

## Modelado de baterías para aplicación en vehículos urbanos eléctricos ligeros

F.J. Gómez<sup>a,\*</sup>, L.J. Yebra<sup>b,a</sup>, A. Giménez<sup>a</sup>, J.L. Torres-Moreno<sup>a</sup>

<sup>a</sup>CIESOL, Centro Mixto Universidad de Almería-CIEMAT. 04120, Almería, España.

<sup>b</sup>CIEMAT. Plataforma Solar de Almería, 04200 Tabernas, Almería, España.

### Resumen

En este artículo se propone un modelo dinámico de batería que permite simular el comportamiento de distintos tipos de baterías para su aplicación en vehículos eléctricos urbanos ligeros. El objeto fundamental de este modelo es su utilización dentro del modelo multifísico completo del vehículo, que permita desarrollar algoritmos de control y procedimientos de gestión de energía eficientes en vehículos eléctricos urbanos ligeros. El modelo es fácilmente parametrizable a partir de las curvas de descarga experimentales del equipo real y se ajusta adecuadamente al comportamiento particular de la curva de carga/descarga de las baterías de Lítio-Ferrofosfato ( $LiFePo_4$ ). Se han utilizado los datos obtenidos sobre una instalación experimental para la calibración del modelo propuesto y se presentan resultados de la validación del mismo. El modelo se ha implementado en el lenguaje de modelado orientado a objetos Modelica<sup>®</sup> reutilizando clases de su librería estándar *Modelica Standard Library*. La calibración y validación se han realizado con la herramienta de modelado Dymola<sup>®</sup>.

### Palabras Clave:

Lenguajes de simulación, Modelado de sistemas de eventos discretos e híbridos, Simulación de sistemas, Gestión energética y de almacenamiento de energía en vehículos, Identificación de sistemas y estimación de parámetros.

### Modelling of batteries for application in light electric urban vehicles

### Abstract

In this paper a dynamic model of a battery that lets simulate different types of batteries in light electric urban vehicles applications is proposed. The aim of this model is being used as part of the vehicle's whole multiphysics model in order to develop efficient control algorithms and energy management procedures for light urban electric vehicles. The model is directly parameterizable from discharging experimental curves in test facilities. It properly fits to the particular behaviour observed in the charging/discharging curves in  $LiFePo_4$  batteries. For the calibration of the proposed model experimental data from an experimental facility have been used and validation results are presented. The model is implemented in the object oriented modelling language Modelica<sup>®</sup> reusing classes from the Modelica Standard Library. The calibration and the validation has been performed with Dymola<sup>®</sup> modelling tool.

### Keywords:

Simulation languages, Discrete-event dynamic systems, Systems simulation, Storage and management of energy, System identification and Parameter estimation.

## 1. Introducción

Con el fin de desarrollar algoritmos de control y procedimientos de gestión de energía eficientes en vehículos eléctricos urbanos ligeros alimentados de distintas fuentes de energía renovable, es necesario disponer de modelos matemáticos

dinámicos fiables y validados de los distintos componentes del vehículo automóvil. Un modelo de centro de energía inteligente (*SEH – SmartEnergyHub*) que agrupe los diferentes elementos componentes del vehículo que aportan o consumen energía, permite la simulación dinámica del vehículo completo, su control y el análisis del balance energético de su actua-

\*Autor para correspondencia: fgn891@inlumine.ual.es

**To cite this article:** F.J. Gómez, L.J. Yebra, A. Giménez, J.L. Torres-Moreno. 2019. Modelling of batteries for application in light electric urban vehicles.

Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 16, 459-466. <https://doi.org/10.4995/riai.2019.10609>

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4,0 International (CC BY-NC-ND 4,0)

ción (Gómez et al., 2018). Entre los distintos componentes del vehículo eléctrico, la batería actúa como sistema de almacenamiento de energía jugando un papel fundamental en la operación del vehículo, motivo por el cual su estado debe ser conocido por el SEH. En la figura 1 se muestra el vehículo eléctrico experimental eCARM que será utilizado como banco de ensayos y que ha sido desarrollado por la Universidad de Almería para investigación en Automática.



Figura 1: eCARM: vehículo eléctrico usado como banco de pruebas.

El presente artículo propone un nuevo modelo dinámico de batería que permite simular el comportamiento de las baterías de Ion-Litio (*Li - Ion*), de uso común en vehículos eléctricos (*Electric Vehicle - EV*). De entre ellas, las baterías Litio-Ferrofosfato (*LiFePO<sub>4</sub>*) han ganado popularidad en su uso para vehículos automóviles ya que sus características las hacen adecuadas para su uso en *EV*: seguridad intrínseca, estabilidad térmica, menor toxicidad medioambiental, larga duración, alta densidad de energía, fiabilidad, disponibilidad de materia prima, bajo coste y curva de tensión muy plana (Anseán et al., 2013) (Zhang, 2011).

El modelo propuesto es fácilmente parametrizable a partir de las curvas de descarga experimentales del equipo real y se ajusta adecuadamente al comportamiento particular de la curva de carga/descarga de las baterías *LiFePO<sub>4</sub>*. Este comportamiento particular responde a la aparición de dos zonas de tensión extremadamente planas en sus curvas de tensión-capacidad coincidiendo con los valores de 30-60 % y 80-90 % de su estado de carga (*StateOfCharge - SOC*), debidas a los cambios de fase (Berecibar et al., 2016) y (Petzl and Danzer, 2013). Con pequeñas modificaciones, este modelo también permite la simulación del comportamiento de baterías de Plomo-Ácido (*Lead - Acid, LA*), Níquel-Metal-Hidruro (*NiMH*) y Níquel-Cádmio (*NiCd*) (Tremblay and Dessaint, 2009).

