

# Nueva metodología para la estimación in situ del estado de salud de baterías para aplicaciones de ascensor



## New methodology to on-site estimate the state of health of batteries for elevator applications

Unai Iraola-Iriondo<sup>1</sup>, Argiñe Alacano-Loiti<sup>1</sup>, Iosu Aizpuru-Larrañaga<sup>1</sup>, Ander Goikoetxea-Arana<sup>1</sup>, Roberto Sánchez-Morán<sup>2</sup>, Iñigo Gil y Maitane Garmendia<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mondragon Unibertsitatea (EPS). Departamento de electrónica e informática. C/ Loramendi, 4 – 20500 Arrasate-Mondragón, Guipúzcoa (España).

<sup>2</sup> Orona S. Coop. Polígono Lastaola, s/n – 20120 Hernani, Guipúzcoa (España).

<sup>3</sup> IKERLAN. Pº J.M. Arizmendiarieta, 2 – 20500 Arrasate-Mondragón, Guipúzcoa (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9195> | Recibido: 04/04/2019 • Inicio Evaluación: 30/04/2019 • Aceptado: 05/06/2019

### ABSTRACT

• This paper presents a new method to determine the state of health or SOH of one or more batteries supplying an elevator. The proposed method permits an accurate estimation of the state of health or SOH of at least one single battery, without the need of extra elements in the regular architecture of an elevator, because some existing elements are used for this purpose. In order to achieve this objective, a partial discharge of the energy storage system is forced through the braking resistor of the elevator if the SOH of the battery has to be estimated, with a duty cycle less than a 100%, because the braking resistor is limited in its working temperature and it is not designed for continuous discharging. In the aforementioned discharging process the battery voltage, the current delivered by the battery to the braking resistor and the number of pulses done during the test are measured. Taking into account these measurements during the pulsed discharge an approximation of the available capacity within the battery is obtained. A previous characterization of the energy storage system in the laboratory permits to know the amount of pulses that the energy storage system under test has to supply in order to be considered suitable to continue operating the elevator. Thus, evaluating the amount of pulses given by the battery in situ in the real application and comparing it with the required minimum value obtained in the characterization in the laboratory, the SOH value of the energy storage system is estimated. This paper presents the whole methodology followed to reach this estimation.

• **Keywords:** Energy storage system, battery, elevator, SOH, braking resistor, partial discharge, duty cycle, pulsed discharge.

### RESUMEN

En este artículo, se presenta un método novedoso para la determinación del estado de salud (SOH, del inglés "State of Health") de una o más baterías de alimentación de un ascensor. El método propuesto permite una estimación precisa del estado de salud o SOH de al menos una batería, sin tener que añadir elementos adicionales en la arquitectura habitual del ascensor, ya que hace uso de varios elementos ya existentes. Para ello, se provoca la descarga parcial del sistema de almacenamiento (ESS, del inglés "Energy Storage System"), a través de la resistencia de frenado cada vez que se quiera comprobar su estado de salud, con un ciclo de trabajo menor del 100%, ya que la resistencia

de frenado disponible no está diseñada para sufrir descargas de trabajo continuas y podría fallar por temperatura. En dicho proceso de descarga se monitorizan la tensión de la batería, la corriente que se deriva desde la batería hacia el sistema de frenado y el número de pulsos de descarga realizados a dicha batería. A través de esta descarga pulsante del sistema de almacenamiento se obtiene un reflejo de la capacidad disponible en la misma. Una caracterización previa del sistema de almacenamiento en laboratorio permite saber cuál es la cantidad de pulsos mínima que tiene que dar el sistema de almacenamiento bajo test para considerarlo apto para seguir operando. Así, evaluando ese número de pulsos in situ en el sistema real y comparándolo con el mínimo necesario obtenido en la caracterización en laboratorio se obtiene el valor de SOH del sistema de almacenamiento del ascensor. Este artículo presenta la metodología completa desarrollada para conseguir esta estimación.

**Palabras clave:** Sistema de almacenamiento, batería, ascensor, SOH, resistencia de frenado, descarga parcial, ciclo de trabajo, descarga pulsante.

### 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, son muchas las aplicaciones en las que los sistemas de almacenamiento de energía y más concretamente las baterías son utilizadas. Hay muchas empresas, centros de investigación y universidades interesadas en mejorar las prestaciones de estos sistemas ya que son considerados clave en muchos sectores industriales en un futuro muy próximo. Las tecnologías más utilizadas son las de plomo ácido e ion-litio. Las aplicaciones más típicas cuando se habla de baterías son: electromovilidad, energías renovables, regulación de la red eléctrica, redes inteligentes o suministro de energía en áreas remotas. Su función puede variar entre ser la fuente principal de energía del sistema o actuar como apoyo del mismo. Dentro de la electromovilidad también se incluye la tracción vertical o la elevación, que es la aplicación que se estudia en el presente artículo.

