

Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda

R. Iglesias, A. Lago, A. Nogueiras, C. Martínez-Peñalver, J. Marcos, C. Quintans, M.J. Moure, M.D. Valdés
Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Vigo
36310 Vigo, Spain
ramiro.iglesias@uvigo.es

Resumen— El uso cada vez más extendido de baterías de Li-Ion requiere un conocimiento de sus características electrodinámicas en profundidad. Conocer el estado de carga de una batería compuesta por varias celdas, a partir de la tensión en sus bornes y de la corriente que aporta, es posible si el modelo matemático que se emplea para describirla es correcto. En este trabajo se analiza un modelo electrodinámico, que posteriormente se emplea para describir y simular una batería real. Los parámetros del modelo se obtienen a partir de ciclos experimentales de descargas que constan de periodos de descarga a corriente constante intercalados con otros en los cuales la batería está en reposo. El modelo, con los parámetros obtenidos, presenta una precisión suficiente para evaluar el estado de carga. Dada la validez del mismo, se presenta como el germen de un futuro trabajo para modelar en mayor profundidad la batería en aplicaciones más complejas.

Palabras clave - baterías; circuito equivalente; modelado; simulación.

I. INTRODUCCIÓN

Una batería es un dispositivo que convierte energía química en energía eléctrica mediante una reacción redox [1]. En el caso de las baterías secundarias la reacción es reversible de forma que, una vez descargada, la batería puede recargarse. A diferencia de las máquinas térmicas o de combustión basadas en el ciclo de Carnot, las baterías no están sujetas a las limitaciones impuestas por la segunda ley de la termodinámica por lo que son energéticamente más eficientes.

La unidad básica electroquímica es la celda, compuesta por tres elementos principales: el ánodo, o electrodo negativo; el cátodo, o electrodo positivo, y el electrolito, que es el conductor iónico que proporciona el medio físico para la transferencia de carga.

Una batería consta de una o más celdas conectadas en serie y/o paralelo en función de las características eléctricas de salida y de la capacidad de almacenamiento de energía deseadas. El voltaje teórico, o potencial estándar, de las celdas que componen una batería está definido por los materiales con los que están construidas y puede calcularse a partir de los potenciales estándar de los electrodos, que están tabulados. La capacidad teórica de una celda está definida por la cantidad de material reactivo contenido en la misma, se expresa en

culombios o Ah y define la cantidad total de electricidad envuelta en la reacción electroquímica.

A partir del voltaje teórico y la capacidad teórica de la celda se puede calcular el máximo valor teórico de energía que puede proporcionar dicha celda (Wh); la energía teórica de una batería (o celda) suele expresarse en relación al peso (energía específica) o volumen (densidad de energía):

$$E_{\text{teor}} (\text{Wh}) = V_{\text{teor}} (\text{V}) \times C_{\text{teor}} (\text{Ah}) \quad (1)$$

En la práctica la energía que proporciona una batería (o celda) real es una fracción de la energía teórica ya que hay que incluir el peso/volumen del electrolito y los componentes no reactivos necesarios para su construcción física. Aparte de esto, la batería no se descarga al voltaje teórico, no se descarga completamente hasta los cero voltios y los materiales reactivos no están idealmente balanceados desde el punto de vista estequiométrico como en la reacción teórica; todo esto reduce la energía específica de las baterías y celdas reales. La energía disponible de una batería depende directamente de los materiales que la componen y de su cantidad, cuanto más energía se necesita más cantidad de materiales son necesarios.

Una de las principales aplicaciones de las baterías de alta capacidad de almacenamiento es en vehículos puramente eléctricos o híbridos. Un sistema de tracción híbrido utiliza un motor eléctrico para complementar la potencia suministrada por un motor de combustión durante la aceleración y recuperar energía durante el frenado. La eficiencia y autonomía puramente eléctrica de los vehículos híbridos depende de la capacidad de su sistema de almacenamiento de energía, el cual no sólo debe ser capaz de almacenar grandes cantidades de energía sino también de absorberla y liberarla rápidamente en función de las demandas de consumo.

En la actualidad se utilizan equipos de almacenamiento híbridos que suelen consistir en topologías con baterías, que tienen una alta densidad de energía, y ultra-condensadores, que tienen una mayor densidad de potencia [2].

