

# Modelado electro-térmico de un módulo de baterías cilíndricas de ion de litio para el desarrollo de sistemas de gestión térmica en vehículos eléctricos

Ane Sainz de la Maza<sup>1,2</sup>, Ane Gelbentzu<sup>1,2</sup>, Edorta Ibarra<sup>1</sup>, Beñat Arteta<sup>2</sup>, Eneko Otaola<sup>2</sup>, Elena Trancho<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Ingeniero Torres Quevedo <sup>2</sup>TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), 48160 Derio, España

**Abstract**—Los packs de baterías de ion de litio (Li-ion) utilizados en los vehículos eléctricos e híbridos actuales son especialmente sensibles a las condiciones ambientales. Para garantizar un funcionamiento adecuado de los mismos y asegurar un ciclo de vida prolongado, las baterías deben operar con una temperatura de entre los 20°C y los 40°C. Por ello, los vehículos deben integrar un sistema para la gestión térmica de las baterías (BTMS, *Battery Thermal Management System*, en inglés). En este artículo se desarrolla un modelo electro-térmico preciso que representa el comportamiento de un módulo de baterías de automoción con configuración cilíndrica. El modelo, desarrollado en Matlab/Simulink, se utilizará para la validación del software de control de una futura BTMS y su unidad electrónica de control (ECU, *Electronic Control Unit*, en inglés) siguiendo el paradigma MBD (*Model Based Design*, en inglés). Se presentan los modelos matemáticos que permiten la caracterización eléctrica y térmica de la planta, y se muestran resultados de simulación que ejemplifican su funcionamiento.

**Index Terms**—Sistemas de almacenamiento de energía, vehículo eléctrico, baterías de Ion de Litio, modelado térmico, MBD.

## I. INTRODUCCIÓN

Los packs de baterías basados en tecnologías de ion de litio (Li-ion) se están perfilando como una de las soluciones más populares para el almacenamiento de energía eléctrica en aplicaciones de electromovilidad [1]–[3]. Su proliferación en vehículos eléctricos e híbridos se debe a que las baterías de Li-ion se caracterizan por tener una alta densidad de energía, una alta eficiencia, un ciclo de vida prolongado, un bajo ratio de auto-descarga y por estar libres de efectos de memoria [3]. Principalmente existen tres formatos de celda [4]: cilíndrica, prismática y de tipo *pouch*. En el contexto del vehículo eléctrico, los formatos cilíndricos cuentan con ligeras ventajas con respecto a las demás tecnologías [5].

Los distintos componentes de los vehículos eléctricos operan habitualmente bajo condiciones climáticas extremas (altas y/o bajas temperaturas). Las baterías de Li-ion son especialmente sensibles a estas condiciones ambientales adversas. En particular, es necesario mantener la temperatura de operación del pack de baterías entre los 20°C y 40°C para lograr un buen funcionamiento del mismo y garantizar un largo ciclo de vida [6]. Por todo ello, es necesario el desarrollo de sistemas de gestión térmica para baterías (BTMS, *Battery Thermal Management System*, en inglés) que cuenten con un software

de control y supervisión, además de los correspondientes circuitos de calentamiento y refrigeración activos [7]. Los más comunes son la refrigeración líquida y la refrigeración por aire [8].

Durante el desarrollo del BTMS, es necesario implementar su software. El diseño basado en modelos (MBD, *Model Based Design*, en inglés) es un paradigma de trabajo que cuenta con una amplia implantación en el sector de la automoción [9]. Al aplicar el procedimiento MBD, el software de control y supervisión se debe desarrollar en un simulador, mediante modelos, para posteriormente proceder a generar el código mediante herramientas de generación automática. De este modo, se evitan posibles errores de codificación [10]. Este procedimiento tiene como objetivo el garantizar la fiabilidad del software, facilitando alcanzar los estrictos niveles ASIL (*Automotive Safety Integrity Level*, en inglés) de seguridad fijados por la norma ISO 26262 de automoción.