Un ascensor en el ámbito residencial funciona de media entre 30 y 60 minutos al día y por tanto tiene un consumo de energía bajo. Sin embargo, es un sistema que en cada arranque consume una potencia relativamente elevada en función del número de personas que viajen en la cabina. Esto hace que el sistema tenga que estar preparado para dar esas altas potencias y en ascensores convencionales se necesita una acometida a red dimensionada a la

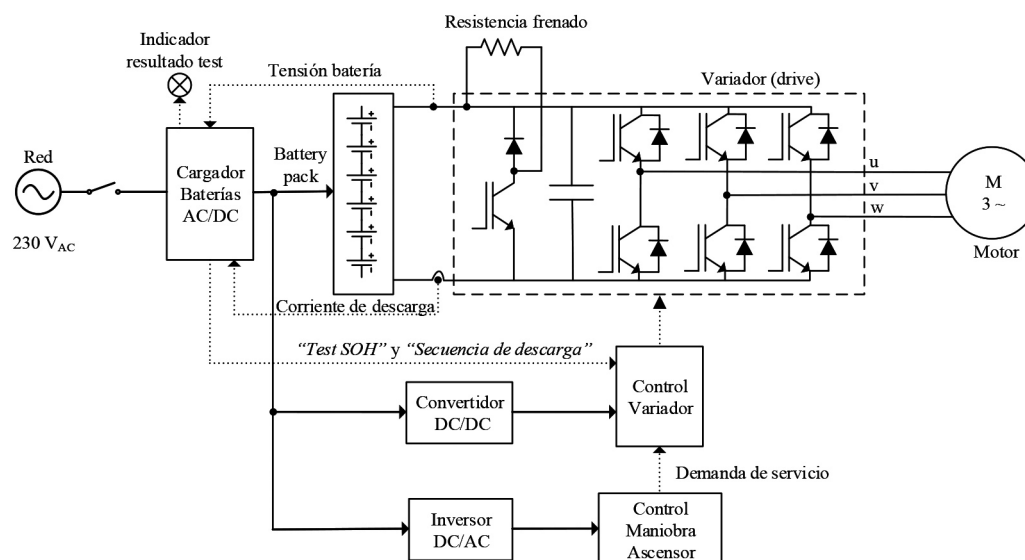


Figura 1: Esquema general de un ascensor con sistema de almacenamiento incorporado

potencia nominal del ascensor. De ahí surge la necesidad de incluir un sistema de almacenamiento en el ascensor, como pueden ser baterías, para que aporte la mayor parte de potencia demandada y poder así recortar la potencia contratada.

Los sistemas de almacenamiento de energía sirven para proporcionar los pulsos de potencia del sistema de tracción del ascensor y su carga se realiza mediante un cargador conectado a la red eléctrica de forma permanente y con una potencia limitada. De este modo se consigue desacoplar los pulsos de potencia de la aplicación de la red eléctrica de donde se consume una baja potencia constante de entre 500 y 1000 vatios.

El sistema de tracción de los sistemas de elevación está comprendido principalmente por un variador de tracción ("Variable Speed Drive" del inglés) que acciona un motor eléctrico. El variador de frecuencia está dividido en dos etapas; una etapa rectificadora (AC/DC) alimentada desde la red eléctrica, normalmente pasiva (rectificador a diodos) y una etapa inversora (DC/AC) conectada al motor eléctrico. Entre ambas, hay una etapa de corriente continua a la que se le denomina "bus DC". Los variadores tienen un elemento de seguridad conectado a ese bus DC para poder disipar en forma de calor la energía sobrante proveniente de las regeneraciones (durante viajes con carga a favor en los que hay que frenar el ascensor). Este mecanismo es la resistencia de frenado ("crowbar" del inglés).

La Figura 1 muestra un diagrama de bloques de un ascensor traccionado mediante baterías unidas al bus DC y conectado a la red a través de un cargador de baterías. En ella, se pueden apreciar los distintos elementos que componen el accionamiento mencionados anteriormente (pack de baterías, cargador de baterías, etapa DC, variador y motor). Tal y como se ha mencionado anteriormente, la tecnología de baterías más utilizada suele ser la de plomo ácido o ion-litio y de tensiones entre 48 y 400 voltios DC.

Además de cumplir con el objetivo de reducir la demanda de potencia, las baterías permiten que, ante un fallo en la red eléctrica, el ascensor continúe operando durante un determinado periodo de tiempo de forma normal a diferencia de un ascensor convencional en el que si la red eléctrica falla, el sistema entra en modo rescate y no puede continuar operando.

Así, en el accionamiento mostrado en la Figura 1, las baterías alimentan al sistema elevador y éstas a su vez son cargadas a través de un cargador AC/DC conectado a la red eléctrica. En

ausencia de la red eléctrica, el control de la maniobra del ascensor se alimentará a través de las baterías mediante un inversor DC/AC y un convertidor DC/DC alimentará el control del variador. Por lo tanto, el sistema quedará alimentado por las baterías completamente, pudiendo mantener la continuidad del servicio del ascensor.