La eficacia y rendimiento del sistema de almacenamiento híbrido depende de la configuración de los dispositivos que lo componen (batería y ultra-condensadores) y de la estrategia de control utilizada para gestionar el flujo de energía durante las

cargas y descargas. Dado que estos equipos tienen un coste elevado y que los ensayos son de difícil realización y potencialmente destructivos, se hace necesario utilizar simulaciones basadas en modelos para poder definir las estrategias de control y configuraciones más adecuadas antes de llevar a cabo los experimentos físicamente.

II. MODELOS DE BATERÍA

Los modelos de comportamiento de batería más extendidos son los basados en las reacciones químicas que se producen en ellas, denominados modelos electroquímicos, y los que buscan definir un sistema eléctrico que se comporte como la batería real, llamados modelos de circuitos equivalentes. Los parámetros de cualquier modelo de batería deben extraerse para cada batería específica mediante experimentación.

A. Modelos electroquímicos

Basados directamente en los fenómenos electroquímicos, estos modelos predicen la energía que almacenan y proporcionan las baterías, pero ignoran fenómenos como la variación del voltaje de salida de la batería en carga, la influencia de la temperatura y las derivas por envejecimiento [3].

El denominado modelo de Sheperd es uno de los más conocidos y empleados para el análisis del comportamiento de baterías en vehículos híbridos. Este modelo describe el comportamiento electroquímico de la batería directamente en términos de voltaje y corriente y suele utilizarse conjuntamente con la llamada ecuación de Peukert para obtener el voltaje y el estado de carga dadas las variaciones del consumo de energía [4].

El modelo de Sheperd suele modificarse añadiéndose términos que describen ciertos aspectos específicos del comportamiento de la batería que son objeto de análisis, como pueden ser el comportamiento en sobrecarga y la generación de gases o el cálculo de la resistencia interna.

B. Modelos basados en circuitos equivalentes

Existen una gran variedad de modelos de circuitos equivalentes. La mayoría utiliza un condensador para representar la capacidad de almacenamiento de carga de la batería. El modelo lineal, mostrado en la Fig. 1, es el modelo más simple y se utiliza para simulaciones sencillas. Consiste en una fuente ideal con un voltaje de circuito abierto E_{OC} y un resistor equivalente en serie R , que representa la resistencia interna de la batería.

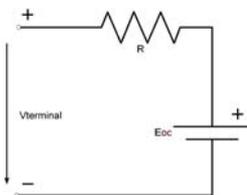


Figura 1 Modelo lineal de una batería

El modelo equivalente de Thevenin (Fig. 2) consiste en una fuente, dos resistores y un condensador. La fuente E_{OC} tiene como valor la tensión de circuito abierto, el resistor R modela la resistencia interna de la batería, el condensador C_O modela la capacidad en los electrodos de las celdas que componen la batería y el resistor R_O representa la resistencia no lineal entre dichos electrodos y el electrolito. Esta red modela la respuesta transitoria común a las baterías.

En la forma más básica de este modelo se asume que los elementos son constantes, por lo que es un modelo muy utilizado dada su sencillez [5].

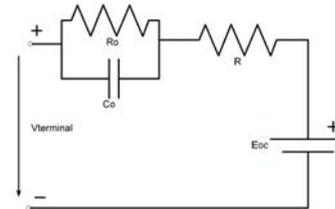


Figura 2 Modelo equivalente de thevenin

Añadiendo más elementos al modelo equivalente de Thevenin anterior se obtienen mejoras con las que se modelan fenómenos como la respuesta a sobrecargas y el fenómeno de de autodescarga cuando la batería está en circuito abierto [6].

En los modelos anteriores se asume que todos los elementos tienen unos valores constantes; en realidad los valores dependen de las condiciones de funcionamiento de la batería: estado de carga, funcionamiento en carga o descarga, el tipo de carga o descarga, la temperatura de funcionamiento, etc. Para mejorar el modelo se suele utilizar un modelo de Thevenin modificado, de forma que los parámetros E_{OC} , R , C_O y R_O dependen de las condiciones de funcionamiento.

