

Analysis of the factors involved in the premature aging of lithium-ion batteries using a theoretical model validated in the laboratory

Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo teórico validado en laboratorio

H.A. Pico¹

I.P. Pazmiño²

E.B. Ponce²

¹Corporación Nacional de Electricidad (CNEL EP) Unidad de Negocio Manabí, Manta, Ecuador

E-mail: hugo.pico@cnel.gob.ec

²Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), Manabí, Ecuador

E-mail: ivan.pazmino@uleam.edu.ec; bernardo.ponce@uleam.edu.ec

Abstract

This article presents a quantitative analysis of the variables that affect the premature aging of lithium-ion batteries.

For this purpose, first the validation of a theoretical model developed in Matlab-Simulink is carried out by comparing the behavior of its parameters of interest with respect to a real system implemented in the laboratory. For this, parameters such as the characteristics of the cells and the environmental conditions are considered in both cases.

Subsequently, once the simulation tool has been validated, load and unload cycles are performed on the model implemented in Matlab-Simulink. As part of the process, tests are carried out considering different temperatures, charge / discharge rates, and different discharge depths, with the aim of determining the impact of these parameters on the useful life of lithium-ion batteries.

The final section of the document presents the results of the experiment where, among other aspects, the influence of ambient temperature on the deterioration of lithium-ion batteries, as well as the impact of a charge / discharge process of cells studied with high levels of electrical current.

Index terms— Lithium-ion batteries, simulations, theoretical model, premature aging of cells.

Resumen

Este artículo presenta un análisis cuantitativo de las variables que repercuten en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio.

Para este cometido, primero se realiza la validación de un modelo teórico desarrollado en Matlab-Simulink mediante la comparación del comportamiento de sus parámetros de interés respecto a un sistema real implementado en laboratorio. Para ello se consideran parámetros como las características de las celdas y las condiciones ambientales en ambos casos.

Posteriormente, una vez validada la herramienta de simulación, se realizan ciclos de carga y descarga en el modelo implementado en Matlab-Simulink. Como parte del proceso se realizan pruebas considerando diferentes temperaturas, tasas de carga/descarga, y diferentes profundidades de descarga, esto con el objetivo de determinar la repercusión de estos parámetros en la vida útil de las baterías de ion-litio.

En la sección final del documento se presentan los resultados del experimento donde se expone, entre otros aspectos, la influencia de la temperatura ambiente en el deterioro de las baterías de ion-litio, así como, el impacto de un proceso de carga/descarga de las celdas estudiadas con altos niveles de corriente eléctrica.

Palabras clave— Baterías de ion-litio, simulación por computadora, modelo teórico, envejecimiento prematuro de celdas.

Recibido: 30-10-2020, Aprobado tras revisión: 11-01-2021

Forma sugerida de citación: Pico, H.; Pazmiño, I.; Ponce, E. (2021). "Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo teórico validado en laboratorio". Revista Técnica "energía". No. 17, Issue II, Pp. 83-91

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2021 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



1. INTRODUCCIÓN

El compromiso mundial de reducir significativamente las emisiones de carbono en el corto plazo ha propiciado el desarrollo de tecnologías sustentables en términos ambientales, como los vehículos eléctricos, por ejemplo. Para su desarrollo uno de los elementos clave desde sus inicios han sido los sistemas de almacenamiento de energía. En este sentido, una variedad de baterías recargables ahora está disponible en los mercados mundiales [1].

Las celdas de ion-litio se consideran las mejores entre todos los tipos de baterías debido a sus características y rendimiento superiores. Los impactos ambientales positivos asociados a su uso, principalmente su potencial de reciclaje, ha influido en el interés de nuevas investigaciones para mejorar las tecnologías inherentes a su desarrollo [2].

Este tipo de baterías se han vuelto muy populares debido principalmente a su significativa reducción de precios y al peso ligero con alta densidad de potencia. Sin embargo, la gestión de los procesos de carga y descarga, la influencia de su temperatura de operación, y los procesos de reciclaje y restauración aún no se han resuelto satisfactoriamente. Es por ello que en este trabajo se aborda una de las aristas de esta problemática, centrándose en los factores asociados con el envejecimiento de las celdas constitutivas de un sistema de almacenamiento, lo cual está inherentemente relacionado a la gestión de los procesos de carga y descarga, y la influencia de su temperatura de operación [3].

En este sentido resulta menester validar en laboratorio un modelo desarrollado por el autor [4] en Matlab-Simulink®, dado que el disponible actualmente en las librerías de este software, no incorpora la dinámica asociada a su envejecimiento. Esto se logrará a través de la cuantificación y contraste de las variables de interés empleando un sistema real implementado en laboratorio a fin de ofrecer al estado del arte, la evidencia teórico-práctica necesaria para el uso de dicho modelo en futuras investigaciones.