Todas las baterías sufren una degradación a lo largo de su vida por diversas causas, como pueden ser el envejecimiento por el paso del tiempo debido a la degradación de sus materiales ("Calendar Life/Ageing" del inglés) o por el ciclado de éstas ("Cycling Ageing" del inglés). Debido a estos mecanismos de degradación, las baterías pierden capacidad de forma gradual, por lo que disminuye la energía disponible, y la resistencia interna de la batería aumenta, lo que conlleva una pérdida de prestaciones en términos de potencia y un aumento del calor generado (lo que a su vez acelera su degradación).

Los factores que afectan al envejecimiento de las baterías principalmente son:

- La temperatura de almacenamiento o de trabajo.
- El estado de carga al que almacenan energía (SOC, del inglés "State of Charge").
- La profundidad de descarga (DOD, del inglés "Depth of Discharge").
- La velocidad o tasa de carga/descarga.

Así pues, el conocimiento del SOH de una batería es sumamente importante para asegurar que la batería está en perfectas condiciones y que es capaz de alimentar la aplicación en la cual está instalada. Además, en caso de que la batería estuviera demasiado degradada, se podría sustituir, con lo que se aseguraría un funcionamiento fiable del sistema elevador. Además, el estado de salud se debe poder determinar con la batería instalada en el ascensor, sin necesidad de retirarla, llevarla a un laboratorio y testarla, ya que eso implicaría tiempo, que el ascensor tuviera que estar un cierto tiempo parado y un coste elevado, ya que mientras se testa habría que reemplazarla por otra batería.

Según la literatura, los métodos para determinar el estado de salud de una batería consisten en aplicar algoritmos o procesos a variables que se pueden medir y que están directamente relacionadas con el SOH como, por ejemplo, la tensión, la corriente o la temperatura. De hecho, estos algoritmos utilizan unos

modelos de batería concretos para poder estimar el SOH mediante las variables medidas u observadas. A continuación, se enumeran varios métodos para la estimación del estado de salud de baterías de plomo ácido e ion-litio:

- *"Equivalent full cycles to failure"*: este método calcula los amperios-hora (Ah) descargados a lo largo de la vida de la batería y lo compara con el número de Ah que indica el fabricante [1,2].
- *"Contaje de ciclos Rainflow"*: en este método se realiza el contaje de los ciclos de la batería a lo largo de su vida y se aplica una degradación a cada ciclo teniendo en cuenta su DOD [3,4].
- *Medida de capacidad y resistencia interna*: este método consta de dos medidas para estimar el envejecimiento de la batería. Por un lado realiza una descarga completa de la batería y cuenta los amperios-hora descargados para calcular su capacidad restante tras un cierto periodo de uso de la batería [5,6]. Por otro lado, a medida que se va descargando la batería se realizan medidas de impedancia interna para evaluar la evolución de la misma a medida que la batería se envejece.
- *"Open Circuit Voltage"*: este método relaciona la tensión de circuito abierto con el estado de salud de la batería, pudiéndose realizar tanto de manera online como offline [7–11]. Sin embargo, es necesario desconectar la batería y esperar un tiempo determinado en reposo (en baterías de plomo ácido hasta 2 horas) para poder realizar una correcta medición de la tensión.
- *Impedancia espectroscópica*: este método realiza micro pulsos de corriente a la batería a diferentes frecuencias para obtener la impedancia espectroscópica. Mediante dicha impedancia y haciendo una correlación entre valores de impedancia conocidos a diferentes estados de salud, se puede estimar el estado de salud actual de la batería [12–14] we have characterized single nickel metal hydride (NiMH). Sin embargo, la aplicación más común de este método es la obtención de los parámetros del modelo electroquímico de la batería.
- *Filtro de Kalman*: es un algoritmo empleado en la estimación de una característica interna y no medible directamente de un sistema dinámico. Sus mayores inconvenientes son el alto coste computacional que requiere, la complejidad del propio algoritmo y el esfuerzo de parametrización o caracterización. Además, requiere de una actualización de los parámetros característicos del sistema como, por ejemplo, la resistencia interna, la variación del SOH respecto a la temperatura, etc., a medida que éstos cambian con el uso o el tiempo [15–18].
- *Algoritmos de aprendizaje automático o "Machine learning"*: este tipo de métodos se basan en el aprendizaje iterativo, siendo capaces de adaptarse y aprender de su entorno. Entre éstos, destacan las Redes Neuronales Artificiales (RNA), "Support Vector Machine" (SVM) o los algoritmos evolutivos. Su gran inconveniente reside en la complejidad del algoritmo y en que requiere de grandes cantidades de datos históricos [19–21].

