

## Medidor IoT del estado de salud de baterías IoT battery health meter

A. L. Verdín Tavares <sup>a</sup>, E. M. Bravo Valtierra <sup>a</sup>, J. R. Cárdenas-Valdez <sup>b</sup>, A. Calvillo-Téllez <sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> Academia de Aeronáutica CECyT17, Instituto Politécnico Nacional, 37358, León de los Aldama, Guanajuato, México.

<sup>b</sup> Academia de Biomédica TECNM/IT, Tijuana 22435, Baja California, México.

<sup>c</sup> Académica de Telecomunicaciones CITEDI, Instituto Politécnico Nacional, 22435, Tijuana, Baja California, México.

### Resumen

La estimación de las métricas básicas de las baterías, como el estado de carga SoC y el estado de salud SoH, es crucial para determinar si una batería se puede recuperar y de esta forma prolongar su vida útil. Esto es particularmente importante en el contexto de uso en dispositivos electrónicos como computadoras portátiles, teléfonos celulares; entre otros, ya que la eliminación de las baterías puede contribuir a la contaminación ambiental debido a sus materiales tóxicos. Para evaluar los parámetros SoC y SoH, se emplean técnicas como el monitoreo de voltaje, corriente y temperatura durante los ciclos de carga y descarga. Si una batería muestra un SoH bajo, indica una degradación significativa; es posible que no sea adecuada para un uso posterior, aunque si el SoH sigue siendo relativamente alto, podría ser posible recuperar la batería. Los sistemas de recuperación pueden emplear procesos como ciclos profundos que implican la descarga y recarga de la batería varias veces, el equilibrio de la batería que consiste en garantizar que todas las celdas tengan la misma capacidad de carga o la aplicación de algoritmos de carga específicos para reactivar o mejorar el rendimiento de la batería.

**Palabras Clave:** Batería, Estado de Carga SoC, Estado de Salud SoH, Internet de las Cosas, Reusar.

### Abstract

Estimation of basic battery metrics, such as SoC state of charge and SoH health, is crucial to determine if a battery can recover and thus extend its lifespan. This is particularly important in the context of use on electronic devices such as laptops, cell phones; among others, since the disposal of batteries can contribute to environmental contamination due to its toxic materials. To evaluate SoC and SoH parameters, techniques such as monitoring voltage, current, and temperature during charge and discharge cycles are employed. If a battery shows a low SoH, it indicates significant degradation; it may not be suitable for further use, although if the SoH is still relatively high, it might be possible to recover the battery. Recovery systems can employ processes such as deep cycling which involves discharging and recharging the battery multiple times, battery balancing which is ensuring that all cells have the same charge capacity, or applying specific charging algorithms for revive or improve battery performance.

**Keywords:** Battery, State of Charge SoC, State of Health SoH, Internet of Things, Reuse.

### 1. Introducción

La estimación de las métricas básicas de la batería juega un papel crucial para determinar si una batería está en condiciones de ser recuperada y si se puede extender su vida útil. Esto es particularmente importante en el contexto de las computadoras portátiles, los teléfonos celulares y los autos eléctricos, ya que el creciente desecho de estos dispositivos plantea desafíos ambientales debido a la presencia de materiales altamente tóxicos.

Las baterías suelen contener litio, que es un metal alcalino, junto con otras sustancias tóxicas en forma de polímeros como Fosfato de Hierro. Cuando estas baterías se desechan y no se procesan adecuadamente, pueden liberar dichos compuestos dañinos al medio ambiente (Peyré, 2020).

Para evitar lo anterior, los especialistas en el campo están prestando mucha atención a la evaluación de las métricas básicas de las baterías.

Al evaluar estas métricas, es posible determinar si una batería todavía está en condiciones de uso o si ha llegado al final de su vida útil. Un enfoque para evitar la contaminación

\*Autor para la correspondencia: [acalvillo@ipn.mx](mailto:acalvillo@ipn.mx)

**Correo electrónico:** [ebravov@ipn.mx](mailto:ebravov@ipn.mx) (A. L. Verdín Tavares), [ebravov@ipn.mx](mailto:ebravov@ipn.mx) (E. M. Bravo Valtierra), [jose.cardenas@tectijuana.edu](mailto:jose.cardenas@tectijuana.edu) (J. R. Cárdenas-Valdez), [acalvillo@ipn.mx](mailto:acalvillo@ipn.mx) (A. Calvillo-Téllez).

es a través del reciclaje de baterías, lo que implica el uso de una planta diseñada específicamente para este propósito, se tiene como objetivo recuperar materiales valiosos como cobalto, litio, manganeso y níquel.