En la literatura consultada (Tremblay and Dessaint, 2009), (Seaman et al., 2014), (Wang et al., 2014), (Kroeze and Krein, 2008), los autores hacen referencia a los modelos de baterías comúnmente utilizados y publicados, clasificándolos en ma-

temáticos o experimentales, electro-químicos y basados en circuito eléctrico equivalente. No obstante, los autores entendemos que, de forma general, se podrían derivar modelos dinámicos cuya formulación se base en ecuaciones diferenciales ordinarias y/o ecuaciones en derivadas parciales no lineales. En nuestro caso, presentamos un modelo de circuito eléctrico basado en ecuaciones diferenciales algebraicas y variables discretas. El modelo presentado da una adecuada respuesta en precisión, complejidad y velocidad de cálculo, por lo que es adecuado para simulaciones en tiempo real, así como para el diseño de sistemas control y gestión de energía en *EV*.

De las distintas propuestas de modelos de batería basados en circuito eléctrico que se han encontrado en la bibliografía, en este trabajo se han tomado como referencia los modelos eléctricos propuestos por (Tremblay and Dessaint, 2009), (Dizqah et al., 2012), (NREL, 2015) y (Brondani et al., 2017).

En (Tremblay and Dessaint, 2009) se presenta un modelo dinámico genérico de carga/descarga de batería basado en un circuito eléctrico, que se puede parametrizar mediante datos experimentales para cuatro diferentes tecnologías de batería (Plomo-Ácido, Li-ion, NiMH y NiCd). En (Dizqah et al., 2012) se presenta un ejemplo de implementación mediante modelado orientado a objetos basada en Modelica (Fritzson, 2015), para el caso específico de una batería del tipo plomo-ácido, basado en el modelo propuesto en (Tremblay and Dessaint, 2009) aunque con algunas simplificaciones. Se estructura el modelo como una Máquina de Estados Finita (FSM) compuesta por diferentes estados (carga, sobrecarga, saturación, descarga, sobredescarga y descarga plena) y transiciones entre éstos y se implementa en el lenguaje de modelado Modelica<sup>®</sup>. En (NREL, 2015) se propone un modelo genérico basado también en (Tremblay and Dessaint, 2009) para el caso de baterías plomo-ácido y Li-Ion, donde se describe el procedimiento de extracción de parámetros del modelo a partir de los datos experimentales de la batería y establece las limitaciones del modelo. En (Brondani et al., 2017) se propone un modelo genérico, también basado en (Tremblay and Dessaint, 2009), para el caso específico de baterías Litio-Ion-Polímero (LiPo).

En este trabajo se presentan los resultados de calibración y validación de un modelo de batería mediante el uso de datos experimentales obtenidos en ensayos realizados en un banco de pruebas con baterías *LiFePO<sub>4</sub>*. El ajuste a los datos experimentales se ha realizado con la librería Design, que utiliza un método de optimización multicriterio con restricciones para la obtención de parámetros en el proceso de calibración y del que se pueden encontrar más detalles en ((Elmqvist et al., 2005), (Olsson et al., 2006)). La librería Design viene incorporada en la herramienta de modelado Dymola<sup>®</sup> (Dymola - Dynamic Modeling Laboratory - User Manual, 2018).

El resto del artículo se estructura en las siguientes secciones: en la sección 2 se presenta el modelo de batería propuesto con la aportación realizada en este trabajo para adecuar su comportamiento al específico de baterías *LiFePO<sub>4</sub>*. En la sección 3 se presenta el banco de ensayos utilizado y la descripción de los experimentos realizados. En la sección 4 se muestra el procedimiento seguido para la verificación previa del modelo y su calibración. Finalmente, en la sección 5 se presentan conclusiones obtenidas y algunas propuestas para trabajos futuros.

## 2. Modelo de batería $LiFePo_4$

El modelo propuesto está basado en el trabajo de (Tremblay and Dessaint, 2009), por lo que mantiene sus mismas hipótesis y simplificaciones de modelado, compatibles con el objeto fundamental del mismo, que es su utilización dentro del modelo multifísico completo del vehículo para desarrollar algoritmos de control y procedimientos de gestión de energía eficientes en vehículos eléctricos urbanos ligeros alimentados de distintas fuentes de energía renovable. Son las siguientes:

- La resistencia interna de la batería es un parámetro constante durante los ciclos de carga y descarga y no varía con la amplitud de la intensidad de corriente.
- Los parámetros obtenidos a partir de la curva de descarga de la batería son válidos también para la curva de carga.
- La capacidad de la batería es un parámetro constante y no depende de la amplitud de la intensidad de corriente durante el experimento, no se considera que exista efecto Peukert. Si bien se trata de una limitación propia del modelo, es aceptable para el caso de las baterías Li-Ion en las que la capacidad de la batería está poco influenciada por la intensidad de carga/descarga, tal como se puede encontrar en (Hausmann and Depcik, 2013).
- La temperatura no afecta al comportamiento del modelo. Es una limitación propia del modelo que se considera aceptable para el propósito del mismo.
- El fenómeno de autodescarga de la batería no está modelado.
- No se contempla el efecto memoria de las baterías.

En la figura 2 se muestra el diagrama eléctrico del modelo propuesto en el presente artículo para la batería, implementado en Modelica®, reutilizando componentes de la *Modelica Standard Library* (MSL) y de la librería *VehicleInterfaces*(VI) (Dempsey et al., 2006). El bloque funcional **functionBlock** implementa en lenguaje Modelica® el comportamiento propuesto, descrito en las ecuaciones (1) y (3). Este comportamiento responde a un sistema de ecuaciones algebraico-diferenciales híbridas (contínuo-discretas), con dos (super) estados discretos representados en la máquina de estados finitos (*FSM - Finite State Machine*) de la figura 3. Siendo  $i_{bat}$  la intensidad de corriente que fluye hacia la batería, el super-estado  $s_0$  representa cualquiera de los subestados dentro del estado de descarga (descarga, sobredescarga y descarga plena), mientras que  $s_1$  es el super-estado que representa cualquiera de los subestados de carga (carga, sobrecarga y saturación) (Dizqah et al., 2012). Como estado inicial se asume el estado de descarga  $s_0$ .