III. BATERÍAS DE LI-ION

Las baterías de Li-ion tienen una alta densidad de energía, un buen rendimiento a altas temperaturas y son reciclables. Las principales ventajas de las baterías de Li-ion son un bajo efecto de memoria, una alta potencia específica (W/kg), una elevada energía específica (Wh/kg) y una larga vida útil. Estas características hacen estas baterías indicadas para su uso en vehículos híbridos eléctricos (HEVs) y vehículos eléctricos (EVs).

Como inconvenientes hay que mencionar que, debido a la naturaleza de las reacciones químicas del litio, estas baterías no toleran sobrecargas o sobredescargas y que pueden dañarse fácilmente si la estrategia de control no es la adecuada por lo que la seguridad es un problema añadido [1]. Las baterías de Li-ion comerciales suelen tener incorporados sistemas de protección en el propio cuerpo de la batería para limitar las tensiones de carga, de descarga y desconectar las celdas de la carga en el caso de que ocurran sobreintensidades o sobretensiones. Otro inconveniente frente a otros tipos de baterías es la mayor impedancia interna que poseen, por lo que a corrientes de descarga elevadas, por ejemplo a 1C ó 2C, se reduce la capacidad efectiva disponible.

Para los ensayos se ha utilizado una batería SAFT Intensium 3 [7], con las características de la TABLA I y compuesta por catorce celdas SAFT modelo VL45ESR conectadas en serie.

Este modelo incorpora sistemas de protección y un módulo de control de la carga y descarga, de tal forma que la estrategia de carga viene definida por el fabricante y la batería está protegida frente a sobrecargas y/o sobredescargas.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DE LA BATERÍA INTENSIMUM 3

Voltaje nominal	48	V
Capacidad nominal (C/8)	45	Ah
Energía nominal (C/8)	2300	Wh
Energía específica	96	Wh/kg
Peso	22.5	kg

IV. MODELADO DE LA BATERÍA

A. Modelo utilizado

Se utiliza el modelo propuesto en [8], cuyo esquema eléctrico se muestra en la Fig. 3, y que se utilizó con éxito para modelar el comportamiento de una batería similar en [1], modificando el procedimiento para calcular los parámetros del modelo.

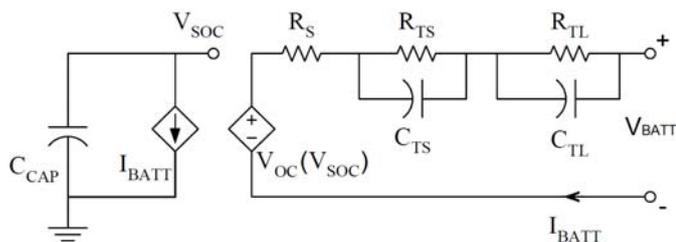


Figura 3 Modelo de batería empleado

La principal ventaja de este modelo es que está dado en términos de un diagrama eléctrico, por lo que sus parámetros son magnitudes eléctricas y puede simularse fácilmente en Spice, Simulink o programas similares.

El modelo consiste en dos circuitos separados, relacionados entre sí por una fuente de tensión controlada por tensión y una fuente de corriente controlada por corriente. Uno de los circuitos modela la capacidad de almacenamiento de energía de la batería y la carga almacenada durante los procesos de carga o descarga. El otro describe la resistencia interna de la batería y el comportamiento transitorio ante distintas cargas.

La fuente de tensión controlada por tensión representa la dependencia no lineal entre el estado de carga (SOC) y V_{OC} . La tensión V_{SOC} se normaliza de forma que $V_{SOC} = 1$ V equivale al SOC (100%).

Dado que la tensión se normaliza a 1V y que $C = Q/V$, siendo C capacidad en faradios, Q carga en culombios y V tensión en voltios, el valor del condensador C_{CAP} , en faradios, resulta:

$$C_{CAP} [F] = 3600 [C/Ah] \cdot \text{Capacidad} [Ah] \cdot 1 [V^{-1}] \cdot f_1(t) \cdot f_2(T) \quad (2)$$

Donde Capacidad es la capacidad nominal de la batería, f_1 es un factor corrector que modela el envejecimiento y f_2 es un factor corrector dependiente de la temperatura. El resto de valores del modelo deben hallarse experimentalmente.