Teniendo en cuenta el estado del arte, en este trabajo se realiza una descarga parcial de capacidad para estimar el envejecimiento de la batería. La descarga parcial se puede realizar a través de diferentes elementos presentes en el ascensor como pueden ser los bobinados del motor de tracción, en los frenos, en la resistencia de frenado del ascensor o incluso se podría volcar energía en la

red eléctrica si se tuviera un convertidor regenerativo. En este trabajo se ha decidido realizar esta descarga parcial a través de la resistencia de frenado del ascensor y así, no se necesitará incluir otro elemento pasivo en el sistema, evitando el coste asociado al mismo. La descarga parcial se realizará con el ascensor operativo y priorizando la continuidad de servicio, en periodos en los cuales se sabe que la cantidad de viajes demandados es menor, por ejemplo, por la noche. La novedad reside en realizar la medida sin desconectar la batería del sistema y en utilizar un elemento ya presente en el ascensor para realizar la descarga parcial.

La descarga parcial deberá realizarse en el menor tiempo posible, ya que el hecho de descargar la batería para hacer la estimación de SOH hace que la batería esté más descargada para atender viajes de los usuarios del ascensor. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la resistencia de frenado tiene una capacidad de disipar energía limitada en un tiempo dado y por tanto el ciclo de trabajo no podrá ser del 100%, ya que la temperatura de la resistencia de frenado excedería su límite permitido. El valor del ciclo de trabajo ha sido definido al 20% con un periodo de 100 segundos por pulso de corriente aplicado por ser un ciclo similar al que se realiza en la aplicación. Al finalizar la estimación de SOH se procederá a cargar la batería de nuevo a la mayor brevedad posible. En el sistema que se presenta en este artículo, el cargador conectado a red es el encargado de dar las órdenes al variador del ascensor para descargar energía a través de la resistencia de frenado mediante una señal digital. En el siguiente apartado se procede a explicar detalladamente el método de detección de SOH de una batería para un ascensor, brevemente explicado en este párrafo. Cabe destacar que actualmente no existen artículos de referencia en los que se propongan métodos de detección del SOH en baterías para aplicaciones de ascensor y por tanto se considera muy novedoso el método aquí propuesto. La aplicación de ascensor es muy peculiar y este método propuesto aquí consigue hacer frente a esas peculiaridades sin que el funcionamiento normal del ascensor se vea afectado.

## 2. SISTEMA DE ESTIMACIÓN DE SOH PARA BATERÍAS DENTRO DEL ASCENSOR

### 2.1. HARDWARE Y SEÑALES NECESARIAS

En la detección del estado de salud de la batería que alimenta el ascensor participan tres elementos fundamentales que aparecen en la Figura 1, como son el cargador de baterías, el variador y el sistema de almacenamiento o batería.

Cargador de baterías: en este caso de estudio, el algoritmo de identificación de estado de salud de baterías está implementado en el cargador de baterías, aunque podría ser en cualquier otro dispositivo como la maniobra del ascensor, el propio variador, etc. El cargador de baterías es el que envía las órdenes al variador para que



Figura 2: Señales que el cargador de baterías envía al variador del ascensor para que descargue la batería de manera pulsante