Estos pueden luego reintroducirse en el proceso de producción, reduciendo la necesidad de extraer nuevos recursos y minimizando el impacto ambiental, al implementar un sistema de recuperación de baterías que utiliza métricas básicas para la evaluación, donde el objetivo es promover una economía circular.

Esto significa recuperar las baterías que aún se pueden usar o reciclar y reemplazar aquellas que verdaderamente han llegado al final de su vida útil. A través de este enfoque, es posible extender la vida útil de las baterías, y de esta forma minimizar los desechos, lo que puede influir en reducir significativamente los efectos nocivos de la eliminación de las baterías (Millán, 2015).

### *1.1. Degradación de baterías*

La forma en que se puede evaluar el proceso de envejecimiento de las baterías LiFePO<sub>4</sub> (fosfato de hierro y litio), es mediante la disminución de su rendimiento con el tiempo de uso. Estas baterías son dispositivos de almacenamiento de energía recargables comúnmente utilizados en diversas aplicaciones, incluidos los vehículos eléctricos y los sistemas de energía renovable.

A medida que las baterías LiFePO<sub>4</sub> envejecen, su rendimiento se deteriora gradualmente. Esta disminución se puede atribuir a diversos factores, como las reacciones químicas dentro de la batería, la degradación de los electrodos y los cambios en la estructura interna siendo la temperatura su principal factor de agotamiento y envejecimiento. Estos factores conducen a una disminución de la capacidad, la potencia de salida y la eficiencia general de la batería (Conde Velasco, 2020).

Para evaluar la tasa y el alcance de la degradación del rendimiento en las baterías LiFePO<sub>4</sub>, existen métodos y pruebas de laboratorio (Villasol, 2023) [cita requerida de los métodos].

Esto significa que los investigadores y expertos en baterías, deben realizar experimentos en entornos controlados para medir las características de rendimiento de la batería en diferentes etapas y predecir el porcentaje de vida útil que les queda.

Estas pruebas generalmente involucran ciclos de carga y descarga, así como el control de su temperatura, además de monitorear los parámetros de capacidad de voltaje y corriente.

Al analizar los datos de rendimiento recopilados de estas pruebas, se puede determinar, qué tan rápido disminuye la capacidad de la batería y en qué medida se reduce su potencia de salida con el tiempo.

Sin embargo, las pruebas de laboratorio requieren de mucho tiempo para evaluar el grado de envejecimiento de la batería, por lo que hay que dedicar muchos recursos para la evaluación; que por la forma en que se realiza, puede que no represente con precisión las condiciones de uso del mundo real (Banguero 2020).

En aplicaciones prácticas, las baterías LiFePO<sub>4</sub> están sujetas a diversos factores ambientales, tensiones operativas y diferentes patrones de carga y descarga. Por lo tanto, es posible

que los resultados de laboratorio no se alineen perfectamente con la degradación del rendimiento experimentada en escenarios del mundo real.

Actualmente, se están realizando esfuerzos para desarrollar métodos alternativos para evaluar el envejecimiento de las baterías LiFePO<sub>4</sub> que sean más eficientes, rentables y representativos de las condiciones en las que se emplean realmente. Esto puede incluir el uso de técnicas de envejecimiento acelerado, modelos predictivos basados en algoritmos matemáticos o la incorporación de sensores avanzados dentro de las propias baterías para monitorear su salud y rendimiento en tiempo real (Núñez, 2021).

Por ejemplo, algunos experimentos controlados someten a la batería a una temperatura variable (0–40 °C) y SoC (10 %–90 %) (Tong, 2015).

Gracias a las ventajas de precisión y elaboración, la aplicación de modelos electroquímicos se ha convertido en una tendencia potencial para la estimación de estados de baterías de iones de litio en sistemas avanzados de gestión de baterías (BMS). la estimación conjunta del estado de carga (SoC) y el estado de salud (SoH) de baterías con un estado de envejecimiento del 100% al 70% de la capacidad inicial se prueban bajo perfiles dinámicos de corriente. Los resultados muestran que el error máximo de estimación de SoH se puede limitar al 2,8%, y el error de estimación de SoC está limitado por 2% para baterías nuevas y viejas (Liu, 2020).