B. Obtención de los parámetros

1) Relación $V_{OC} - SOC$:

Para obtener una aproximación de la relación no lineal $V_{OC}(SOC)$ se realizan una serie de ciclos de descarga mientras se monitoriza el voltaje e intensidad. La descarga se realiza a intensidad constante de forma que el cálculo del SOC es trivial: dado que el perfil de descarga es rectangular la integral necesaria para determinar el SOC se convierte en una simple multiplicación. En la Fig. 4 pueden verse las curvas de descarga para distintas intensidades.

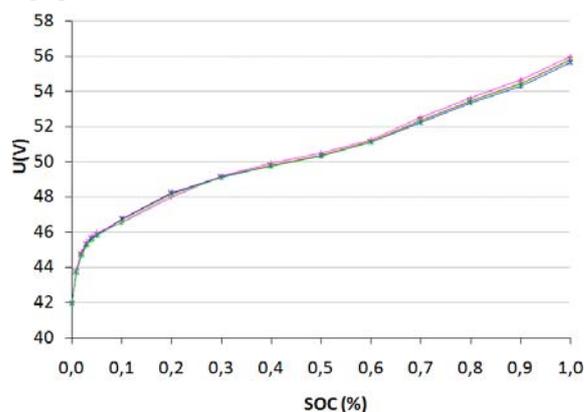


Figura 4 Familia curvas $V_{OC}(SOC)$ para distintas intensidades de descarga

Esta primera aproximación de $V_{OC}(SOC)$ permite calcular de forma aproximada los valores de tensión que presenta la batería en sus terminales a determinados estados de carga. Dado que V_{OC} representa la tensión de la batería a circuito abierto, a continuación se realizan una serie de descargas en las cuales se deja reposar la batería en los puntos de interés deseados para trazar la curva sin la influencia de R_S .

La curva de la Fig. 5 muestra uno de los procesos de descarga realizados: cada vez que la batería llega a uno de los estados de carga de interés, cada 10% del SOC de acuerdo con los datos obtenidos de la Fig. 4, se desconecta y se deja reposar. El valor final de tensión de cada uno de los tramos de reposo se toma como el valor de tensión a circuito abierto para ese estado de carga.

2) Resistor serie R_S :

El resistor serie modela la resistencia interna, que es la responsable de la caída de tensión instantánea que se produce ante un escalón en la intensidad demandada a la batería.

Para calcular su valor se realizan unas descargas con periodos de reposo de la batería como las definidas en el apartado anterior. Teniendo en cuenta la tensión en terminales de la batería y considerando que en el instante final de cada

periodo de descarga la intensidad pasa de un valor constante a cero amperios, se tiene que:

$$R_s = \frac{V_{BAT}(t^+) - V_{BAT}(t^-)}{i_{desc}} \quad (3)$$

Se utiliza una intensidad de descarga constante $i_{desc} = 5 \text{ A}$, el valor lo más cercano posible a $I(C/8) = 5.6 \text{ A}$ y que respeta los límites de potencia de la carga electrónica programable utilizada para el experimento.

Utilizando la ecuación (3) se obtiene un valor de R_s para cada tramo definido para la relación $V_{OC}(SOC)$.

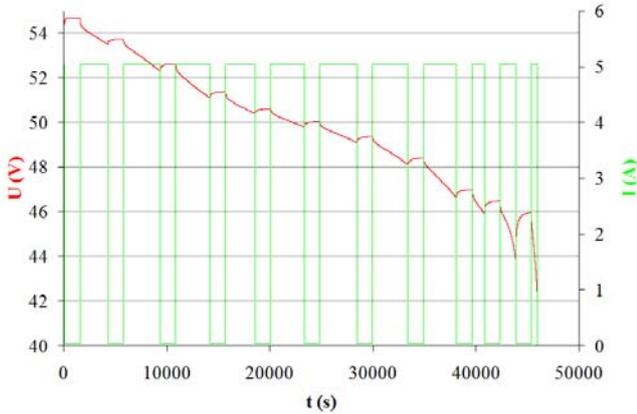


Figura 5 Descarga a I constante con periodos de descanso intercalados

3) Redes RC:

Suponiendo que el periodo de descarga previo al periodo de reposo es lo suficientemente largo como para que los términos exponenciales de la red RC sean despreciables, y dado que durante el periodo de reposo la intensidad proporcionada por la batería es nula, la tensión en bornes de la batería viene descrita por:

$$V_{BAT}(t) = V_{OC}(SOC) - V_{TS,0} \cdot e^{-\frac{t}{R_{TS}C_{TS}}} - V_{TL,0} \cdot e^{-\frac{t}{R_{TL}C_{TL}}} \quad (4)$$

La ecuación (4) tiene la forma general de una función exponencial decreciente de dos términos:

$$V_{BAT}(t) = k - a \cdot e^{-bt} - c \cdot e^{-dt} \quad (5)$$

Trasladando el origen de la función para eliminar el término constante k , se obtiene la siguiente expresión para cada uno de los periodos de reposo durante la descarga:

$$V'_{BAT}(t) = -a \cdot e^{-bt} - c \cdot e^{-dt} \quad (6)$$

Los parámetros que definen el comportamiento transitorio del modelo dependen directamente de la aproximación de la curva experimental y del método de ajuste utilizado.

Los coeficientes de la ecuación (6) se obtienen mediante la *Curve Fitting Tool* de Matlab y a partir de ellos se calculan los valores de R_{TL} , R_{TS} , C_{TL} y C_{TS} para cada tramo definido de la relación $V_{OC}(SOC)$.

V. RESULTADOS

A. Parámetros obtenidos

Usando el procedimiento del apartado anterior se realizan una serie de descargas de la batería a diferentes corrientes de descarga. El valor más utilizado es $i_{desc} = 5 \text{ A}$ tanto por duración del experimento como porque no es previsible que en funcionamiento normal la batería se descargue a valores menores. Una vez que se alcanza cada uno de los SOC definidos como punto de interés se desconecta la batería y se deja reposar 30 minutos. Se opera con los datos obtenidos durante ese periodo de reposo de forma que se elimina el término constante k y se desplaza el origen de tiempos, resultando unas curvas como la de la Fig. 6.

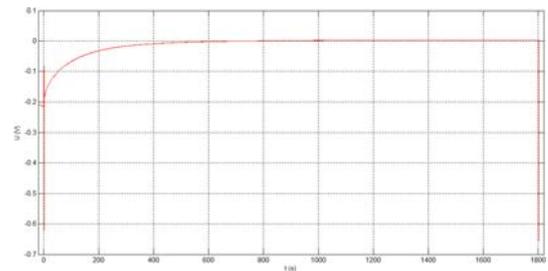


Figura 6 Respuesta de la batería durante un periodo de reposo

Para cada curva de este tipo se calculan los coeficientes a , b , c y d de la ecuación (6) y a partir de éstos, combinando con la ecuación (4), se obtienen los valores R_{TS} , C_{TS} , R_{TL} y C_{TL} . El valor de R_s se obtiene directamente de la ecuación (4). A partir de varios ciclos de descarga se obtienen diferentes valores para cada punto del SOC, dichos valores se promedian dando como resultado las gráficas de las figuras 7 a 11.

Estos valores son función del SOC de la batería pero dado que varían dentro de un orden de magnitud ajustado, y para simplificar el modelo, se consideran constantes durante todo el rango de SOC. Se utiliza la media de los valores obtenidos como valor fijo para cada uno de los elementos del circuito equivalente.

En la Fig. 7 se representan los valores de R_s para cada SOC de la batería y su valor medio.

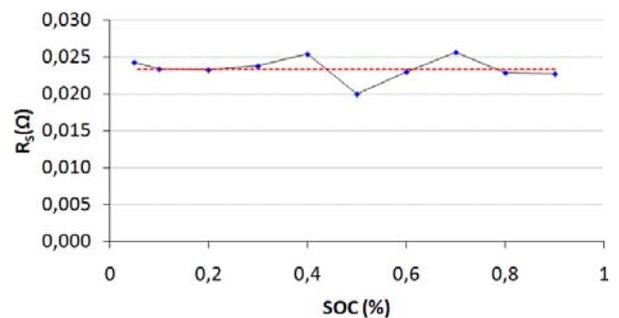


Figura 7 Valor de R_s en función del estado de carga

En las figuras 8 y 9 se representan los valores medios y calculados de R_{TS} y C_{TS} para cada SOC de la batería.