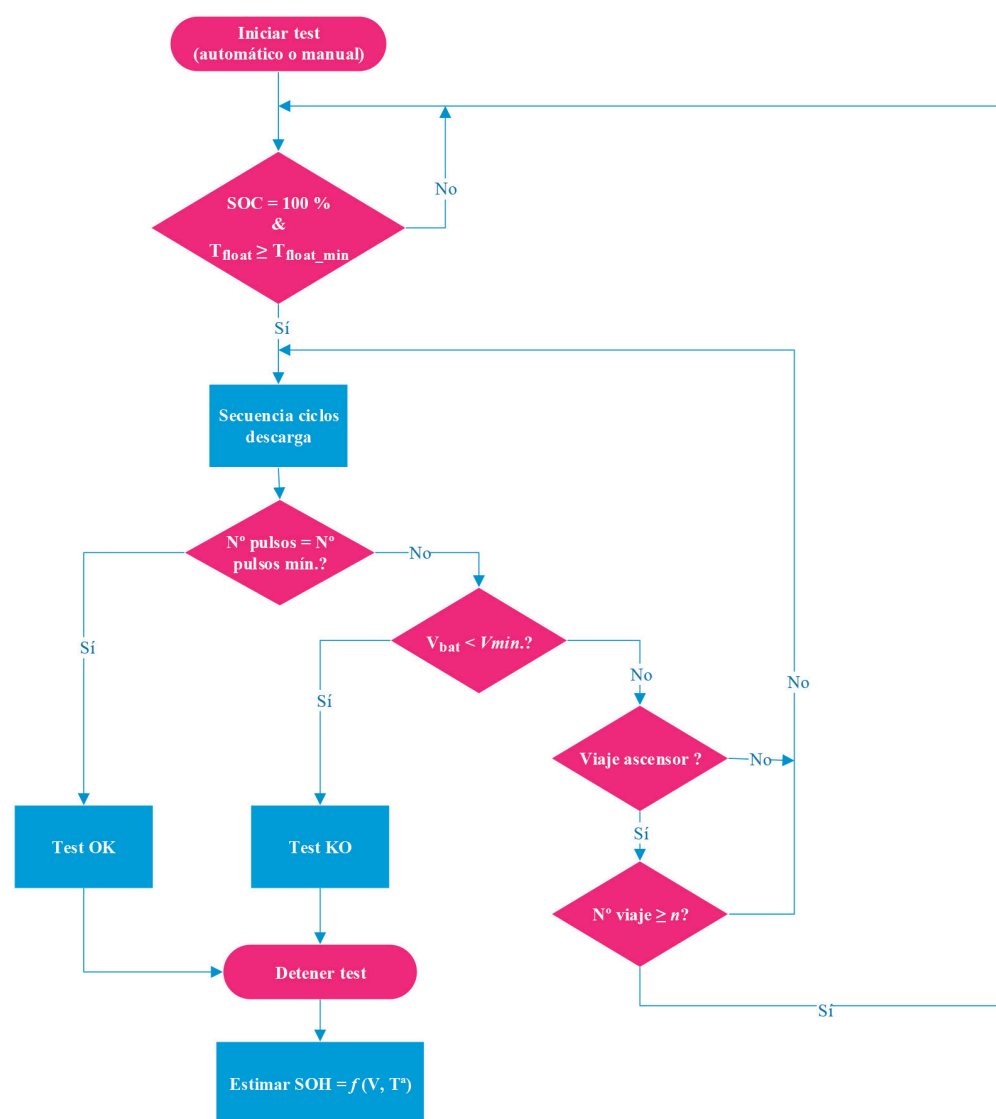


Figura 3: Diagrama de flujo del algoritmo de estimación de SOH desarrollado

conecte la resistencia de frenado a la batería si se dan las condiciones para realizar la descarga a través de dos señales llamadas "Test SOH" y "Secuencia de descarga", mostradas en la Figura 2. Como se puede observar, una de las señales se mantiene activa durante todo el test de estimación de SOH, mientras que la otra es la encargada de marcar el periodo de la descarga pulsante y el ciclo de trabajo.

## 2.2. ALGORITMO IMPLEMENTADO EN EL CARGADOR DE BATERÍAS

A continuación, se detalla el algoritmo implementado en el cargador de baterías para realizar la estimación de SOH. Es conveniente aclarar que el test sólo se inicia si el nivel de carga de las baterías es muy cercano al 100%. Por ello, el test se iniciará sólo después de que la batería haya estado al menos un tiempo mínimo predeterminado en carga de flotación, el cual dependerá del tipo concreto de batería. En el caso de un sistema de almacenamiento con baterías de plomo ácido, se aplica un valor cercano a 2 horas desde que se alcanza la tensión de flotación del sistema. La Figura 3 muestra un diagrama de bloques del algoritmo implementado, donde "SOC" es el estado de carga de la batería, " $T_{float}$ " y " $T_{float\_min}$ " son el tiempo que la batería lleva en flotación y el mínimo requerido para iniciar el test, " $V_{bat}$ " es la tensión de la batería, " $V_{min}$ " es la tensión umbral de batería para finalizar el ensayo y  $n$  es el nú-

mero de viajes permitidos para interrumpir el test.

Si durante la descarga de la batería, el sistema recibe una demanda de servicio (demanda de viaje), se detiene el test y, una vez atendido el servicio demandado, se reanuda la secuencia de ciclos de descarga para la estimación de SOH. Sin embargo, si dentro del mismo ensayo de estimación de SOH se interrumpe el test varias veces ( $n$ ) debido a una demanda de viaje, el test se da por nulo ya que el resultado podría quedar alterado. La secuencia se deberá comenzar de nuevo desde el principio, es decir, cargar completamente la batería, esperar el tiempo en flotación y volver a comenzar los ciclos pulsantes de descarga.

Además del algoritmo, es necesario explicar cómo se determina el SOH de la batería que se está analizando y en el peor de los casos si se detecta un SOH muy bajo, cómo se toma la decisión de reemplazar la batería en la aplicación de ascensor. Para ello, hay un trabajo de caracterización previo en laboratorio de la batería instalada en el ascensor real, explicado a continuación.

En primer lugar, se caracterizan varios grupos de baterías del mismo tipo (tecnología, capacidad, tensión...) pero con diferente nivel de degradación que se van a instalar en la aplicación real.

Uno de ellos no se degrada en el laboratorio (SOH1), mientras que los otros tres son degradados de manera controlada aplicando ciclos reales de aplicación hasta alcanzar diferentes niveles de SOH. El grupo con la referencia  $SOH_{min}$  se degrada hasta el SOH mínimo en el que se quiere reemplazar la batería que tracciona el ascensor (ver Tabla 1). Para conocer el estado de salud o SOH de estos grupos de baterías, se mide su capacidad a 25°C y se compara con la capacidad inicial de la batería.