El modelo de planta es un elemento fundamental dentro del paradigma MBD, ya que se utiliza como ejecutable de especificaciones durante gran parte de la etapa de desarrollo software [9]. Por ello, en este trabajo se realiza una revisión del estado del arte relativo al modelado electro-térmico de packs de baterías de Li-ion con configuración cilíndrica y refrigeración por aire. Posteriormente, se desarrolla un modelo electro-térmico detallado en Matlab/Simulink: se modela el comportamiento eléctrico de las celdas que componen un módulo de la batería mediante la *toolbox Simscape Battery*, mientras que el modelo térmico y de cálculo de pérdidas de potencia se desarrolla con bloques estándar de Simulink. A continuación se describen los modelos desarrollados y se presenta una serie de simulaciones que ilustran el comportamiento de la planta.

## II. MODELO ELÉCTRICO PARA CELDAS DE LI-ION

De acuerdo con la literatura científica, una de las formas más habituales para simular el comportamiento eléctrico de una celda de Li-ion consiste en utilizar un circuito equivalente Randles [11], tal y como muestra la Fig. 1. En comparación con otros modelos electro-químicos más detallados [12], la aproximación Randles permite obtener una buena fidelidad en los resultados simulación con una carga computacional moderada. Esto es un factor importante a tener en cuenta durante el procedimiento MBD, ya que en un futuro se pretende

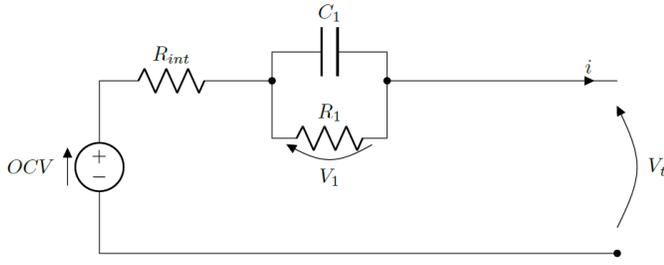


Fig. 1: Circuito eléctrico equivalente Randles de primer orden para el modelado eléctrico de una celda de batería de Li-ion.

desarrollar un sistema Hardware-in-the-loop (HiL) [13] para validar la ECU (*Electronic Control Unit*, en inglés) del BTMS siguiendo la V-de-diseño del MBD [14].

La Fig. 1 muestra un circuito equivalente Randles de primer orden. A partir de los datos disponibles de las celdas, el comportamiento dinámico de las mismas se ha modelado mediante un circuito tanque con  $R_1(SoC, T)$  y  $C_1(SoC, T)$ , donde  $SoC$  y  $T$  representan el estado de carga y la temperatura de la batería, respectivamente. Por su parte,  $OCV(SoC, T)$  es la tensión de circuito abierto (OCV, *Open Circuit Voltage*, en inglés), mientras que  $R_{int}(SoC, T)$  representa la resistencia interna de la celda.

En particular, la dinámica de las tensiones del circuito tanque, para un instante discreto  $k + 1$ , se define como:

$$V_1(k+1) = e^{-\frac{T_s}{\tau_1}} \cdot V_1(k) + R_1 \cdot (1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_1}}) \cdot i(k), \quad (1)$$

donde  $T_s$  es el paso de simulación del modelo y  $\tau_1 = R_1 C_1$  es la constante de tiempo del circuito tanque.

La implementación del modelo eléctrico en la plataforma Matlab/Simulink se ha realizado utilizando el bloque *battery* (*LUT based*) de la *toolbox Simscape Battery*. Este bloque permite describir la evolución de los distintos parámetros del modelo ( $OCV$ ,  $R_{int}$ ,  $R_1$  y  $\tau_1$ ) en función del  $SoC$  y  $T$ , almacenando dichas relaciones en tablas (LUT, *Look-up Table*, en inglés). Posteriormente, el bloque se introduce en el circuito Simscape general que representa el funcionamiento eléctrico del sistema de propulsión y de carga del vehículo.

Los valores numéricos de las LUTs se han generado a partir de datos disponibles a través del fabricante. Se dispone de valores distintos de los parámetros en función de que el sistema se encuentre operando en modo carga [corriente  $i(k) < 0$ ] o descarga [ $i(k) > 0$ ].