2. FUNDAMENTOS

Una celda electroquímica es un dispositivo que permite generar energía eléctrica mediante reacciones químicas a través de dos electrodos denominados ánodo y cátodo, los mismos que están inmersos en una disolución conductora conocida como electrolito [5].

Las baterías según su reversibilidad en el proceso electroquímico se clasifican en primarias y secundarias [6].

Las primarias son las que usualmente se las conoce como pilas “no recargables” y fue inventada por Alessandro Volta en el año 1800, en cambio las baterías secundarias son las conocidas como pilas “recargables”

y fue inventada por el físico francés Gastón Plante en 1859, cuando desarrolló el primer acumulador de plomo-ácido [6].

En los últimos años la preocupación sobre el cambio climático, ha obligado a los gobiernos a llevar adelante estrategias para tratar de frenar la contaminación producida por los gases de efecto invernadero, estas acciones consisten en incrementar la generación de energías limpias, así como incentivar la movilidad eléctrica. [7].

Es por esta razón que las baterías hoy se presentan como una posible solución para almacenar los excedentes en la generación de energías renovables, para utilizarlos en períodos de demanda máxima, así mismo se está apostando al uso masivo en vehículos eléctricos, pero en este último aun es necesario que se garantice mayor autonomía de recorrido y durabilidad de las celdas secundarias [8].

Existen diferentes investigaciones respecto al estudio de baterías recargables, pero en la actualidad la de mayor aplicación práctica es la de ion-litio, ya que presenta características muy importantes comparadas con otras tecnologías como se observa en la Fig. 1 y tabla 1.

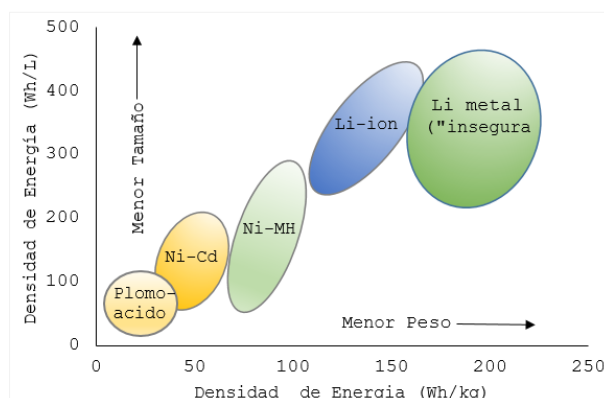


Figura 1: Densidad de energía gravimétrica y volumétrica de diferentes tipos de tecnología de baterías recargables [9]

De la Fig. 1, se puede apreciar que la batería de ion-litio presenta menor volumen y peso, lo que la hace atractiva para ciertas aplicaciones donde estas variables son sensibles, como es en el caso de vehículos eléctricos, teléfonos móviles entre otros.

Otra ventaja de las celdas de ion-litio, es que durante el modo espera presenta una autodescarga muy baja, a esto se suma el número de ciclos elevados y otras características que se muestran en la Tabla 1, que permite tener una idea del porqué esta la tecnología es la más utilizada en la actualidad.

Se tiene que tener en cuenta que, para aplicaciones como la tracción de vehículos eléctricos, las baterías de ion-litio deben contar con un dispositivo electrónico de gestión “Battery Management System” (BMS) que controle las variables internas de las celdas referidas, esto para evitar sobrecargas y temperaturas elevadas que

pueden repercutir en el envejecimiento prematuro de las mismas [10], entiéndase como tal al deterioro irreversible no compensable en el proceso de carga.

Tabla 1: Características de tecnologías de baterías recargables [9]

Tipo de Batería	Plomo-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Densidad de Energía (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	110-160
Densidad de Potencia	180	150	250-1000	1800
Voltaje Nominal (V)	2	1,25	1,25	3,6
Temperatura de funcionamiento (°C)	60	(-20) -60	(-20)-60	(-20)-60
Ciclo de Vida	200-300	1500	300-500	500-1000
Eficiencia de Carga (%)	79	-	-	100
Eficiencia Energética (%)	70	60-90	75	80
Tolerancia de Sobrecarga	Alta	Moderado	Baja	Muy Baja
Autodescarga	Baja	Moderado	Alta	Muy Baja
Estabilidad Térmica	Menos estable	Menos estable	Menos estable	Más estable

Además, las celdas de ion-litio para alargar su vida útil deben funcionar en ciertos rangos de tensión que será indicado por el fabricante; por ejemplo, puede presentar un límite máximo de funcionamiento de 4,2 V y un límite mínimo de funcionamiento de 2,7 V; si opera fuera de los límites sugeridos puede sufrir daños considerables. Para el caso descrito la batería debería funcionar normalmente en 3,7 V [11].