Una vez que se tienen los diferentes grupos de baterías degradados a diferentes niveles de SOH, se realizan dos ensayos:

- Al grupo de baterías  $SOH_{min}$  se le aplica una descarga pulsante de periodo 100 segundos y ciclo de trabajo del 20%, el mismo que se les aplica a las baterías una vez que están instaladas en el ascensor, hasta que alcancen una tensión  $V_{min}$  definida por la aplicación. El mismo ensayo se realiza a diferentes temperaturas, en este caso a 15, 25 y 35°C y se obtiene la cantidad de pulsos que es capaz de dar ese grupo de baterías a diferentes temperaturas, tal y como se puede observar en la Tabla 1, definiendo así el caso límite de la aplicación o el peor caso.
- En segundo lugar, con el resto de grupos de baterías, de las cuales se sabe que están menos degradadas, se realiza una

| SOH de la batería | Capacidad a 25°C | Número de pulsos a 15°C hasta Vmin | Número de pulsos a 25°C hasta Vmin | Número de pulsos a 35°C hasta Vmin |
|-------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| SOH_min           | Cap_SOH_min      | Pulsos_15°C                        | Pulsos_25°C                        | Pulsos_35°C                        |

Tabla 1: Caracterización previa realizada en laboratorio para el battery pack con un SOH mínimo en el que se requiere reemplazar la batería

| SOH de la batería | Capacidad a 25°C | Tensión mínima tras Pulsos_15°C a 15°C | Tensión mínima tras Pulsos_25°C a 25°C | Tensión mínima tras Pulsos_35°C a 35°C |
|-------------------|------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| SOH1              | Cap_SOH1         | Vmin_SOH1_15°C                         | Vmin_SOH1_25°C                         | Vmin_SOH1_35°C                         |
| SOH2              | Cap_SOH2         | Vmin_SOH2_15°C                         | Vmin_SOH2_25°C                         | Vmin_SOH2_35°C                         |
| SOH3              | Cap_SOH3         | Vmin_SOH3_15°C                         | Vmin_SOH3_25°C                         | Vmin_SOH3_35°C                         |

Tabla 2: Caracterización previa realizada en laboratorio para diferentes baterías a diferentes SOH

descarga pulsante a diferentes temperaturas. En este caso, el ensayo se detiene una vez que la batería ha realizado el número de pulsos obtenido con el grupo de baterías SOH\_min (Pulsos\_15°C, Pulsos\_25°C, Pulsos\_35°C). De esta manera, se obtiene la tensión mínima que alcanza cada grupo de baterías tras realizar un mínimo de pulsos necesario para no ser reemplazada, tal y como se puede observar en la Tabla 2.

De este modo, se consigue tener una base de datos de grupos de baterías y su comportamiento para diferentes temperaturas y niveles de SOH que se comparara con el resultado obtenido del test SOH para la batería instalada en la aplicación real.

Por lo tanto, en una aplicación real y de manera automática mediante el cargador de baterías, se realizarán los siguientes pasos para estimar el SOH de la batería bajo test:

- El cargador mide la temperatura de la batería.
- El cargador define un número de pulsos mínimos en función de la temperatura interpolando linealmente valores entre Pulsos\_15°C y Pulsos\_25°C para temperaturas entre 15 y 25°C y entre Pulsos\_25°C y Pulsos\_35°C para temperaturas entre 25 y 35°C.
- A continuación, comienza a ejecutar el algoritmo de SOH con el objetivo de realizar el número de pulsos mínimo que ha definido.
- Como resultado se obtiene que:
  - Si la batería bajo test consigue dar el número de pulsos mínimo sin llegar a la tensión Vmin definida en la caracterización de laboratorio, el resultado del test es satisfactorio, no es necesario reemplazar la batería y se procede a estimar el SOH de la batería. Para ello, se observa la tensión mínima a la que ha llegado la batería bajo test durante el ensayo realizado. Una vez más, mediante interpolaciones lineales con los valores de la Tabla 2 se



Figura 4: Banco de ensayos de laboratorio que emula un ascensor real para testeo de algoritmo de SOH

- estima el valor de SOH aproximado, teniendo en cuenta la temperatura a la que se ha realizado el ensayo y la tensión mínima alcanzada.
- Si la batería bajo test alcanza el valor de tensión Vmin antes de realizar el número de pulsos mínimo calculado por el cargador al inicio del ensayo, significa que la batería bajo test está más degradada que la batería SOH\_min caracterizada en laboratorio y, por tanto, tiene que ser reemplazada.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos en un banco de ensayos para emulación de ascensores. Las baterías empleadas en los ensayos son de plomo ácido y de 12 voltios nominales (6 celdas de 2 voltios), aunque en la aplicación real podría ser un battery pack de más tensión (48 V, 72 V, etc.).