### III. MODELADO TÉRMICO DE MÓDULO DE BATERÍAS CON CONFIGURACIÓN CILÍNDRICA REFRIGERADO POR AIRE

#### III-A. Introducción

Debido a su relevancia, el modelado térmico de baterías de Li-ion se ha investigado extensivamente durante las últimas dos décadas [4], [5], [8], [15]–[29]. En general, estos modelos utilizan ecuaciones diferenciales para describir el balance de energía de los sistemas de almacenamiento. A continuación, se revisan y describen los métodos más empleados, comenzando por el caso que considera una única celda, para posteriormente extenderlo a múltiples celdas.

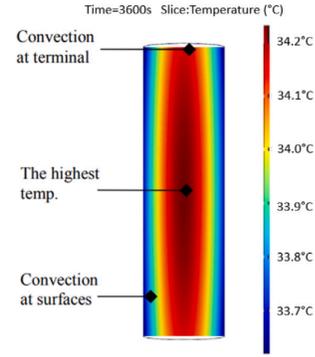


Fig. 2: Ejemplo de gradiente térmico en una celda Li-ion cilíndrica [17].

#### III-B. Modelo térmico unidimensional para una única celda

Este tipo de modelo se limita a describir la transferencia de calor en la dirección radial del cilindro (Fig. 2), ya que esta es muy superior a la transferencia en dirección axial [18]. Las ecuaciones que rigen la transferencia de calor son:

$$C_c \frac{dT_c}{dt} = Q + \frac{T_s - T_c}{R_c}, \quad (2)$$

$$C_s \frac{dT_s}{dt} = \frac{T_f - T_s}{R_u} + \frac{T_s - T_c}{R_c}, \quad (3)$$

donde  $Q$  es el calor generado por la celda,  $T_s$ ,  $T_c$  y  $T_f$  son la temperatura en la superficie de la celda, en el núcleo de la celda y en el fluido refrigerante (aire), respectivamente.  $R_c$  es la resistencia térmica que relaciona la transferencia de calor entre el núcleo y la superficie de la celda a través del fenómeno de conducción. De forma similar, la resistencia térmica  $R_u$  está relacionada con la transferencia de calor entre la superficie de la celda y el ambiente.  $C_c$  es la capacidad térmica del interior de la celda, mientras que  $C_s$  hace referencia a la capacidad correspondiente al revestimiento de la misma. Por último,  $Q$  representa el calor generado en la batería como consecuencia de su funcionamiento, y se puede describir como [30]:

$$Q = i(OCV - V) - i \left( T_c \frac{dOCV}{dT_c} \right) = R_{cell} \cdot i^2 - i \cdot T_c \frac{\Delta S}{nF}, \quad (4)$$

donde  $R_{cell} = R_{int} + R_1$ . El calor total generado por la batería de Li-ion se divide entre una parte reversible y otra irreversible. El primer término en (4) representa las pérdidas de energía debido al efecto Joule, donde el calor generado no puede recuperarse para realizar trabajo útil y se disipa al entorno en forma de calor. El segundo término (donde  $n$  es el número de electrones transferidos durante la descarga y  $F$  la constante de Faraday) hace referencia a la variación de entropía, la cual es reversible y se debe a las reacciones electroquímicas durante los procesos de carga y descarga [8]. Al operar a niveles de corriente lo suficientemente elevados, el efecto Joule tiene una mayor influencia que la variación de entropía. Por ello, en múltiples estudios se desprecia este segundo término. Adicionalmente, cabe destacar que el calor producido por cambio de fase es otra fuente de calor en las baterías Li-ion, aunque este fenómeno se desprecia, por lo general, en la literatura científica [31].