En modelos eléctricos, térmicos y de envejecimiento, se implementó la estimación de estado usando simulación de bucle abierto para construir un sistema de observación para la batería LiFePO<sub>4</sub>. La característica constructiva del sistema de observación prolonga su vida útil. Los resultados de 1h de duración con resoluciones de 1s demuestran la confiabilidad y robustez del observador propuesto para monitorear simultáneamente el SOC y el SOH de las baterías LiFePO<sub>4</sub> (Al-Gabalawy, 2021).

### *1.2. Conceptos de un medidor de salud de la batería IoT*

Los conceptos de un medidor de salud de la batería IoT y términos relacionados en términos simples:

Donde IoT significa Internet de las Cosas y se refiere a la red de objetos o dispositivos físicos (como teléfonos inteligentes, electrodomésticos, vehículos, etc.) que están conectados a Internet y pueden comunicarse entre sí.

El medidor de estado de la batería de IoT es un dispositivo que ayuda a monitorear y evaluar el estado de una batería. Recopila datos sobre el rendimiento de la batería y envía esa información a un sistema o aplicación central para su análisis e interpretación.

Estado de carga SoC, carga representa la cantidad actual de energía almacenada en una batería, expresada como un porcentaje de su capacidad total. Indica cuanta energía queda almacenada en la batería y le da una indicación de cuánto tiempo puede alimentar un dispositivo antes de que necesite recargarse.

El Estado de salud SoH, es una medida del estado general de una batería y su capacidad para almacenar y entregar energía en comparación con su capacidad original. Este parámetro proporciona información sobre la degradación de la batería a lo largo del tiempo debido al uso, la antigüedad u

otros factores. SoH indica qué tan bien puede funcionar la batería en términos de sus capacidades originales.

En resumen, un medidor de salud de la batería IoT es un dispositivo conectado a Internet que ayuda a rastrear la cantidad de energía restante en una batería SoC y evalúa el estado y el rendimiento general de la batería SoH; lo que permite a los usuarios controlar el estado de la batería y tomar decisiones informadas sobre la carga, el reemplazo o la optimización del uso de la batería.

- IoT: Internet of Things.
- SoH The state-of-health. Es la diferencia entre una batería en estudio y una batería nueva y considera el envejecimiento de la celda.
- SoC State of Charge. Es el estado de carga de la batería describe el porcentaje de la energía restante disponible en la celda.
- BMS Battery management system: Sistema de gestión de baterías, básicamente supervisa en las baterías, rangos objetivo de voltaje y corriente y temperatura durante un período de tiempo, esto contra escenarios de carga esperados.

## 2. Desarrollo

A través de un sistema IoT embebido como el mostrado en la figura 1, se registrarán las lecturas de variables como temperatura, voltaje y corriente.

En un primer registro de lectura de variables, se considera a la temperatura de la batería para iniciar el procedimiento de carga y descarga como lo muestra el algoritmo de la figura 2.

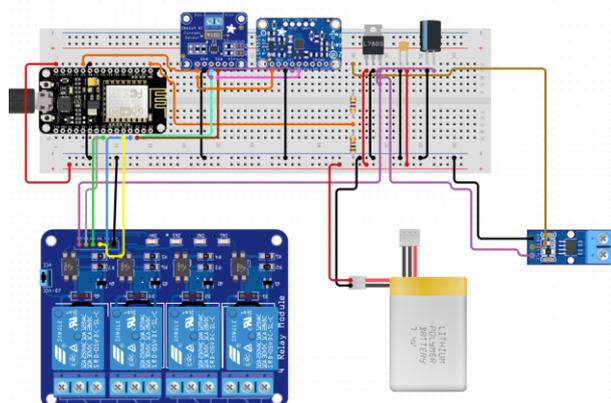


Figura 1: Censado de voltaje corriente y temperatura en el procedimiento de carga descarga de baterías.

Una vez terminado el procedimiento de descarga y carga, se evalúa el desempeño de la batería, asignando la calificación del estado de salud si las métricas entran en los rangos de la tabla 1.