Al implementar el sistema de ecuaciones en Modelica®, con Dymola®, resulta en un sistema híbrido de ecuaciones diferenciales y algebraicas (HDAE) con una variable de estado continua ( $it$ ) y dos variables de estado discretas ( $s_0$  y  $s_1$ ). Cuando el HDAE se completa con una condición de contorno en forma de tensión eléctrica aplicada entre los conectores **pin\_p** y **pin\_n**, aparece un bucle algebraico de la forma  $E_{bat}(i_{bat}) = 0$  que puede ser resuelto mediante iteración de la variable  $i_{bat}$ , a pesar del evento discreto generado por el paso por cero de

la variable de iteración. El código generado por la herramienta Dymola® resuelve este bucle algebraico sin problemas.

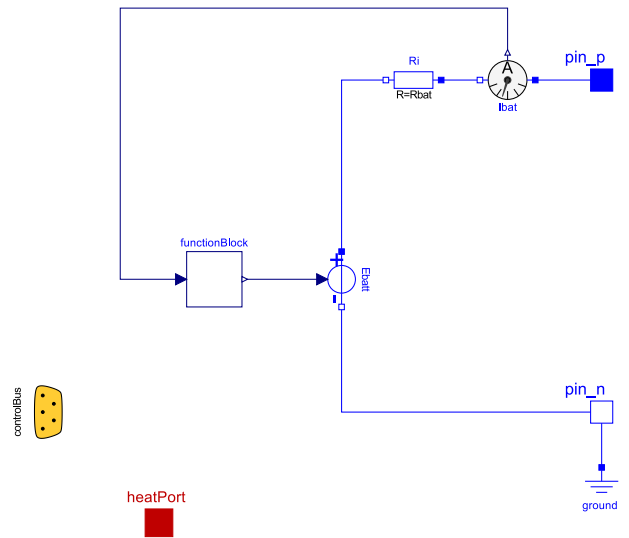


Figura 2: Representación gráfica del modelo eléctrico de una batería genérica implementada en Modelica®, considerada como generador o carga, utilizando componentes de MSL y VI.

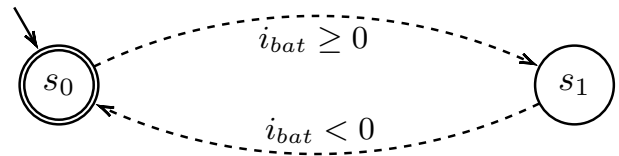


Figura 3: FSM que representa el comportamiento discreto de la batería. Dos estados:  $s_0$  (descarga) y  $s_1$  (carga) y condiciones para las transiciones.

$$E_{bat} = E_0 \cdot i_{bat} - L_1 \cdot K \frac{q_{Max}}{q_{Max} - it} \cdot it + R_p \cdot i_{bat} + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (1)$$

$$E_0(i_{bat}) = V_{Full} + K + R \cdot i_{bat} - A \quad (2)$$

$$R_p = \begin{cases} -L_2 \cdot K \frac{q_{Max}}{q_{Max} - it} & \text{si estado } s_0 \text{ (descarga)} \\ -L_2 \cdot K \frac{q_{Max}}{it - 0,1 \cdot q_{Max}} & \text{si estado } s_1 \text{ (carga)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{dit}{dt} = i_{bat} \quad (4)$$

$$SOC(\%) = 100 \frac{it}{q_{Max}} \quad (5)$$

Los parámetros  $A$ ,  $B$ ,  $q_{Max}$  y  $K$  son dependientes de otros según las ecuaciones (6)..(9), y que se detallan en la tabla 1. Los parámetros  $L_1$  y  $L_2$  se utilizan para dar coherencia dimensional a los términos de la ecuación (1) en que interviene  $K$ .

$$A = V_{Full} - V_{Exp} \quad (6)$$

$$B = \frac{3}{q_{Exp}} \quad (7)$$

$$q_{Max} = 1,05 \cdot \text{ratedCapacity} \quad (8)$$

$$K = \frac{(V_{Full} - V_{Nom} + Ae^{-(Bq_{Nom}^{-1})})(q_{Max} - q_{Nom})}{q_{Nom}} \quad (9)$$

El modelo responde adecuadamente al comportamiento de las baterías Li-Ion, tal como se demuestra en la bibliografía consultada (Brondani et al., 2017) (NREL, 2015) (Ahmed, 2016) y se muestra en la figura 4 en la que se presenta la evolución de la tensión en bornes respecto a la capacidad suministrada por la batería, comparándola con el modelo. Los parámetros del modelo y la gráfica de descarga corresponden a los valores experimentales de una batería Li-Ion ANR26650M de 2500 mAh (A123 Systems, 2012) (Ahmed, 2016) para una intensidad de descarga de 5 A (2C). La extracción de los valores de la gráfica de descarga de la batería se hace con ayuda de la aplicación ScanIT (van Baten, 2017).

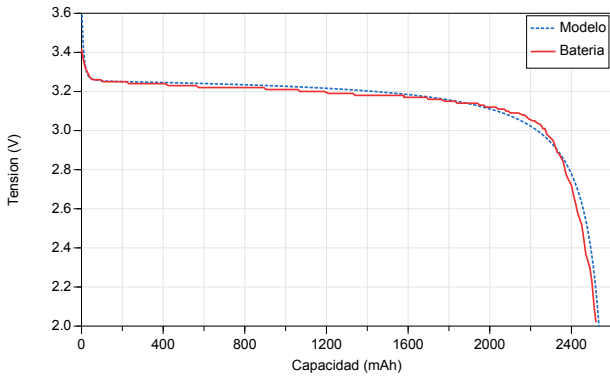


Figura 4: Gráficas de descarga del modelo según ecuación 1 y batería, para una intensidad de 5 A (2C).