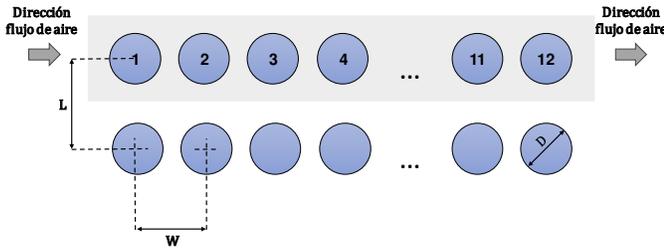


Fig. 3: Diagrama de módulo de baterías cilíndricas con múltiples celdas.

El envejecimiento de las baterías influye en la generación de calor, especialmente en la parte irreversible, ya que aumenta la resistencia interna.

### III-C. Modelo térmico unidimensional para una cadena de celdas en serie

En la práctica y en aplicaciones de electromovilidad, varias celdas se disponen en un módulo en diversas configuraciones serie y/o paralelo (con el objetivo de incrementar los niveles de tensión y corriente). Por ello, resulta necesario extender el modelo presentado en el apartado III-B, considerando la transferencia de calor entre  $n$  celdas adyacentes de una misma fila (Fig. 3) [19]:

$$C_c \frac{dT_{c,i}}{dt} = Q_i + \frac{T_{s,i} - T_{c,i}}{R_c}, \quad (5)$$

$$C_s \frac{dT_{s,i}}{dt} = \frac{T_{f,i} - T_{s,i}}{R_u} + \frac{T_{s,i} - T_{c,i}}{R_c} + Q_{cc,i}, \quad (6)$$

donde  $i$  representa el número de celda y  $Q_{cc,i}$  la transferencia de calor entre celdas adyacentes de una misma cadena de celdas en serie. Este término es calculado de la siguiente manera:

$$Q_{cc,i} = \begin{cases} (T_{s,2} - T_{s,1})/R_{cc}, & i = 1, \\ (T_{s,i-1} + T_{s,i+1} - 2T_{s,i})/R_{cc}, & i = 2, \dots, n-1, \\ (T_{s,n-1} - T_{s,n})/R_{cc}, & i = n, \end{cases} \quad (7)$$

donde  $R_{cc}$  es un parámetro agregado que representa la resistencia de conducción de calor de la pestaña y otras posibles conexiones entre celdas, así como el espacio de aire [19]. Se supone que no hay transferencia de calor entre las dos celdas colocadas en paralelo de una misma línea por tener ambas las mismas características y estar sometidas a las mismas condiciones (es decir, por no haber un gradiente de temperatura entre ambas).

Por su parte, se tiene en cuenta el aumento de la temperatura del fluido refrigerante (aire) a medida que extrae el calor de las dos cadenas de celdas en serie colocadas en paralelo:

$$T_{f,i} = \begin{cases} T_{f,in}, & i = 1, \\ T_{f,i-1} + 2 \cdot (T_{s,i-1} - T_{f,i})/(R_u C_f), & i = 2, \dots, n. \end{cases} \quad (8)$$

donde  $C_f$  es la capacidad térmica del aire ( $W/K$ ) y  $R_u$  la resistencia asociada al fenómeno de convección. Para el cálculo de la capacidad térmica del aire a partir de su poder

calorífico específico, el caudal másico de aire a la entrada se puede definir como:

$$\dot{m} = \rho_f \cdot S_f \cdot v_f, \quad (9)$$

donde  $\rho_f$  es la densidad del aire,  $v_f$  su velocidad y  $S_f$  el área de ventilación.

El refrigerante (en este caso el flujo de aire) fluye a través del espacio entre las celdas desde la entrada y la salida y recoge el calor disipado desde la superficie de la celda mediante convección (Fig. 3). La temperatura del flujo de refrigerante ( $T_f$ ) se irá calentando a medida que avance por las celdas, por lo que dicha temperatura se determina mediante el balance presentado en (8).

### III-D. Modelos térmicos agregados

Cuando se trata de un material con baja conductividad térmica, es de esperar que ocurran gradientes térmicos internamente. Por el contrario, al trabajar con materiales altamente conductivos, es razonable suponer que la resistencia interna es insignificante, lo que resulta en gradientes térmicos mínimos o nulos. Por lo tanto, el enfoque de los modelos térmicos agregados supone que la temperatura de un sólido es uniforme espacialmente (es decir, la temperatura se mantiene constante con la posición y únicamente varía con el tiempo) [18].

