal of The Electrochemical Society*. doi: 10.1149/2.018203jes
- Roderick, R. (26 de 03 de 2015). *Electronic Design*. Recuperado de: <http://www.electronicdesign.com/power/look-inside-battery-management-systems>
- Rodríguez, D., Gómez, R., & Campos, A. (2015). Sistemas de gestión de baterías (SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS) y su importancia para los sistemas de almacenamiento de baterías (BESS). *Revista Tecnura*, 19, 51-56. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.ICE.a05>

- Sangwan, V., Sharma, A., & Kumar, R. (Junio de 2017). Optimal parameter estimation of battery model for pivotal automotive Battery Management System. *Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. Conferencia llevada a cabo en Milan, Italia.
- Suresh, R. T. (2016). Modeling of rechargeable batteries. *Current Opinion in Chemical Engineering*, (págs. 63-74). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211339816300478>)
- Teodorescu, R. S. (2013). *Industrial/PhD course storage systems based on electrochemical batteries for grid support applications*. Denmark: Aalborg University. http://www.alpbes.et.aau.dk/digitalAssets/99/99960_154241_folder_es_oct2016.pdf)
- Trejos, L. A., & Ramos-Paja, C. A. (2015). Diagnóstico y pronóstico de baterías conceptos básicos y modelos matemáticos. *Revista Avances en Ingeniería Eléctrica/Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín*, 35-43. <http://universidadeindustria.com/revista-avances-en-ingenieria-electrica-2015/>)
- Xing, Y., Ma, E., Tsui, K., & Pecht, M. (2011). Battery Management Systems in electric and hybrid vehicles. *Energies*, 4(11), 1840-1857. doi: 10.3390/en4111840
- Young, K. (2013). Electric vehicle battery technologies. En García-Valle, Peças Lopes, & Joao A. (Eds.), *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks* (pp. 15-56). New York: Springer.
- Yun, J., Yeo, T., & Park, J. (Marzo de 2013). High efficiency active cell balancing circuit with soft-switching technique for series-connected battery string. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE*. Conferencia llevada a cabo en Long Beach, USA.
- Zuo, X., & Zhang, C. (Abril de 2016). Flexible Design for Battery Management System. *Network and Information Systems for Computers (ICNISC), 2016 International Conference on*. Conferencia llevada a cabo en Wuhan, China.

Cómo referenciar este artículo

- González Valencia, M., & Trejos Grisales, L. A. (2017). Conceptos técnicos para comprender los Sistemas de Gestión de Baterías BMS. *Revista Via Innova*, 4(4), 37-46. doi: <https://doi.org/10.23850/2422068X.1179>