En la bibliografía ((Berecibar et al., 2016) y (Petzl and Danzer, 2013)) se hace referencia a observaciones de un comportamiento experimental particular en baterías LiFePo<sub>4</sub> y que el modelo genérico anteriormente presentado no describe. El comportamiento particular se puede apreciar en la aparición de dos zonas tensión extremadamente planas coincidiendo con los valores de 30-60 % y 80-90 % SOC de la batería, debidas a las fases de intercalación/desintercalación del Litio.

Se propone una variación del modelo inicial basado en la ecuación (1) que permite modelar el comportamiento particular encontrado en las baterías LiFePo<sub>4</sub> y que supone la principal contribución del presente trabajo.

La modificación propuesta, consiste en añadir a la ecuación (1) un nuevo término  $D$  que representa el decaimiento de la tensión en bornes característico de este tipo de baterías, que responde a la ecuación (10) y que necesita de la determinación de una serie de puntos singulares sobre la curva de descarga, coincidiendo con el decaimiento.

Los puntos singulares adicionales considerados necesarios para la determinación de  $D$  se señalan en la figura 5, que representa la gráfica de descarga experimental del bloque de baterías B-Box 5.0 tipo LiFePo<sub>4</sub>. En la sección 3 se tienen los detalles del banco de ensayos utilizado.

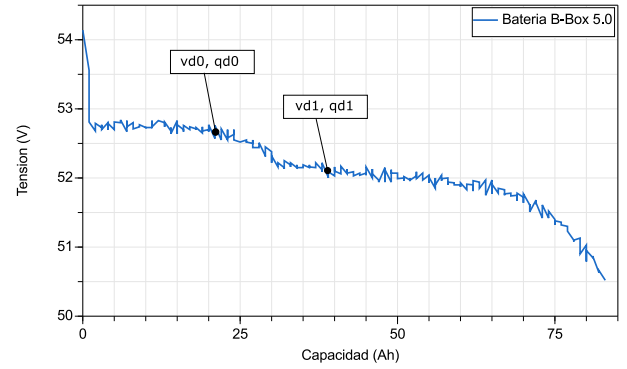


Figura 5: Puntos de inicio y fin del decaimiento de la gráfica de descarga para una intensidad de 20 A (0.2C)

$$E_{bat} = E_0(i_{bat}) - K \frac{q_{Max}}{q_{Max} - it} it + R_p i_{bat} + Ae^{-B \cdot it} - D \quad (10)$$

En la que,

$$D = -N + \left( \frac{-N(Q - P)}{|M + (Q - P)^2|^{0.5}} \right) \quad (11)$$

$$N = \frac{v_{d0} - v_{d1}}{2} \quad (12)$$

$$P = \frac{q_{d1} + q_{d0}}{2} \quad (13)$$

$$M = \frac{M_0 + M_1}{2} \quad (14)$$

$$M_0 = \left( \left( -\frac{N(q_{d0} - P)}{v_{d0} + N} \right)^2 - (q_{d0} - P)^2 \right) \quad (15)$$

$$M_1 = \left( \left( -\frac{N(q_{d1} - P)}{v_{d1} + N} \right)^2 - (q_{d1} - P)^2 \right) \quad (16)$$

La lista de parámetros y variables adicionales se detallan en la tabla 2.

### 3. Banco de ensayos y experimentos

La microrred utilizada para realizar experimentos está instalada en el Centro Mixto CIESOL, en la Universidad de Almería y su esquema se puede observar en la figura 6. Está compuesta de cuatro paneles fotovoltaicos de 260 W de potencia nominal cada uno, conectados a un convertidor DC/DC que implementa un algoritmo de seguimiento de máxima potencia (MPPT), entregando la potencia en forma de corriente continua al bus (DC link). La microrred dispone de un regulador/inversor Quattro de Victron Energy (Charger Inverter) que controla el estado de carga de las baterías e intercambia energía eléctrica con la red de alterna, aportando electricidad a las cargas de corriente alterna (AC). El vehículo eléctrico que aparece en las figuras 1 y 6 puede proveer o consumir energía de la microrred de acuerdo con una estrategia de control determinada (Torres-Moreno et al., 2018).

Tabla 1: Parámetros y variables principales del modelo.

Nombre	Descripción	Parámetro/Variable	Unidades
$E_{bat}$	Tensión en bornes de la batería	V	V
$A$	Amplitud de la zona exponencial en voltios	P	V
$B$	Inversa de constante de tiempo de zona exponencial	P	Ah <sup>-1</sup>
$q_{Max}$	Capacidad máxima de la batería	P	Ah
$K$	Tensión de polarización	P	V
$E_0$	Voltaje constante de la batería	P	V
$R$	Resistencia interna de la batería	P	Ω
$i_{bat}$	Intensidad de corriente hacia la batería	V	A
$it$	Valor integrado de la intensidad, carga acumulada	V	Ah
$R_p$	Resistencia de polarización de la batería	V	Ω
$SOC$	Estado de carga de la batería	V	%
$v_{Full}$	Tensión de la batería a plena carga	P	V
$v_{Exp}$	Tensión de la batería al final de la zona exponencial	P	V
$q_{Exp}$	Carga de la batería al final de la zona exponencial	P	Ah
$v_{Nom}$	Tensión de la batería al final de la zona nominal	P	V
$q_{Nom}$	Carga de la batería al final de la zona nominal	P	Ah
$ratedCapacity$	Capacidad nominal de la batería	P	Ah
$L_1$	Ajuste dimensional tensión polarización	P	Ah <sup>-1</sup>
$L_2$	Ajuste dimensional resistencia polarización	P	A <sup>-1</sup>

Tabla 2: Parámetros y variables adicionales para el cálculo del decaimiento de las baterías LFP.