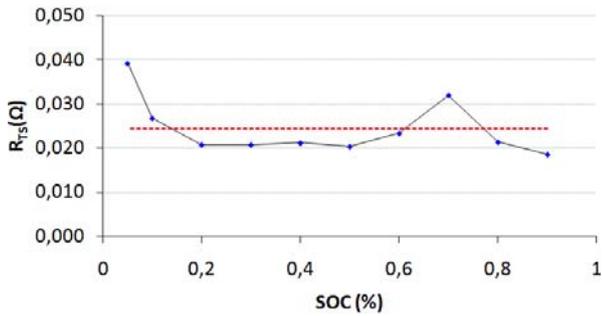


Figura 8 Valor de R_{TS} en función del estado de carga

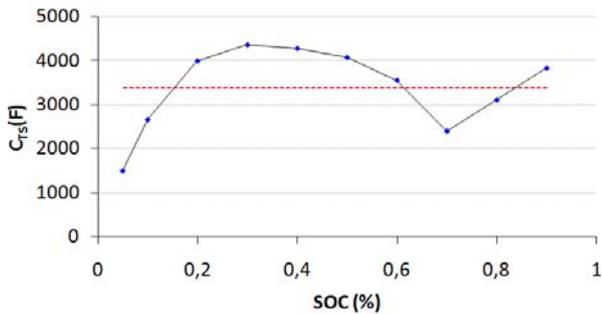


Figura 9 Valor de C_{TS} en función del estado de carga

En las figuras 10 y 11 se representan los valores medios y calculados de R_{TL} y C_{TL} para cada SOC de la batería.

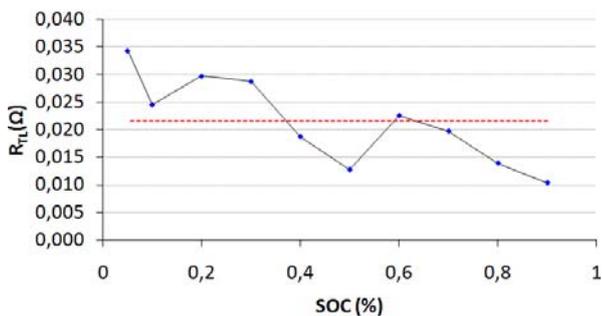


Figura 10 Valor de R_{TL} en función del estado de carga

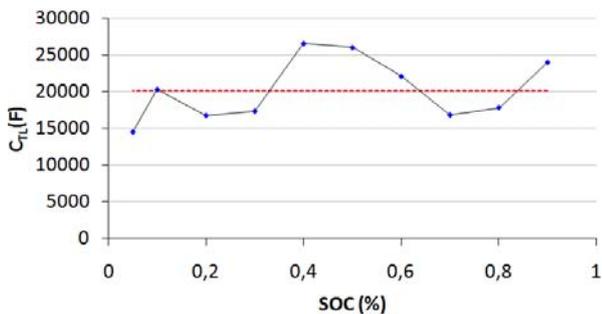


Figura 11 Valor de C_{TL} en función del estado de carga

En la TABLA II se resumen los valores de los elementos, calculados a partir de los datos experimentales:

TABLA II. PARÁMETROS DEL MODELO

R_S	0.0234	Ω
R_{TS}	0.0245	Ω
C_{TS}	3384	F
R_{TL}	0.0216	Ω
C_{TL}	20249	F

B. Resultados de la simulación

En las figuras 12 y 13 se representan dos procesos de descarga de la batería desde el estado de máxima carga, similares a los representados en la Fig. 4. Dado que los parámetros del modelo se obtuvieron a partir de varios procesos de descarga, siendo más numerosos los realizados a mayor intensidad, la respuesta de la simulación a intensidades altas es más precisa.