Así mismo es importante indicar que las baterías de ion-litio presentan problemas que aceleran su envejecimiento cuando son sometidas a desvíos bruscos de temperaturas, ya sean estos muy frío o calientes. Aunque hay que manifestar que las celdas de ión-litio pueden trabajar a una temperatura crítica de hasta 65 °C, pero a temperaturas muy bajas (debajo de 0 °C), pueden presentar bajo rendimiento producto de la desaceleración de las reacciones químicas internas; además si se trata de realizar la carga de las celdas de ion-litio a la fuerza a temperaturas extremadamente bajas puede producirse un cortocircuito interno, causado por una solidificación o cristal metálico provocado por el litio que se deposita en el ánodo [12].

Generalmente no se lleva a estas temperaturas críticas, porque en tecnologías como los vehículos eléctricos cuentan con elementos que permiten calentar o enfriar las baterías.

En lo que corresponde a la velocidad de carga, las celdas se pueden cargar según el requerimiento deseado, esto es: en forma lenta o convencional (10 A); carga semirápida (16 o 32 A); carga rápida con CA (43 kW en 30 minutos, al 80 % de la capacidad de la batería); y carga rápida con CC (50 kW en unos 20-25 minutos, al 80 % de la capacidad de la batería).

En este artículo se analizarán los factores principales que repercuten en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio, como son: Temperatura ambiente, velocidad de carga-descarga, profundidad de descarga y números de ciclos (1 ciclo se interpreta como el proceso de carga y descarga) [13]. Estas variables se simularán a través de un modelo teórico validado con ensayos de laboratorio, y se estudiarán varios escenarios.

3. METODOLOGÍA

El trabajo consiste en validar un modelo teórico de envejecimiento de baterías desarrollado en Matlab-Simulink® por el autor [4], a través de datos obtenidos de laboratorios a partir de ensayos realizados en la instalación de ciclados de baterías existente en la “Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales” (ETSII), de la “Universidad Politécnica de Madrid”.

Una vez validado el modelo teórico en referencia, se procederá a realizar varias simulaciones de situaciones, que repercuten en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio, considerando que el modelo permite modificar varias variables, para analizar escenarios teniendo en cuenta los números de ciclos, profundidad de descarga, corriente de carga y descarga y temperatura ambiente.

3.1. Modelo de una batería de ion-litio

El objetivo de analizar el modelo teórico de una batería, es poder obtener a través de él, las características externas y las variables de estado interna, con las que se podrá desarrollar un modelo matemático que permitirá estudiar el comportamiento de las celdas de ion-litio y los factores que repercuten en su envejecimiento prematuro [14].

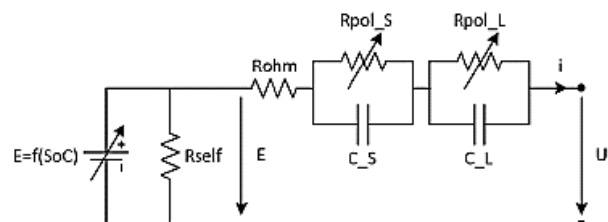


Figura 2: Modelo simplificado de una batería de ion-litio [15]

En la Fig. 2, se presenta una simplificación del modelo de una batería de ion-litio, en donde se observa: Una tensión (U) que es controlada por una fuente de tensión variable (E); la resistencia conectada en paralelo (R_{self}) que representa las pérdidas provocadas por la autodescarga; la resistencia en serie (R_{ohm}) que representa

la resistividad del material y contactos; esta última resistencia no depende de la corriente, pero sí de la temperatura, aumentando con la misma.

Así mismo se detalla la resistencia de polarización (R_{pol}) que se produce por la movilidad de los iones y la conductividad del electrolito, R_{pol} depende de la corriente y temperatura, disminuyendo con las variables referidas. Se debe considerar que las dos resistencias de polarización mostradas en la Fig. 2 se incluyen para un mejor ajuste del modelo, ya que la tensión de descarga en su desarrollo dinámico se representa mejor con constantes de tiempo diferentes, como son la rápida (short S) y la lenta (long L). Finalmente, R_{pol_L} , R_{pol_S} , C_S y C_L , representan la capacidad y respuesta dinámica de la batería.

3.2. Ecuaciones del modelo teórico

Para la elaboración del modelo teórico en Matlab-Simulink® se tomaron en consideración las siguientes formulaciones, que sirvieron para calcular las variables de las baterías que repercuten en los parámetros eléctricos y térmicos de las celdas.

3.2.1 Modelo eléctrico

Para el diseño del modelo se tomaron en consideración las siguientes formulaciones:

$$E = f(SoC) = E_0 - K \cdot Q_{MAX} \cdot \left(\frac{100}{SoC} - 1 \right) + A \cdot e^{-BQ_{MAX} \cdot \left(1 - \frac{SoC}{100} \right)} \quad (1)$$

$$R_{pol, \text{descarga}} = f(SoC) = K \cdot \frac{100}{SoC} \quad (2)$$

$$R_{pol, \text{carga}} = f(SoC) = K \cdot \frac{1}{1.1 - \frac{SoC}{100}} \quad (3)$$

$$U = E - (R_{OHM} + R_{pol}) \cdot i \quad (4)$$

Donde i , E , E_0 representan la corriente de la batería, la tensión en bornes de la celda y la tensión a circuito abierto respectivamente; mientras que K es una constante de la resistencia de polarización. Así mismo Q_{MAX} es la capacidad máxima de la batería, y la tensión exponencial y capacidad exponencial vienen dadas por A y B , finalmente el estado de carga se presenta por SoC .