Nombre	Descripción	Parámetro/Variable	Unidades
$D$	Decaimiento de la tensión en bornes de las baterías LFP	V	V
$v_{d0}$	Tensión en bornes de la batería al inicio del decaimiento	P	V
$q_{d0}$	Carga de la batería al inicio del decaimiento	P	Ah
$v_{d1}$	Tensión en bornes de la batería al final del decaimiento	P	V
$q_{d1}$	Carga de la batería al final del decaimiento	P	Ah
$Q$	Carga restante en la batería	V	Ah

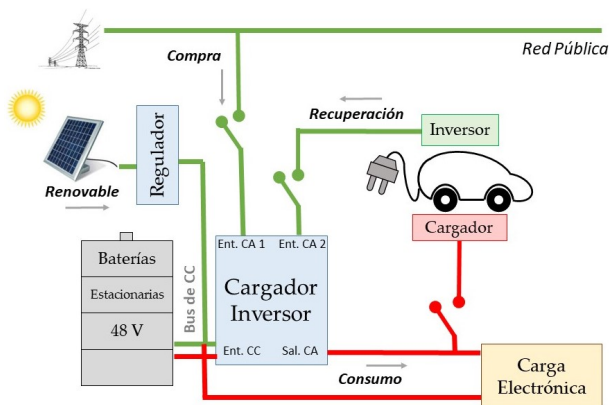


Figura 6: Esquema de la microrred utilizada como banco de ensayos.

ensayos en la microrred siguiendo la siguiente secuencia cada uno de ellos:

1. Desde un estado de carga inicial, las baterías fueron descargadas hasta el 10 % de su capacidad nominal.
2. Posteriormente se realiza un ciclo de carga a 10 A de corriente y a carga flotante, hasta su carga completa.
3. Finalmente, desde el estado de carga alcanzado en el paso anterior, se realiza una descarga a una intensidad de 20 A (0.2C) hasta alcanzar de nuevo el 10 % de su capacidad nominal.

#### 4. Validación y Calibración del nuevo modelo

La validación y calibración del modelo propuesto se han realizado con la librería Design.Calibration suministrada en la herramienta Dymola<sup>®</sup>, desarrollada para la calibración de modelos implementados en Modelica<sup>®</sup> mediante técnicas de optimización multicriterio con restricciones. Esta librería facilita la calibración de modelos mediante una interfaz de usuario interactiva desde Dymola<sup>®</sup>, a partir de los datos experimentales. Más información sobre las técnicas aplicadas en esta librería se puede encontrar en ((Elmqvist et al., 2005) , (Olsson et al.,

El bloque de baterías utilizado es del modelo U3A1-50P-A, B-Box 5.0, del tipo LiFePo<sub>4</sub>, con tensión nominal de salida de 51.2 Vcc y capacidad nominal de 100 Ah de BYD Company Limited. La batería U3A1-50P-A está compuesta por 32 celdas tipo C20 de 3.2 V - 25 Ah, conectadas en serie (S)-paralelo (P) (8S-2P-2S) (TÜV SÜD Certification and Testing (China) Co. Ltd., 2016). El bloque de baterías B-BOX5.0 está compuesto de 2 baterías U3A1-50P-A conectadas en paralelo.

Para la obtención de datos experimentales se realizaron dos

2006)) así como en el manual de la herramienta (Dymola - Dynamic Modeling Laboratory - User Manual, 2018).

Para un ajuste inicial se han elegido como parámetros del modelo:  $A$ ,  $K$ ,  $B$ ,  $q_{Max}$ ,  $v_{d0}$ ,  $v_{d1}$ ,  $q_{d0}$ ,  $q_{d1}$ . Se obtienen estimaciones iniciales de estos parámetros siguiendo el procedimiento indicado en (Tremblay and Dessaint, 2009) (Brondani et al., 2017) a partir de la gráfica de descarga representada en la figura 7.

El ensayo representado es una descarga realizada a intensidad constante de 20 A (0.2C), partiendo de un estado de carga completa y finalizando cuando el  $SOC$  llegaba al 10%. Se ha obtenido como estimación inicial para los parámetros, el siguiente conjunto de valores:  $A = 0,075V$ ,  $K = 0,0059V$ ,  $B = 120Ah^{-1}$ ,  $q_{Max} = 105Ah$ ,  $v_{d0} = 53,05V$ ,  $v_{d1} = 52,50V$ ,  $q_{d0} = 16Ah$ ,  $q_{d1} = 25Ah$ ,  $SOC_{inicial} = 100\%$ .

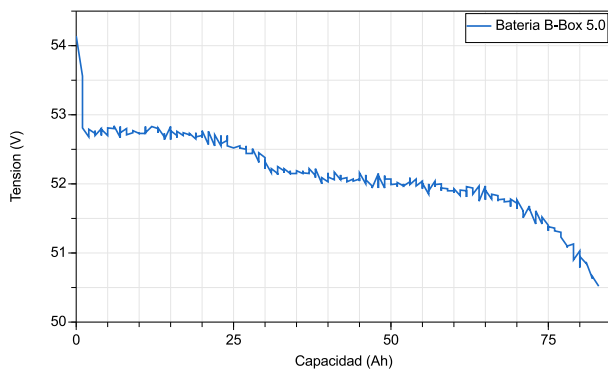


Figura 7: Gráfica de descarga a 20 A (0.2C) del equipo B-Box 5.0

En el procedimiento de calibración se han aplicado los registros experimentales obtenidos en el banco de ensayos. Inicialmente se ha realizado una validación previa del modelo propuesto.

#### 4.1. Validación Previa

La validación previa ha consistido en comparar los resultados experimentales con el resultado del modelo propuesto basado en la ecuación (10), utilizando los valores de los parámetros inicialmente estimados. El modelo se ha sometido a las condiciones de contorno registradas en el experimento real y definidas por una intensidad eléctrica de descarga. En la figura 8 se muestra el modelo del experimento con componentes Modelica® donde se observa el generador dependiente de intensidad eléctrica ( $signalCurrent$ ), instanciado de la MSL, definiendo la condición de contorno al modelo de la batería y que toma los valores del experimento real.