Las baterías serán sometidas a un procedimiento de carga y descarga, hasta obtener las métricas de las variables que definirán el estado de salud que poseen, y así definir si mantiene las condiciones de demanda correspondientes con la aplicación, o si debe ser reemplazado, con el fin de garantizar el funcionamiento del dispositivo para la aplicación que realiza.

Si la batería conserva un ochenta por ciento de salud, se puede utilizar como una segunda opción, donde su uso requiere menor exigencia y así conserva sus características fisicoquímicas y evita su confinamiento.

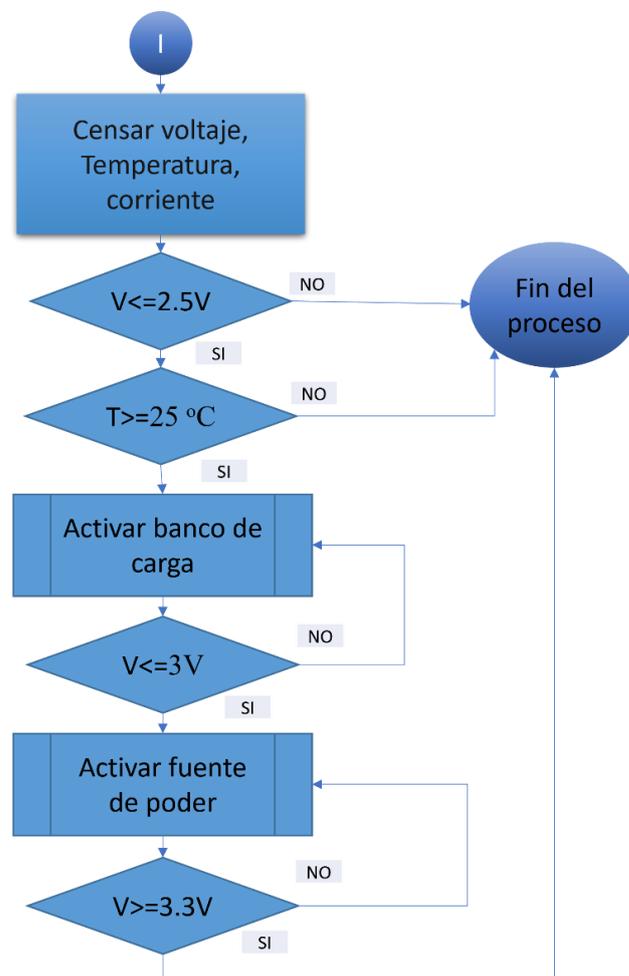


Figura 2: Diagrama de flujo del Censado variables de baterías.

Tabla 1: Nivel de voltaje que determina el estado de salud de la batería

	Nivel de Voltaje	Estado de carga de la batería
Buen Estado	3.6	100%
Buen Estado	3.4	100%
Buen Estado	3.35	99%
Buen Estado	3.325	90%
Reúso	3.3	70%
Reúso	3.275	40%
Reúso	3.25	30%
Reúso	3.225	20%
Reúso	3.2	17%
Reúso	3.125	14%
No apta para reúso	3	9%
No apta para reúso	2.5	0%

El sistema genera varios ciclos de carga y descarga observando el nivel alcanzado luego de este procedimiento, si las baterías alcanzan un rango de 3.35a 3.6voltios, entran en la condición de buen estado, pero si el rango se mantiene entre

los valores de 3.125 a 3.3, se descartan y reemplazan si el rango es de 0 a 3.0.

Estos voltajes se tienen en un desempeño de operación de la batería a 25°C

### 2.1. Estimación de parámetro SoC

Esta información es crucial para saber cuánta energía está disponible para su uso (Gao, 2018).

$$SoC/\% = 100 \frac{Q_0+Q}{Q_{max}} = SoC/\% + 100 \frac{Q}{Q_{max}}, \quad (1)$$

$Q_0/mAh$  = Carga inicial de la batería.

$Q/mAh$  = La cantidad de electricidad entregada o suministrada a la batería.

$Q_{máx}/mAh$  = La carga máxima que se puede almacenar en la batería.

$SoC_0/\%$  = El estado de carga inicial (SoC/%) de la batería

Si la batería es nueva:  $Q_{max} = Cr$  y  $Q_0 = 0.5Q_{máx}$  generalmente. crece la capacidad nominal de la batería dada por el fabricante.