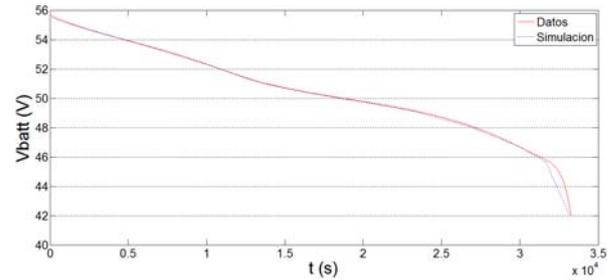


Figura 12 Respuesta real de la batería y simulación para $I_{desc} = 5 \text{ A}$

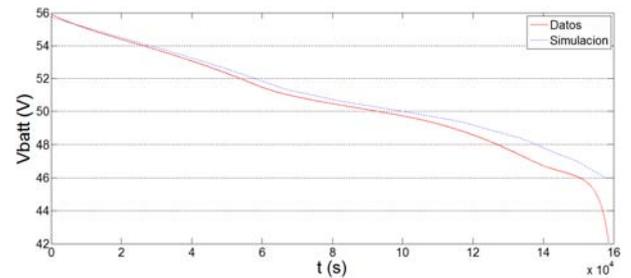


Figura 13 Respuesta real de la batería y simulación para $I_{desc} = 1 \text{ A}$

En las figuras 14 a 16 se representa la respuesta real de la batería junto a la simulación.

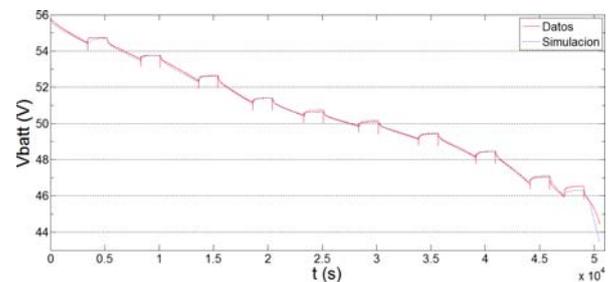


Figura 14 Respuesta con $I_{desc} = 5 / 0 \text{ A}$ y periodos de reposo intercalados

Las figuras 15 y 16 muestran una ampliación de la gráfica anterior. En ellas pueden apreciarse las diferencias entre los datos reales y los simulados.

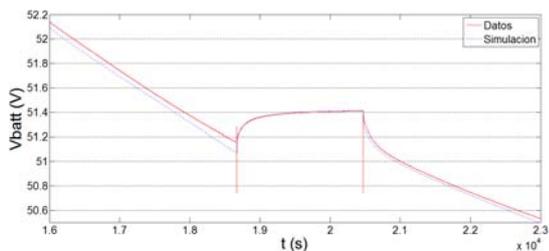


Figura 15 Respuesta real de la batería y simulación (ampliación)

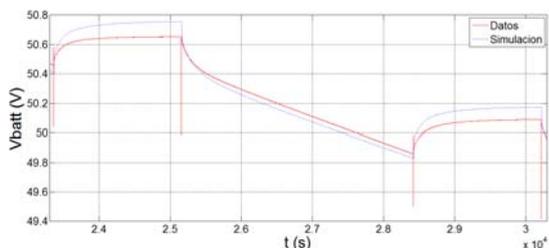


Figura 16 Respuesta real de la batería y simulación (ampliación)

La precisión del modelo se resiente con intensidades de descarga menores, TABLA III. En la Fig. 17 se aprecia cómo para una $I_{desc} = 2$ A los transitorios del modelo se corresponden de forma bastante aproximada con los transitorios de la respuesta real, sin embargo se produce un error similar al de la Fig. 13. Es de suponer que la causa de este error se debe a la relación $V_{OC}(SOC)$ empleada en la simulación.