La Figura 4 muestra el banco de ensayos utilizado para la obtención de los resultados que se muestran en la Figura 5. Este banco de ensayos contiene todos los elementos que se pueden ver en la Figura 1. Sin embargo, para emular el comportamiento del ascensor real incluye un motor enfrentado al motor de tracción capaz de ejercer el par de carga que se ejercería en una instalación real.

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos

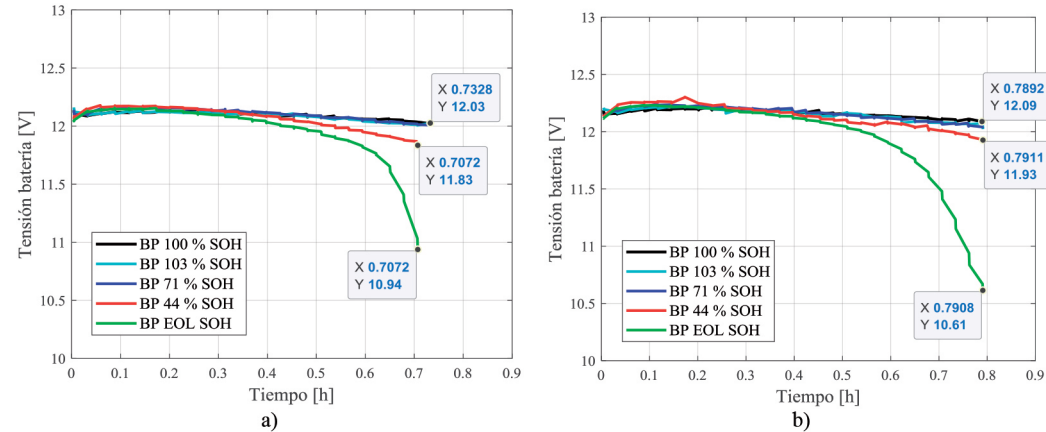


Figura 5: Resultados de 4 grupos de batería después de pasar el test de SOH; a) Resultados de los ensayos a 15°C; b) Resultados de los ensayos a 25°C

para diferentes grupos de baterías testeados en la bancada de laboratorio mencionada anteriormente. Se han realizado ensayos a 5 grupos de baterías diferentes a diferentes temperaturas de trabajo (15°C y 25°C). La imagen de la izquierda muestra los resultados a 15°C y la imagen de la derecha muestra los resultados a 25°C. Como se puede observar, el algoritmo ha sido capaz de detectar el grupo de baterías degradado y lo ha catalogado como BP EOL (*Battery Pack End of Life*) para ambas temperaturas por llegar a la tensión  $V_{min}$  en ambas temperaturas. Para el resto de grupos de baterías, ha estimado un SOH dependiendo de la tensión final que ha medido al finalizar el test de SOH. Así, ha definido una batería como BP 44% SOH en una batería que en laboratorio se había degradado hasta un SOH del 50%, otro como BP 71% para una batería que tiene un SOH del 75% y otros dos grupos los ha clasificado como nuevos con valores de SOH mayores o iguales al 100%. En este último caso, los battery packs eran prácticamente nuevos y ambos tenían un SOH mayor al 90%.

Evidentemente, ninguno de los grupos de baterías que se han testado son nuevos, pero dos de ellos sí están cerca de serlo, de lo que se deduce que el algoritmo se vuelve impreciso para estados de salud poco degradados ya que se pierde la resolución en tensión. A medida que el grupo de baterías está más envejecido, el algoritmo es mucho más preciso, ya que la caída de tensión al finalizar el ensayo es mucho más evidente, como en el caso de SOH = 44%. Comparando los valores a diferentes temperaturas, se observa una coherencia con la literatura, ya que a mayor temperatura mayor es la eficiencia de las baterías y se observa cómo las tensiones finales son mayores a 25°C.

## 5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el objetivo principal del artículo, que es presentar y demostrar una metodología para estimar el estado de salud en baterías para aplicaciones de ascensor, se considera que el objetivo ha sido cumplido satisfactoriamente a tenor de los resultados obtenidos. El sistema propuesto es capaz de detectar baterías degradadas en una aplicación de ascensor. Además, el algoritmo nunca interrumpe el funcionamiento normal del ascensor y atiende las llamadas de los usuarios del mismo, aspecto indispensable para esta aplicación.

Una de las conclusiones positivas obtenidas de este análisis es el hecho de conseguir el objetivo descrito en el punto anterior sin necesidad de incluir sistemas adicionales para realizar la estimación del SOH ya que se utiliza la propia resistencia de frenado. Este aspecto es innovador a tenor de la bibliografía analizada, ya que no existen artículos de referencia que analicen esta temática para la aplicación descrita.

En cuanto a los resultados obtenidos se refiere, se han obtenido buenos resultados cuando los grupos de batería analizados tienen un SOH menor al 50%, que es donde debe ser más preciso. Con estos niveles de degradación, el algoritmo es capaz de detectar de manera más precisa el valor de SOH porque la tensión del grupo de baterías baja considerablemente si se compara con los grupos de baterías más nuevas. De ahí se han obtenido errores entre el 4% y 6% para valores de SOH entre el 40 y el 70% y errores de casi el 10% para baterías con SOH cercano al 90%.