Si la batería está completamente cargada:  $Q_0 = Q_{máx}$  y  $SoC_0 = 100\%$

$$SoC/\% = 100 \frac{Q_0+Q}{Q_{max}} = SoC/\% + 100 \frac{Q}{Q_{max}}, \quad (2)$$

El estado de carga también se puede considerar al revés y se denomina profundidad de descarga (DoD). Se calcula de la siguiente manera:

$$DoD/\% = 100 - SoC/\%. \quad (3)$$

### 2.2. Estimación de parámetro SoH

El estado de salud (SoH) de una batería describe la diferencia entre una batería en estudio y una batería al inicio de vida y considera el envejecimiento de la celda.

Se define como la relación entre la carga máxima de la batería y su capacidad nominal.

Se expresa como un porcentaje como se ve a continuación.

$$SoH/\% = 100 \frac{Q_{max}}{C_r}. \quad (4)$$

$Q_{máx}/mAh$  = La carga máxima disponible de la batería

$C_r$  = La capacidad nominal (BioLogic, 2023)

El BMS puede rastrear cualquier degradación o pérdida en la capacidad de la batería a lo largo del tiempo. Al optimizar los patrones de carga y descarga basados en el SoC, el BMS puede maximizar la vida útil de la batería y garantizar un funcionamiento confiable.

## 3. Resultados

El BMS puede rastrear cualquier degradación o pérdida en la capacidad de la batería a lo largo del tiempo. Al optimizar los patrones de carga y descarga basados en el SoC, el BMS puede maximizar la vida útil de la batería y garantizar un funcionamiento confiable.

En la figura 3 se presenta el arreglo telemetría y control del censado de temperatura, voltaje y corriente, y la activación de carga y descarga de la batería como se observa en la figura 4, mostrando los resultados obtenidos en la figura 5.

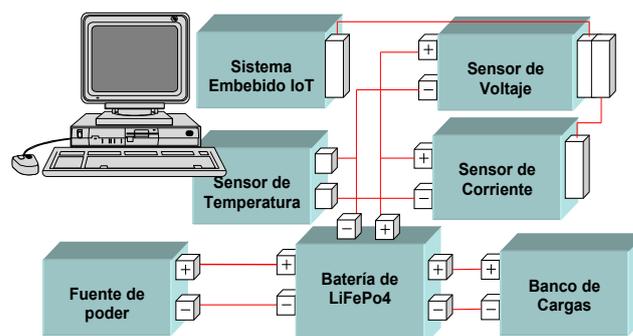


Figura 3: Diagrama de flujo del Censado variables de baterías.

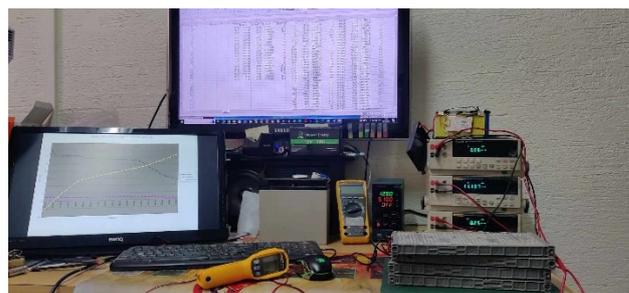


Figura 4: Censado de variables de baterías.

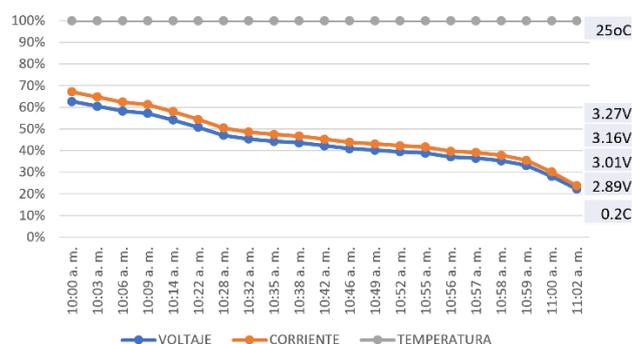


Figura 5: Diagrama de flujo del Censado variables de baterías.

## 4. Conclusiones

Es importante resaltar que cuando se descarga una batería de LiFePO4 a una velocidad específica y segura de 0,2 C, es debido a mantener sus condiciones de salud sin someterla a esfuerzos térmicos que disminuyan su vida útil, y de esta forma sostenga su rendimiento, y se conserve en una zona confortable y segura.