3.2.2 Modelo térmico:

De igual forma para representar la generación de calor en el modelo, se incluyeron las siguientes ecuaciones:

$$H = (E_0 - E) \cdot i + T \frac{dE}{dT} \cdot i + (R_{OHM} + R_{POL}) \cdot i^2 \quad (5)$$

$$E_0 = E_0(T_0) + \frac{dE}{dT} (T - T_0) \quad (6)$$

$$Q_{MAX}(T) = Q_{MAX}(T_0) + \frac{dQ}{dT} (T - T_0) \quad (7)$$

$$K(T) = R_{OHM}(T_0) \cdot e^{\alpha \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (8)$$

$$R_{OHM}(T) = R_{OHM}(T_0) \cdot e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (9)$$

Donde H y T son el calor generado y la temperatura de la celda respectivamente.

Se puede considerar como dato aproximado, que la temperatura interna (T) y la generación de calor de la batería, es uniforme.

Las celdas se pueden conectar en serie o paralelo, eso depende de lo que se requiera obtener de las baterías. El modelo en referencia considera solo la conexión en serie y se justifica debido a que es muy poco realista que se conecten en paralelo según las aplicaciones actuales, aunque se podría dar el caso.

Si el lector necesita mayor detalle del modelo teórico para el envejecimiento de baterías, se recomienda consultar [4], que se encuentra disponible en el repositorio de la Biblioteca de la ETSII de la “Universidad Politécnica de Madrid”.

3.3. Validación de modelo teórico, con ensayos de laboratorio.

El modelo teórico para simulaciones de envejecimiento de baterías de ion-litio, se validó con ensayos de laboratorio considerando los datos de la tabla 2.

Tabla 2: Datos considerados para ensayos en laboratorios

I carga (A)	I descarga (A)	Temperatura ambiente (°C)	Descarga/Carga(%)	Número de ciclos
27,5	55	25	30/80	84
27,5	55	21	30/80	117
82,5	55	21	30/20	33
82,5	55	19	30/20	204
Total de ciclos				438

Según [3], los factores más importantes que influyen en la degradación de las baterías son la temperatura ambiente, velocidad de carga-descarga, profundidad de descarga y números de ciclos.

En el ensayo realizado se consideró las corrientes de cargas de 27,5 A y 82,5 A, manteniendo constante para ambos casos la corriente de descarga a 55 A, la temperatura ambiente descrita en la tabla 2, es la

registrada en la ciudad de Madrid en los días que se realizaron los ejercicios de ciclados, a las baterías de ion-litio.

Se deja constancia que aunque las combinaciones mostradas en la tabla 2 no son todas las posibles, se tomaron de referencia para realizar el estudio expuesto en este documento.

Una vez realizado los ensayos en el laboratorio, se procedió a realizar las simulaciones en el modelo teórico de Matlab-Simulink® tomando de base los datos de la tabla 2 y las características de las baterías de ion-litio existente (15 celdas concedas en serie, cada una con una capacidad de 55 Ah) en la “Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales” (ETSII), de la Universidad Politécnica de Madrid, las cuales se muestran en la Fig. 3.



Figura 3: Celdas de ion-litio, ensayadas

Realizando las simulaciones y ensayos respectivos se obtuvieron los resultados mostrados en la Fig. 4.

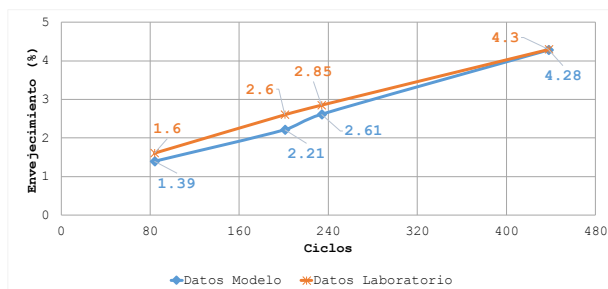


Figura 4: Datos ensayados en laboratorio Vs Datos simulados en Matlab-Simulink®(modelo)

De la Fig. 4, se puede apreciar que el modelo teórico logro envejecer las baterías de ion-litio en un 4,28 %, que comparados con los datos de ensayos en laboratorio (4,3 %), presenta una diferencia de apenas 0,02%.

De los resultados mostrados en la Fig. 3, se puede determinar que el modelo teórico es una herramienta muy útil para simular los parámetros que repercuten en el

envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio.

Se menciona que el modelo se diseñó estimando que cuando la carga completa de la batería solo llegue hasta el 80 % de su capacidad (envejecimiento 20 %), la simulación se detenga. En la práctica significaría realizar el cambio de batería por terminación de vida útil.