Otra de las conclusiones importantes es que para poder aplicar este algoritmo es importante realizar una buena caracterización de la batería en laboratorio antes de poder estimar su SOH. Los ensayos de caracterización son largos en el tiempo dependiendo del número de grupos de baterías que se quieran caracterizar y dependiendo también de la capacidad nominal de las mismas, ya

que cuanto mayor sea la capacidad, mayor es el tiempo que se tarda en realizar cualquier ensayo. Por lo tanto, con cada modelo o tipo de batería diferente, será necesario realizar dicha caracterización y adecuar los parámetros del algoritmo correspondientes.

## REFERENCIAS

- [1] R. Dufo-López, J. M. Lujano-Rojas, and J. L. Bernal-Agustín, "Comparison of different lead-acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems," *Appl. Energy*, vol. 115, pp. 242-253, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.021>
- [2] H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager, J. F. Manwell, U. Abdulwahid, and I. Baring-Gould, *Lifetime modelling of lead acid batteries*. 2005.
- [3] Y. Shi, B. Xu, and B. Zhang, "Optimal Battery Control Under Cycle Aging Mechanisms," 2017.
- [4] M. Chawla, R. Naik, R. Burra, and H. Wiegman, "Utility energy storage life degradation estimation method," in *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply*, 2010, pp. 302-308. <https://doi.org/10.1109/CITRES.2010.5619790>
- [5] K. Ng, Y. Huang, C. Moo, and Y. Hsieh, "An enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries," in *INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference*, 2009, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/INTELEC.2009.5351796> PMID:PMC3737996
- [6] 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. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.021>
- [7] Y. Xing, W. He, M. Pecht, and K. L. Tsui, "State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures," *Appl. Energy*, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.008>
- [8] C. Weng, J. Sun, and H. Peng, "A unified open-circuit-voltage model of lithium-ion batteries for state-of-charge estimation and state-of-health monitoring," *J. Power Sources*, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.026>
- [9] A. Marongiu, F. G. W. Nußbaum, W. Waag, M. Garmendia, and D. U. Sauer, "Comprehensive study of the influence of aging on the hysteresis behavior of a lithium iron phosphate cathode-based lithium ion battery - An experimental investigation of the hysteresis," *Appl. Energy*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.086>
- [10] M. Berecibar, M. Garmendia, I. Gandiaga, J. Crego, and I. Villarreal, "State of health estimation algorithm of LiFePO4 battery packs based on differential voltage curves for battery management system application," *Energy*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.163>
- [11] M. Berecibar et al., "SOH Estimation and Prediction for NMC Cells Based on Degradation Mechanism Detection," in *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2015 - Proceedings*, 2015. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2015.7353020>
- [12] M. Galeotti, C. Giammanco, L. Cina, S. Cordiner, and A. Di Carlo, "Diagnostic methods for the evaluation of the state of health (SOH) of NiMH batteries through electrochemical impedance spectroscopy," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2014. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864861>
- [13] H. Shabbir, W. Dunford, and T. Shoa, "State of health estimation of Li-ion batteries using Electrochemical Impedance Spectroscopy," in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2017, pp. 108-112. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2017.7993255>
- [14] T. T. Nguyen, V. L. Tran, and W. Choi, "Development of the intelligent charger with battery State-Of-Health estimation using online impedance spectroscopy," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2014.
- [15] J. Kim, S. Lee, and B. H. Cho, "Complementary Cooperation Algorithm Based on DEKF Combined With Pattern Recognition for SOC/Capacity Estimation and SOH Prediction," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 436-451, 2012. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2158554>
- [16] B. Mo, J. Yu, D. Tang, H. Liu, and J. Yu, "A remaining useful life prediction approach for lithium-ion batteries using Kalman filter and an improved particle filter," in *2016 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*, 2016, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICPHM.2016.7542847> PMID:PMC5124528
- [17] J. Kim and B. H. Cho, "State-of-Charge Estimation and State-of-Health Prediction of a Li-Ion Degraded Battery Based on an EKF Combined With a Per-Unit System," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 4249-4260, Nov. 2011. <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2168987>
- [18] G. Pérez, M. Garmendia, J. F. Reynaud, J. Crego, and U. Viscarret, "Enhanced closed loop State of Charge estimator for lithium-ion batteries based on Extended Kalman Filter," *Appl. Energy*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.063>
- [19] A. Veeraraghavan, V. Adithya, A. Bhawe, and S. Akella, "Battery aging estimation with deep learning," in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, 2017, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ITEC-India.2017.8333827>
- [20] H. Lin, T. Liang, and S. Chen, "Estimation of Battery State of Health Using Probabilistic Neural Net