La batería de LiFePO4 es de las baterías la que más duración y soporte ante condiciones agresivas de uso mantiene sus características físicas sobre todo si se le realizan pruebas a un ritmo moderado, como el de 0,2 C, que le permite conservar su vida útil y de esta forma prolongar su tiempo de vida. Cuando descarga una batería demasiado rápido. Por el contrario, si se aceleran las pruebas, la batería se sometería a esfuerzos lo que ocasionaría una degradación más rápida de sus componentes. Las tasas de descarga más lentas ayudan a mantener la salud de la batería a lo largo del tiempo.

La rapidez de carga descarga, permitió mantener a la batería bajo prueba, en una zona segura. Aunque las baterías LiFePO4 son seguras porque es poco probable que se sobrecalentarse o

incendio. En las pruebas se consideró que el procedimiento de descarga a altas tasas podía generar calor, y con esto aumentar el riesgo de fuga térmica, provocando que se inflaran y perdieran sus cualidades fisicoquímicas.

Se considero que a 0.2 C la batería de LiFePO4 mejora las lecturas de voltaje y corriente conservando su eficiencia energética.

Se consiguió tener métricas de un rendimiento estable conservando la descarga a un ritmo controlado y de esta forma recuperar los valores de niveles de voltaje estables durante todo el proceso de descarga.

Finalmente concluimos en la obtención de parámetros fidedignos de voltaje corriente y conservación de la temperatura sin estresar a la batería, es encontrar un equilibrio entre obtener la energía que necesita y garantizar que la batería se mantenga segura y saludable. Es un compromiso entre maximizar la salida de energía inmediata y garantizar el rendimiento y la seguridad a largo plazo de la batería.

## 5. Referencias

- Banguero Palacios, E. (2020). Modelado, estudio y validación experimental de la influencia de los parámetros internos en el rendimiento de sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías. Aplicación al caso del Departamento del Chocó (Colombia) (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Bio (2023) Battery states: State of charge (SoC), State of Health (SoH). Electrochemistry basics series. [www.biologic.net/topics/battery-states-state-of-charge-soc-state-of-health-soh/](http://www.biologic.net/topics/battery-states-state-of-charge-soc-state-of-health-soh/)
- Conde Velasco, A. (2020). Estudio, análisis y desarrollo de un modelo genérico de envejecimiento para baterías de ion-litio. aplicación a LFP y NMC (Doctoral dissertation, Industriales).
- Gao, Y., Zhang, X., Yang, J., & Guo, B. (2018). Estimation of state-of-charge and state-of-health for lithium-ion degraded battery considering side reactions. *Journal of the electrochemical society*, 165(16), A4018.
- Hu, X., Yuan, H., Zou, C., Li, Z., & Zhang, L. (2018). Co-estimation of state of charge and state of health for lithium-ion batteries based on fractional-order calculus. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(11), 10319-10329.
- Liu, B., Tang, X., & Gao, F. (2020). Joint estimation of battery state-of-charge and state-of-health based on a simplified pseudo-two-dimensional model. *Electrochimica Acta*, 344, 136098.
- Millán Quintero, J. A., & Gracia Gallón, J. A. A. Modelo de logística inversa para la recuperación y aprovechamiento de residuos de baterías fuera de uso en el Norte del Valle del Cauca [recurso electrónico] (Doctoral dissertation).
- Núñez Sánchez, S. D., & Ortiz Lemache, A. S. (2021). Diseño y construcción de un banco para diagnóstico de baterías utilizadas en vehículos híbridos y eléctricos, para el taller “Electromecánica Gamboa”.
- Peyré, F. R. (2020). 632. Aprovechamiento del litio en la Argentina–Realidades, desafíos y perspectivas en un mundo globalizado. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 24.
- Quintero, V. (2021). Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones. *I+D Tecnológico*, 17(1), 14-22. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/339/3392002003/html/index.html>
- Tong, S., Klein, M. P., & Park, J. W. (2015). On-line optimization of battery open circuit voltage for improved state-of-charge and state-of-health estimation. *Journal of Power Sources*, 293, 416-428.
- Villasol López, A., Díaz Santos, R., & Castro Fernández, M. (2023). Análisis de las potencialidades de un laboratorio para pruebas y homologación de baterías para vehículos eléctricos. *Ingeniería Energética*, 44(1), 132-142.