Es importe aclarar que los 438 ciclos de carga-descarga a los que se sometieron las baterías ensayadas y mostrados en la tabla 2, se tomó como una muestra referencial para determinar el envejecimiento de las celdas en laboratorio y proceder a la validación descrita en la Fig. 4.

3.4. Escenarios considerados para el análisis

Una vez validado el modelo teórico con datos de ensayos en laboratorio, se procederá a simular tres escenarios que repercuten de forma directa en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio como son: La profundidad de descarga y las tasas de carga; así mismo se analizará la repercusión de someter a las celdas de ion-litio a cargas y descargas rápidas, y por último se simulará el efecto de la temperatura en el envejecimiento de las baterías, tomando como ejemplo las registradas en las principales ciudades del Ecuador.

4. RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS SIMULADOS.

4.1. Primer escenario

En este escenario se analizaron 2 casos: el primero consiste en simular el envejecimiento prematuro de las baterías considerando diferentes profundidades de descargas (DoD), cuyos resultados se muestran en la Fig. 5.

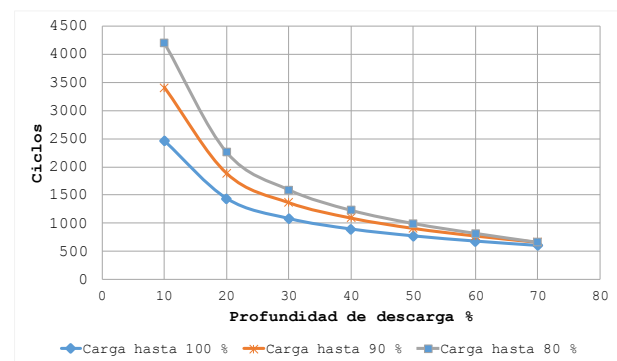


Figura 5: Profundidades de descarga, considerando distintos límites de carga y descarga de las celdas de ion-litio

En la Fig. 5, se representa tres curvas en la que se simuló la carga de la batería hasta un 100 % (curva celeste), 90 % (curva naranja) y 80 % (curva gris). Todas las curvas fueron sometidas a profundidades de descargas diferentes, si se toma de ejemplo la curva naranja, se puede deducir que cuando la batería fue sometida a una carga del 90% y se descargó hasta el 80 % (profundidad de descarga 10 %) de su capacidad, pudo lograr 3408

ciclos; en cambio cuando se cargó al 90% y se descargó al 20 % (profundidad de descarga 70 %) de su capacidad, se obtuvieron 662 ciclos.

El ensayo realizado permite deducir que, si la batería se carga a un límite menor de su capacidad máxima, esta proporcionaría un número mayor de ciclos y esto se traduce en una vida útil más prolongada.

Es de indicar que para este caso 1, se simuló tomando como constantes los datos de la temperatura (25 °C), la tasa de carga (1C=55 A) y la tasa de descarga (1C=55 A).

En lo que corresponde al caso 2, se realizará un barrido de tasas de carga, en donde se considerará en la simulación, la temperatura constante (25°C) y la tasa de descarga (1C= 55 A).

En la tabla 3 se muestran los datos de las diferentes tasas de carga simuladas, con su equivalencia en amperios.

Tabla 3: Tasas de carga a simular en el caso 2, escenario 1

Tasa de carga	Equivalencia en corriente (A)
0,2 C	11
0,5 C	27,5
1 C	55
1,5 C	82,5
2 C	110
5 C	275
10 C	550
15 C	825

Los datos mostrados en la tabla 3 se simularán realizando ciclos de Carga/ descarga al 80/20(DoD 60 %) y de 80/30 (DoD al 50 %), cuyos resultados se muestran en la Fig. 6.

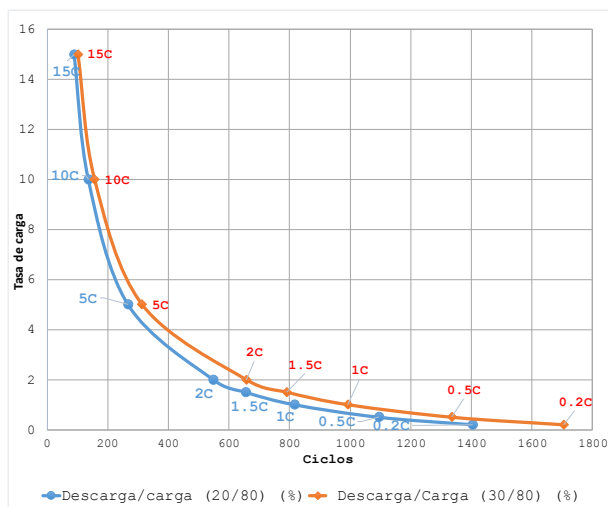


Figura 6: Barrido de carga a diferentes "C"

Las curvas descritas en la Fig. 6 muestran que,

realizando la carga/descarga de las baterías de ion-litio al 80/30 por ciento, las celdas presentan un mayor número de ciclos, lo que equivale a un menor envejecimiento comparada con la curva celeste, que representa una carga/descarga de 80/20 por ciento.