Realizando una simulación del modelo y leyendo los registros experimentales del ensayo, se puede observar que la estimación inicial proporciona los resultados presentados en la figura 9.

Tal como se puede apreciar, los resultados del modelo con los parámetros inicialmente estimados siguen la forma de la curva aunque con una desviación que varía con el tiempo. Esta desviación motivó el planteamiento de recalibrar el vector de parámetros independientes del modelo.

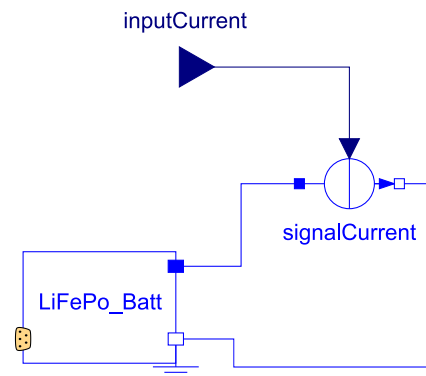


Figura 8: Modelo para calibración con entrada de intensidad de descarga

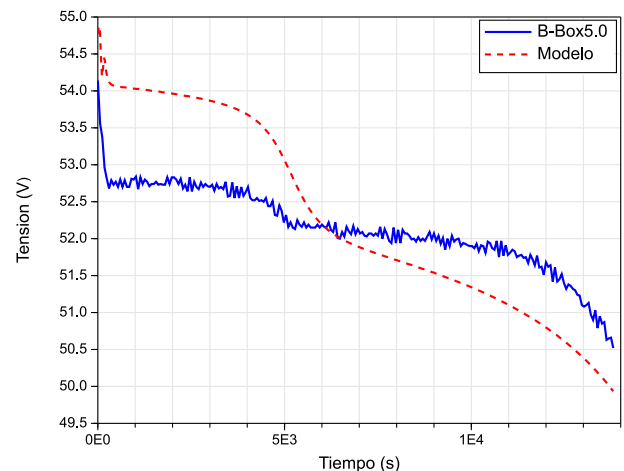


Figura 9: Resultados de la validación previa

#### 4.2. Calibración con Design.Calibration

El objetivo de la calibración es el de obtener el vector de parámetros del modelo que proporcione el mejor ajuste entre el comportamiento real de la batería y el comportamiento simulado por el modelo. El primer paso consiste en determinar cuáles son los parámetros a elegir para el ajuste. Para identificar dichos parámetros a ajustar se realizó un análisis de sensibilidad sobre un conjunto extendido de parámetros, utilizando las rutinas implementadas en Design.Calibration para este tipo de análisis. Fueron seleccionados aquellos parámetros que presentaron un nivel de sensibilidad suficiente sobre el comportamiento del modelo, que fueron:  $v_{Full}$ ,  $v_{Exp}$ ,  $q_{Exp}$ ,  $v_{Nom}$ ,  $q_{Nom}$ ,  $v_{d0}$ ,  $v_{d1}$ ,  $q_{d0}$ ,  $q_{d1}$ ,  $ratedCapacity$  y el valor inicial del  $SOC$  ( $SOC_{inicial}$ ).

El procedimiento de calibración realizado por Dymola® consiste en la resolución de un problema de optimización multicriterio con restricciones, en el que la función de coste se define como una medida de la diferencia entre los datos experimentales y el resultado de la simulación para un vector de parámetros determinado. El vector de parámetros es la *variable* sobre la que se itera partiendo de un valor inicial y hasta encontrar una solución.

En la figura 10 se compara el resultado del registro experimental con el resultado del modelo propuesto, parametrizado con los resultados obtenidos por Design.Calibration de

Dymola<sup>®</sup> para el vector de parámetros seleccionado y que se tiene en la tabla 3, columna II. Esta solución se ha encontrado tras 401 iteraciones, a partir del valor inicial indicado en la tabla 3 columna I, con un tiempo de procesamiento necesario de 48 segundos.

Tabla 3: Parámetros obtenidos tras la calibración del modelo según ecuación (10) en columna II y según ecuación (1) en columna III.

Parámetro	I Valor inicial	II Valor final ecuación (10)	III Valor final ecuación (1)
$V_{Nom}$	52.60	53.37	53.58
$q_{Nom}$	54.00	54.00	54.01
$ratedCapacity$	100.00	90.00	100.00
$V_{Full}$	52.70	53.55	53.83
$V_{Exp}$	51.50	51.80	51.92
$q_{Exp}$	1.00	0.90	0.90
$vd0$	53.05	52.97	No aplica
$vd1$	52.50	52.58	No aplica
$qd0$	16.00	17.60	No aplica
$qd1$	25.00	22.97	No aplica
$SOC_{inicial}$	100.00	99.49	100.00

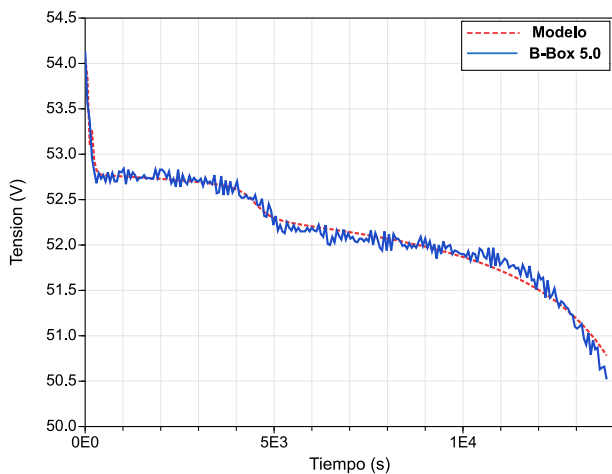


Figura 10: Gráfica del resultado de la calibración del modelo según ecuación (10)

Observando los resultados de la figura 10 se puede apreciar como el modelo propuesto en el presente trabajo de acuerdo a la ecuación 10, una vez calibrado, simula adecuadamente el comportamiento particular de las baterías de LiFePo<sub>4</sub>.