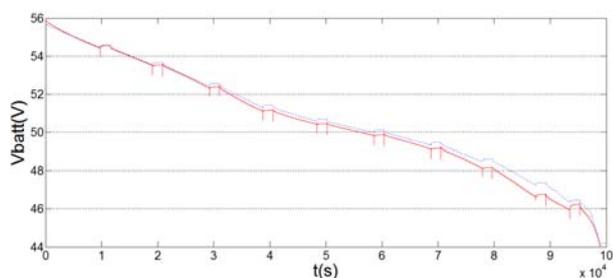


Figura 17 Respuesta con $I_{desc} = 2 / 0$ A y periodos de reposo intercalados

TABLA III. PRECISIÓN DEL MODELO

I descarga pulsante (A)	Error de tensión máximo (mV)	Error* (%)
5	105	0.25
2	810	1.75

(*) Error = $|simulacion - experimental| / experimental$

VI. CONCLUSIONES

El modelo empleado proporciona, utilizando los parámetros fijos, una precisión suficiente para el objetivo marcado de partida: la simulación del comportamiento de una batería para ser utilizado en simulaciones de diferentes estrategias de control y topologías de almacenamiento de energía híbridos. No se tuvieron en cuenta los efectos de la temperatura ni del envejecimiento en el cálculo de la $V_{OC}(SOC)$ ni tampoco se consideró una resistencia de auto-descarga, parámetros a sopesar en un futuro.

Entre las ventajas de este modelo puede señalarse su sencillez, exactitud para un determinado rango de salida, que al estar expresado en términos de un circuito equivalente puede simularse de manera casi inmediata en programas CAD electricos, y que la interpretación física de los parámetros que intervienen en el modelo es intuitiva.

A diferencia de los ensayos realizados en [1] la relación $V_{OC}(SOC)$ no se obtuvo directamente de sucesivos procesos de descarga sino que se realizó un acercamiento previo para luego calcular los valores excluyendo la influencia de la R_s . De acuerdo con los resultados de los experimentos, el paso crítico para utilizar este modelo es el cálculo de $V_{OC}(SOC)$. La mejora de este modelo pasa, inicialmente, por mejorar el proceso de determinación de dicha relación.

Pese a que el modelo se describe en [8] para simular baterías de celdas individuales, el sistema de control de la propia batería balancea las celdas y el consumo, de manera que su comportamiento es asimilable al de una única celda y permite que este modelo sea válido para una batería multicelda.

La batería utilizada (SAFT intensium 3) incorpora una electrónica de control, de tal manera que la estrategia de carga no es accesible por usuario. La simulación obtenida sólo sirve para procesos de descarga, en trabajos futuros se prevé modelar el proceso de carga de manera independiente.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo está financiado por la Consellería de Economía e Industria de la Xunta de Galicia en el marco de las ayudas correspondientes al programa de Diseño y Producción Industrial, bajo el proyecto de investigación 10DPI303007PR.

REFERENCIAS

- [1] D. Linden, "Basic concepts," in *Handbook of batteries*, 3rd Ed., D. Linden and T. B. Reddy, Eds. New York, NY: McGraw-Hill, 2002, pp. 1.3-1.18.
- [2] A. Khaligh and L. Zhihao, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2806-2814, Jul., 2010.
- [3] S. Zoroofi, "Modeling and Simulation of Vehicular Power Systems." M.S. Thesis, Dept. Eng. Envmnt., Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2008.
- [4] J.R. Bumby, P.H. Clarke, and I. Forster; "Computer modeling of the automotive energy requirements for internal combustion engine and battery electric-powered vehicles," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 132, no. 5, pp. 265-279, Sep., 1985.
- [5] M. Debert, G. Colin, M. Mensler, Y. Chamaillard, and L. Guzzella, "Li-ion battery models for HEV simulator," *Proc. IFP - Advances in Hybrid Powertrains*, Nov., 2008.
- [6] Z.M. Salameh, M.A. Casacca and W.A. Lynch; "A mathematical model for lead-acid batteries," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 7, no. 1, pp. 93-98, Mar., 1992.
- [7] SAFT Batteries (2012/02/01). *Intensium 3 - Data Sheet* (March 2010) [Online]. Available: http://www.saftbatteries.com/Produit_Intensium_3_301_296/Language/en-US/Default.aspx
- [8] Min Chen and G.A. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, Jun., 2006.
- [9] M. C. Knauff, C. J. Dafis, D. Niebur, H. G. Kwatny, and C. O. Nwankpa, "Simulink Model for Hybrid Power System Test-bed," in *Electric Ship Technologies Symposium*, 2007, IEEE, 2007, pp. 421-42.