4.2. Segundo escenario

En este escenario simulará el envejeciendo de las celdas recargables de ion-litio, sometiendo a las baterías a cargas y descarga rápidas, es importante mencionar que este caso se puede presentar en las baterías que se incorporen a las redes eléctricas, en donde serán sometidas a cargas muy rápidas y descargas de igual magnitud.

Las baterías en las redes eléctricas proporcionarán una mejor integración con las energías limpias renovables, ya que permitirá realizar el control de tensión y frecuencia, así como como una gestión de carga y demanda eficiente.

Según se manifestó en el punto 2 de este documento, la corriente de carga semirápida está entre los 16 y 32 amperios, de ahí en adelante se podría considerar corrientes superiores a las mencionada, como las utilizadas para realizar cargas rápidas a las baterías recargables.

Para este escenario se considera como constante la temperatura (25°C), la profundidad de descarga (50%) y se simularán los datos mostrados en la tabla 4.

Tabla 4: Tasas de carga y descarga a simular en el escenario 2

Tasa de carga	Equivalencia en corriente de la tasa de carga (A)	Tasa de descarga	Equivalencia en corriente de la tasa de descarga (A)
0,5 C	27,5	8 C	440 A
0,5 C	27,5	10 C	550 A
0,5 C	27,5	12 C	660 A
0,5 C	27,5	15 C	825 A
1 C	55	8 C	440 A
1 C	55	10 C	550 A
1 C	55	12 C	660 A
1 C	55	15 C	825 A
2 C	110	8 C	440 A
2 C	110	10 C	550 A
2 C	110	12 C	660 A
2 C	110	15 C	825 A

Realizando las simulaciones con los datos descritos en la tabla 4, se tienen los resultados mostrados en la Fig. 7.

De la Fig. 7 se deduce que cuando las baterías de ion-litio son sometidas a cargas y descargas rápidas (curva



naranja), las pilas secundarias simuladas (55 Ah) tendrían una vida útil de menos de 100 ciclos. En cambio, si se realiza la recarga con pocos amperios (curva gris) y se descarga con mayor cantidad de corriente (8C -15 C), puede desacelerarse el envejecimiento prematuro de celdas de ion-litio.

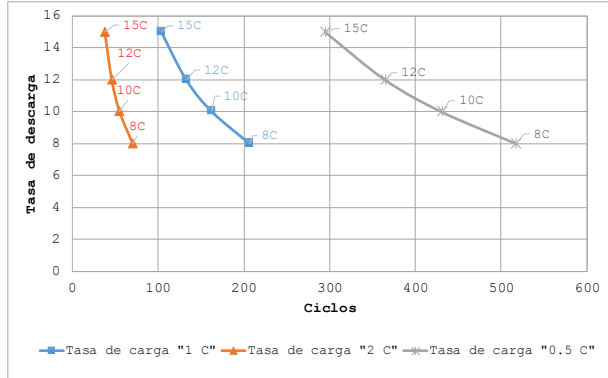


Figura 7: Carga y descargas rápidas de baterías de ion-litio

4.3. Tercer escenario

Otro factor que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio, es la temperatura. Para analizar este escenario se tomará como referencia la temperatura media anual registradas en el año 2015 en 6 ciudades del Ecuador, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5: Temperatura de las principales ciudades del Ecuador, por región.

Ciudad	Región	Altitud (msnm)	Temperatura media anual en °C (2015)
Esmeralda	Litoral o Costa	15	27,3
Guayaquil	Litoral o Costa	4,02	27,7
Quito	Interandina o Sierra	2850	16,9
Cuenca	Interandina o Sierra	2560	16,3
Lago Agrio	Oriente	300	26
Puyo	Oriente	950	22,3

En la Fig. 8 se muestran los resultados obtenidos realizando la simulación utilizando el modelo teórico validado. Hay que considerar que para el análisis se mantuvieron constantes la corriente carga (11 A), la corriente de descarga (55 A) y la profundidad de descarga (50 % de la capacidad máxima de la batería).

De la Fig. 8 se analiza que entre más elevada sea la temperatura, las baterías ion-litio presentan una menor cantidad de ciclos, lo que significa que a temperaturas elevadas (calientes) las celdas presentan envejecimiento prematuro.

Así mismo se observó en la Fig. 8, que en la ciudad

del Puyo de la región Oriental del Ecuador, las celdas presentarían mejores prestaciones, esto asumiendo que las pilas secundarias analizadas no cuentan con climatización, cuya importancia queda en manifiesto en este estudio.