Al objeto de cuantificar la mejora obtenida con respecto al modelo original de partida según la ecuación 1, se procede igualmente a su calibración con ayuda de la librería Design Calibration de Dymola<sup>®</sup>. La estimación de los parámetros se hace según lo indicado en la sección 4 y los valores iniciales de los parámetros son los indicados en la tabla 3, columna I, para  $v_{Full}$ ,  $v_{Exp}$ ,  $q_{Exp}$ ,  $v_{Nom}$ ,  $q_{Nom}$ ,  $ratedCapacity$  y  $socStart$ . En la tabla 3, columna III, se tienen los valores resultantes de la calibración y en la figura 11 se tiene el resultado gráfico del modelo original calibrado, comparado con los resultados experimentales.

En la figura 12 se tiene la comparación gráfica de la simulación de los modelos original (LiIon) y propuesto en el presente trabajo (LiFePo<sub>4</sub>) con respecto al resultado experimental del grupo de baterías B-Box5.0 para una intensidad de descarga de 20 A.

Para la cuantificación de la bondad del ajuste de ambos modelos respecto a los resultados experimentales, se utiliza el indicador de ajuste NRMSE (Normalized Root Mean Square Error - Raíz normalizada del error cuadrado medio) implementado en Modelica<sup>®</sup> en base al módulo de cálculo del NRMSE según (ZambranoBigiarini, 2017). Los valores obtenidos son de un NRMSE = 2.98 % para el modelo propuesto en el presente trabajo (LiFePo<sub>4</sub>), respecto a un NRMSE = 4.93 % del modelo de partida (LiIon).

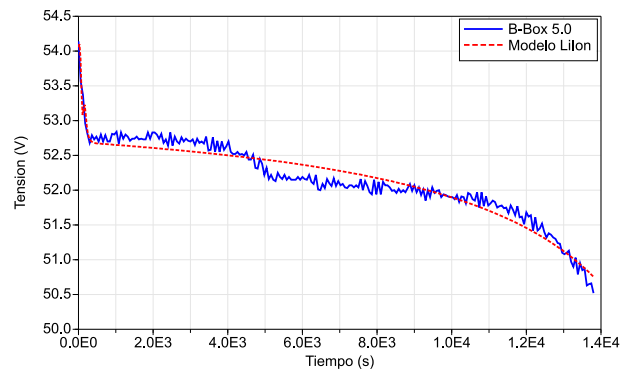


Figura 11: Gráfica del resultados de la calibración del modelo según ecuación (1)

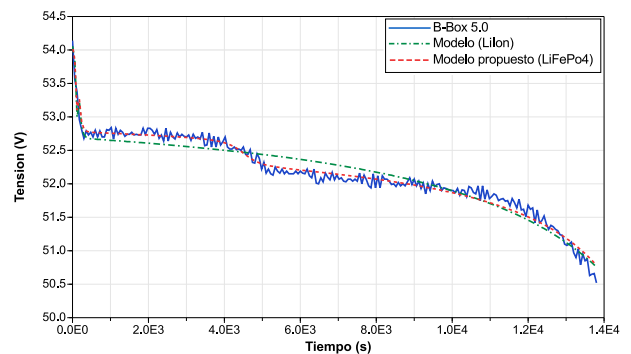


Figura 12: Gráfica con la comparación de resultados de ambos modelos con respecto a los valores experimentales

### 5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un nuevo modelo matemático de baterías tipo LiFePo<sub>4</sub> que predice las diferencias de comportamiento de este tipo de baterías respecto a modelos genéricos en la bibliografía existente. Se han realizado ensayos en un banco de pruebas experimental para validar y calibrar el comportamiento del modelo propuesto respecto a los mismos. Se ha utilizado para la implementación del modelo el lenguaje de modelado Modelica<sup>®</sup> y la herramienta Dymola<sup>®</sup>. Para la validación y calibración se ha utilizado la librería Design Optimization suministrada con Dymola<sup>®</sup>.

El modelo propuesto obtiene un mejor ajuste respecto a los datos experimentales ( $NRMS E = 2,98 \%$ ) para las baterías  $LiFePO_4$  que los modelos genéricos para baterías  $LiIon$  encontrados en la bibliografía ( $NRMS E = 4,93 \%$ ).

En futuros trabajos, se utilizará el nuevo modelo dinámico propuesto como uno de los componentes del SEH, que agrupa los diferentes elementos componentes de un vehículo eléctrico que aportan o consumen energía, y que permite la simulación dinámica del vehículo completo, su control y el análisis del balance energético en su utilización. Uno de los objetivos finales es desarrollar algoritmos de control y gestión de energía eficientes en vehículos eléctricos urbanos ligeros alimentados de distintas fuentes renovables de energía.

## 6. Agradecimientos

Al personal técnico del Grupo de Automática, Robótica y Mecatrónica de la Universidad de Almería (TEP-197) a cargo de la microrred experimental, por su inestimable ayuda en la obtención de los registros experimentales utilizados.