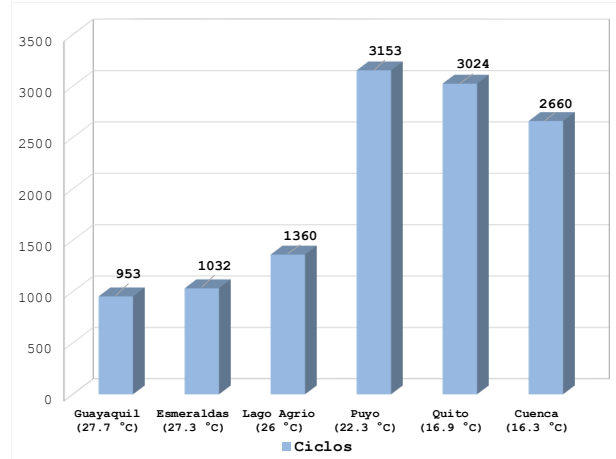


Figura 8: Envejecimiento de las baterías de ion-litio en función de la temperatura, caso Ecuador

Es importante aclarar que partiendo de los parámetros de las baterías simuladas y descritas en [11], su rango de funcionamiento esta dentro de los -20 a 60 °C, siendo la temperatura ideal de operación alrededor de los 23 °C, lo que explica los resultados mostrados en la Fig. 8.

Pero como se mencionó anteriormente, las baterías de ion-litio también presentan problemas cuando son sometidas a temperaturas extremas como se observa en la Fig. 9.

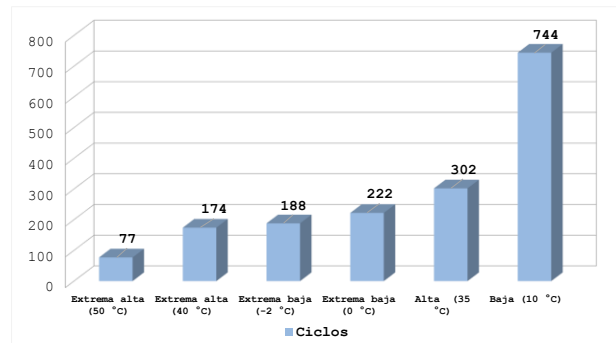


Figura 9: Envejecimiento de las baterías de ion-litio en función de la temperatura, considerando casos extremos

De la Fig. 9 se deduce que las baterías de ion-litio cuando son sometidas a temperaturas bajas o elevadas, disminuyen su vida útil considerablemente.

Aunque es verdad que las temperaturas simuladas en la Fig. 8 y 9, pueden ser contrarrestadas con los sistemas de calentamiento y enfriamiento antes mencionados, existe el inconveniente que cuando se someten las celdas de ion-litio a temperaturas muy bajas, se produce una disminución en el rendimiento de las pilas secundarias. En el caso de los vehículos eléctricos tienen que utilizar mayor cantidad de energía para calentar la cabina, lo que le resta autonomía.

De igual forma se demostró en la Fig. 8 y 9, que cuando las baterías de ion-litio trabajan a temperaturas muy elevadas se aceleran el envejecimiento prematuro de las mismas. Hay que indicar que las celdas estudiadas deben ser capaz de soportar fallas del sistema térmico, por lo que el diseñador debe garantizar la seguridad necesaria, si el control térmico no es efectivo, en ese caso debe actuar el dispositivo de control de gestión de batería (BMS).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente estudio como resultado de las simulaciones realizadas a través del modelo teórico de Matlab-Simulink®, se demostró que las tasas de carga y descarga afecta de forma directa al envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio, por lo que se recomienda que, para alargar la vida útil de las celdas, se las cargue y descargue utilizando pocos amperios (carga lenta); de acuerdo a lo mostrado en la Fig. 6, al comparar las curvas sometidas a DoD del 60 y 50 %, se demuestra que cuando mayor sea la profundidad de descarga de las celdas, las baterías ejecutan un número menor de ciclos, por lo que conveniente trabajar según el caso estudiando a un DoD del 50 %.

Se demostró que cuando las pilas secundarias de ion-litio son sometida a cargas y descargas rápidas, reducen drásticamente su vida útil. Se recomienda que, de ser el caso, se haga una mezcla en el funcionamiento; esto es, si se cargan las celdas con pocos amperios (carga lenta) se realice la descarga con muchos amperios; esta actividad lograría que las baterías soporten el doble de ciclos, que si se cargaran o descargaran con elevadas corrientes.

En el análisis realizado se confirmó que cuando las baterías de ion-litio, funcionan por debajo de los 0 °C, sus ciclos de vida disminuyen considerablemente, al igual que cuando se trabaja con temperaturas extremadamente altas.

Las celdas de Ion-Litio, para alargar su vida útil deben evitar los ciclos de carga/descarga a temperaturas muy elevadas o muy bajas.

Para concluir, se pone en relevancia en este artículo la importancia de un dispositivo electrónico que regule la climatización en las celdas estudiadas, para de esta manera evitar la disminución de los ciclos de vida de las baterías de ion-litio, cuando trabajan a temperaturas diferentes a la nominal de fabricación.

AGRADECIMIENTOS

El autor Hugo Pico Mera expresa su agradecimiento a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) de la República del Ecuador, cuya financiación (Contrato N°: CZ04-000673-2018) ha hecho posible su formación de postgrado, cuyos resultados parciales se documentan en el presente trabajo.

El autor Iván Pazmiño Ordóñez expresa su agradecimiento a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) de la República del Ecuador, cuya financiación (Contrato N°: CZ02-000683-2018) ha hecho posible su formación de postgrado, cuyos resultados parciales se documentan en el presente trabajo

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. A. Abdullah Al-Karakchi, G. Putrus and R. Das, "Smart EV charging profiles to extend battery life," 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Heraklion, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/UPEC.2017.8231961.
- [2] "IEEE Guide for the Characterization and Evaluation of Lithium-Based Batteries in Stationary Applications," in IEEE Std 1679.1-2017, vol., no., pp.1-47, 31 Jan. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8262521.
- [3] C. Galatsopoulos, S. Papadopoulou, C. Ziogou, D. Trigkas, C. Yfoulis and S. Voutetakis, "Non-Linear Model Predictive Control for Preventing Premature Aging in Battery Energy Storage System," 2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL), Sheffield, 2018, pp. 174-179, doi: 10.1109/CONTROL.2018.8516720.
- [4] P. M. Torres, "Analysis and Design Considerations of an Electric Vehicle Powertrain regarding Energy Efficiency and Magnetic Field Exposure," Ph.D. thesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Madrid., España, 2016.
- [5] M. Plaza, "Estudio y modelado de la respuesta dinámica de baterías electroquímicas destinadas a las aplicaciones estacionarias" Ph.D. tesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2015.
- [6] J. Vélez, "Desarrollo de electrodos y electrolito para baterías solidas de ión litio en lámina delgada obtenido por sol-gel," Ph.D. tesis, Departamento de Química Inorganica, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2015.
- [7] J. Miranda, N. Iglesias, "Las infraestructuras de recarga y el despegue del vehículo eléctrico," Observatorio Medioambiental, vol. 18, pp. 57-85, 2015, doi: https://doi.org/10.5209/rev_OBMD.2015.v18.5128
- [8] J. González, "El vehículo eléctrico y la integración de las renovables en el sistema eléctrico," Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, Madrid, Guía M.10.820-2015, 2015.

- [9] M. A. Hannan et al., "A Review of Internet of Energy Based Building Energy Management Systems: Issues and Recommendations," in IEEE Access, vol. 6, pp. 38997-39014, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2852811.
- [10] M. A. Boukhal, I. Lagrat and O. Elbannay, "Implementation of a lithium-ion battery state of charge estimation algorithm for BMS on the real time target NI myRio," 2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), Fez, Morocco, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/WITS.2019.8723849.
- [11] Catalog No. SLPB100255255HR2, SLPB 55Ah High Power Superior Lithium Polymer Battery, Kokam Co., Ltd, South Korea.
- [12] C. Lyu et al., "A research of thermal coupling model for lithium-ion battery under low-temperature conditions," 2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin), Harbin, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/PHM.2017.8079131.
- [13] J. Wang, P. Liu, J. Hicks-Garner, E. Sherman, S. Soukiazian, M. Verbrugge, H. Tataria, J. Musser, P. Finamore, "Cycle-life model for graphite-LiFePO4 cells," 2011, Journal of Power Sources, pp. 3942-3948, doi: doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.134.
- [14] I. Recio, "Desarrollo e implementación de una metodología de ensayos para medida de la capacidad y estudio del envejecimiento en baterías de NiMH e ion-litio," MCs. tesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Madrid., España, 2016.
- [15] J. R. Arribas, P. M. Lafoz, "Sistemas de potencia y de almacenamiento en vehículos eléctricos (MUIE)", PhD., Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2018.



Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Ivan P. Pazmiño Ordoñez.– Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, 2015. M.Sc. Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Madrid, 2019. Actualmente se desempeña como Docente en la Carrera de Ingeniería Eléctrica en la



Director y Docente de la Carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador.

Edwin B. Ponce Minaya.– Ingeniero Eléctrico, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), 1993. M.Sc. Gestión Ambiental, ULEAM, 2014, Master en Administración de Empresas MBA, ULEAM, 1999. Actualmente se desempeña como



Hugo A. Pico Mera.– Nació en Manabí en 1990. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Técnica de Manabí en 2013. Master Universitario en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Politécnica de Madrid en 2019. Ha desempeñado cargos

como Profesional de Gestión de Proyectos y Líder de Planificación en la Corporación Nacional de Electricidad (CNEL EP) Unidad de Negocio Manabí. En la actualidad se desempeña como Profesional de Planificación Técnica-Económica en CNEL EP.