El presente trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto DPI2017-85007-R del Plan Nacional R+D+i del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Reino de España y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

## Referencias

- A123 Systems, 2012. Nanophosphate High Power Lithium Ion Cell ANR26650M1-B.
- Ahmed, M., 2016. Modeling Lithium-ion Battery Chargers in PLECS®. Tech. rep.
- Anseán, D., González, M., Viera, J. C., Álvarez, J. C., Blanco, C., García, V. M., 2013. Evaluation of  $LiFePO_4$  batteries for Electric Vehicle applications. In: 2013 Int. Conf. New Concepts Smart Cities Foster. Public Priv. Alliances. IEEE, Gijón, Spain, p. 8.  
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6708211>  
DOI: 10.1109/SmartMILE.2013.6708211
- Berecibar, M., Garmendia, M., Gandiaga, I., Crego, J., Villarreal, I., 2016. State of health estimation algorithm of  $LiFePO_4$  battery packs based on differential voltage curves for battery management system application. *Energy* 103, 784–796.  
DOI: 10.1016/j.energy.2016.02.163
- Brondani, M. D. F., Sausen, A. T. Z. R., Sausen, P. S., Binelo, M. O., 2017. Battery Model Parameters Estimation Using Simulated Annealing. *TEMA (São Carlos)* 18 (1), 127.  
URL: <https://tema.sbmec.org.br/tema/article/view/1003>  
DOI: 10.5540/tema.2017.018.01.0127
- Dempsey, M., Gäfvert, M., Harman, P., Kral, C., Otter, M., Treffinger, P., 2006. Coordinated automotive libraries for vehicle system modelling. In: 5th Model. Conf. 2006. The Modelica Association, Vienna, Austria, pp. 33–41.  
URL: <https://www.modelica.org/events/modelica2006/Proceedings/sessions/Session1b2.pdf>
- Dizqah, A. M., Busawon, K., Fritzon, P., 2012. Acausal modeling and simulation of the standalone solar power systems as hybrid DAEs. In: 53rd Int. Conf. Scand. Simul. Soc. pp. 1–7.
- Dymola - Dynamic Modeling Laboratory - User Manual, 2018. Dymola.  
URL: <http://www.dymola.com>
- Elmqvist, H., Olsson, H., Mattsson, S. E., Brück, D., Schweiger, C., Joos, D., Otter, M., 2005. Optimization for design and parameter estimation. In: In 4th International Modelica Conference.
- Fritzon, P., 2015. Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: A Cyber-Physical Approach, 2nd Edition. Wiley.
- Gómez, F. J., Yebra, L. J., Giménez, A., 2018. Modelling a Smart-Grid for a Solar Powered Electric Vehicle. In: Technische Universität Wien (Ed.), 9th Vienna Conf. Math. Model. Vol. 55. ARGESIM Publisher, Vienna, Vienna, Austria, pp. 5–6.  
URL: [https://www.asim-gi.org/fileadmin/user\\_upload\\_argesim/ARGESIM\\_Publications\\_OA/MATHMOD\\_Publications\\_OA/MATHMOD\\_2018\\_AR55/articles/a55113.arep.55.pdf](https://www.asim-gi.org/fileadmin/user_upload_argesim/ARGESIM_Publications_OA/MATHMOD_Publications_OA/MATHMOD_2018_AR55/articles/a55113.arep.55.pdf)  
DOI: 10.11128/arep.55.a55113
- Hausmann, A., Depcik, C., 2013. Expanding the Peukert equation for battery capacity modeling through inclusion of a temperature dependency. *J. Power Sources* 235, 148–158.  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313002322>  
DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2013.01.174
- Kroeze, R. C., Krein, P. T., 2008. Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations. In: 2008 IEEE Power Electron. Spec. Conf. IEEE, Rhodes, Greece, pp. 1336–1342.  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4592119/>  
DOI: 10.1109/PESC.2008.4592119
- NREL, 2015. Technoeconomic Modeling of Battery Energy Storage in SAM Technoeconomic Modeling of Battery Energy Storage in SAM. Tech. Rep. September.  
URL: <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64641.pdf>
- Olsson, H., Mattsson, S. E., Hilding Elmqvist, 2006. Calibration of Static Models using Dymola. In: Proc. 5th Int. Model. Conf. The Modelica Association (<http://www.modelica.org/>) and Arsenal Research (<http://www.arsenal.ac.at/>), Vienna, Austria, pp. 615–620.  
URL: <https://modelica.org/events/modelica2006/Proceedings/sessions/Session6a3.pdf>
- Petzl, M., Danzer, M. A., 2013. Advancements in OCV measurement and analysis for lithium-ion batteries. *IEEE Trans. Energy Convers.* 28 (3), 675–681.  
DOI: 10.1109/TEC.2013.2259490
- Seaman, A., Dao, T.-S., McPhee, J., Jun 2014. A survey of mathematics-based equivalent-circuit and electrochemical battery models for hybrid and electric vehicle simulation. *J. Power Sources* 256, 410–423.  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775314000810>  
DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2014.01.057
- Torres-Moreno, J. L., Gimenez-Fernandez, A., Perez-Garcia, M., Rodriguez, F., 2018. Energy management strategy for micro-grids with pv-battery systems and electric vehicles. *Energies* 11 (3).  
URL: <http://www.mdpi.com/1996-1073/11/3/522>  
DOI: 10.3390/en11030522
- Tremblay, O., Dessaint, L., 2009. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electr. Veh. J.* 3, 1–10.
- TÜV SÜD Certification and Testing (China) Co. Ltd., 2016. Test Report IEC-62619A BYD B-Box. Tech. rep., TÜV SÜD Certification and Testing (China) Co. Ltd., Shenzhen (China).  
URL: <https://www1.fenecon.de/web/content/34638>
- van Baten, J., 2017. ScanIt.  
URL: <https://www.amsterchem.com/scanit.html>
- Wang, W., Chung, H. S. H., Zhang, J., 2014. Near-real-time parameter estimation of an electrical battery model with multiple time constants and SoC-dependent capacitance. 2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014 29 (11), 3977–3984.  
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6714474>  
DOI: 10.1109/ECCE.2014.6953942
- ZambranoBigiarini, M., 2017. hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series.  
URL: <http://hzambran.github.io/hydroGOF/>  
DOI: 10.5281/zenodo.840087
- Zhang, W.-J., mar 2011. Structure and performance of  $LiFePO_4$  cathode materials: A review. *J. Power Sources* 196 (6), 2962–2970.  
URL: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531002104X\[#\]bib0005](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531002104X[#]bib0005)  
DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2010.11.113