Un sistema de parámetros agregado (*lumped thermal model*, en inglés) se puede aplicar si el número de Biot ( $Bi$ ) adimensional es menor o igual a 0,1, lo que se traduce en que la transferencia de calor en la superficie de la batería será mucho mayor que la transferencia por conducción en el interior de la celda.

$$L_c/k \ll 1/h, \quad (10)$$

donde  $k$  es el coeficiente de transferencia de calor por conducción de la celda, en  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  $h$  es el coeficiente de transferencia por convección, en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  y  $L_c = V/A_s$  es la longitud característica, en metros, donde  $V$  es el volumen del sólido y  $A$  su área superficial.

$$Bi = \frac{L_c \cdot h}{k} < 0,1 \quad (11)$$

### III-E. Simplificación de las ecuaciones del modelo térmico agregado

Si se considera que la temperatura de cada celda únicamente varía con el tiempo y no varía radialmente dentro del cilindro que compone la celda ( $Bi < 0,1$ ), esta se puede calcular como:

$$\frac{dT_{s,i}}{dt} = \frac{h \cdot A_s}{m_{cell} \cdot c_{p,cell}} (T_{f,i} - T_{s,i}) + \frac{Q_{gen,i}}{m_{cell} \cdot c_{p,cell}} + \frac{Q_{cc,i}}{m_{cell} \cdot c_{p,cell}}, \quad (12)$$

donde  $m_{cell}$  es la masa de cada celda y donde el primer término a la derecha de la ecuación hace referencia a la transmisión de calor en la superficie de la celda, que se dará principalmente a través de la convección.

En este contexto, el coeficiente de transferencia de calor por convección se puede expresar como:

$$h = \frac{Nu_D \cdot k_f}{d}, \quad (13)$$

donde  $d$  es el diámetro de la celda y  $Nu_D$  es el número de Nusselt, que varía en función de la geometría y la configuración de los cilindros, así como del número de Reynolds ( $Re$ ).

Bajo una situación de convección externa forzada a través de un banco de tubos, se tiene lo siguiente [4]:

$$Nu_D = C_1 \cdot C_2 \cdot Re_{d,max}^m \cdot Pr^{0,36} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{1/4}, \quad (14)$$

donde  $C_1$ ,  $C_2$  y  $m$  son constantes,  $Pr$  es el número de Prandtl,  $Pr_w$  el número de Prandtl evaluado a la temperatura de superficie de la celda, y  $Re_{d,max}$  el número de Reynolds máximo. Para distintos números de Reynolds, las constantes toman los siguientes valores [27]:

$$Nu = \begin{cases} 0,85 Re^{0,4} Pr^{0,61} Pr_w^{-0,25} & 10^0 < Re < 10^2, \\ 0,51 Re^{0,5} Pr^{0,61} Pr_w^{-0,25} & 10^2 < Re < 10^3, \\ 0,27 Re^{0,63} Pr^{0,61} Pr_w^{-0,25} & 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5, \\ 0,021 Re^{0,84} Pr^{0,65} Pr_w^{-0,25} & 2 \cdot 10^5 < Re < 2 \cdot 10^6. \end{cases} \quad (15)$$

Finalmente, la velocidad máxima del flujo de aire en el espacio ( $L-D$ ) entre dos celdas adyacentes se puede calcular a partir de la velocidad  $v$  del espacio libre:

$$v_{max} = \frac{L}{L-D} v. \quad (16)$$

Asimismo, el número de Reynolds se determina como:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v_{max} \cdot D}{\mu_f}, \quad (17)$$

donde  $\rho_f$  y  $\mu_f$  representan la densidad y viscosidad del fluido refrigerante (aire), respectivamente.

Las relaciones del número de Nusselt promedio mostradas en (15) son para bancos de tubos con 16 filas o más. Las mismas expresiones se pueden emplear para un número de filas menor aplicando un factor de corrección al número de Nusselt obtenido [32].

#### IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se ha desarrollado un modelo detallado de un módulo de baterías en Matlab/Simulink, el cual incorpora dos filas de doce celdas conectadas en serie (Fig. 3). El comportamiento eléctrico de las celdas se ha modelado utilizando la *toolbox Simscape Battery*. Por su parte, el modelo térmico de la batería se ha modelado utilizando una función codificada en lenguaje *m*. La tabla I resume los parámetros térmicos mas relevantes del modelo. Por simplicidad y sin pérdida de generalidad, se considera que las doce celdas que componen la batería se encuentran totalmente equilibradas (todas las celdas presentan los mismos parámetros de funcionamiento). Sin embargo, cabe destacar que el modelo desarrollado permite el ajuste individual de todos los parámetros y de las condiciones iniciales, por lo que posibilita el estudio del comportamiento electro-térmico de un sistema en baterías altamente degradado.

TABLA I Parámetros térmicos del pack de baterías simulado.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Calor específico de la celda	$c_{p,cell}$	1000	$J/kg \cdot K$
Calor específico del aire	$c_{p,f}$	1007	$J/kg \cdot K$
Conductividad térmica de la celda	$k_{cell}$	3	$W/m \cdot K$
Conductividad térmica del aluminio	$k_{al}$	218	$W/m \cdot K$
Conductividad térmica del aire	$k_f$	0,026	$W/m \cdot K$
Densidad de la celda	$\rho_{cell}$	2450	$kg \cdot m^3$
Densidad del aire	$\rho_f$	1,185	$kg \cdot m^3$
Masa de la celda	$m_{cell}$	0,1	$kg$
Área de ventilación	$S_a$	0,002	$m^2$
Emisividad	$\epsilon$	0,8	-
Número de Prandtl	$Pr$	0,702	-
Número de Prandtl en la superficie	$Pr_w$	0,7	-

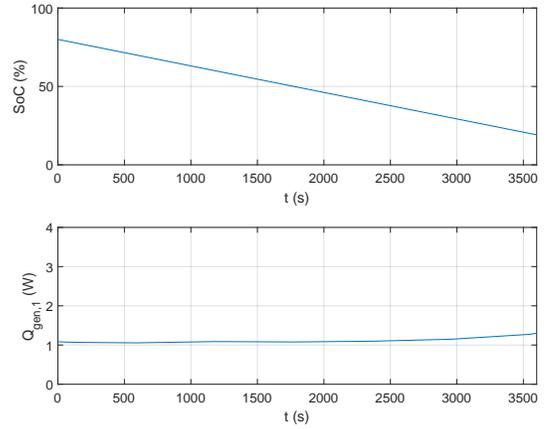


Fig. 4: SoC y calor producido por la celda número uno ( $Q_{gen,1}$ ) del pack de baterías.

Se ha aplicado un ciclo de descarga sobre el pack de baterías. Las celdas se han descargado desde un valor de carga inicial del 80% a un *SoC* del 20% (parte superior de la Fig. 4). El proceso de descarga ha durado 3600 segundos. La eficiencia media del pack de baterías durante el proceso de descarga ha sido del 95,5%. En este contexto, la parte inferior de la Fig. 4 muestra las pérdidas de potencia de la primera celda, las cuales se suponen equivalentes al calor generado  $Q_{gen,1}$ .

La Fig. 5 muestra la evolución temporal de las temperaturas de las doce celdas conectadas en serie en el módulo de baterías. Su variación se corresponde con la variación en el calor generado por las celdas. Se aprecia un crecimiento de la temperatura a bajos índices de *SoC* debido al incremento de la resistencia de la celda, con su consecuente aumento en las pérdidas. Tal y como se esperaba, se observan diferencias en la temperatura de cada una de las celdas. Este fenómeno es debido al calentamiento progresivo de la temperatura del fluido refrigerante (aire)  $T_f$  (Fig. 6), a medida que avanza en la dirección mostrada por la Fig. 3. La variación entre la temperatura de entrada y salida del aire varía notablemente en función de las condiciones estudiadas (tabla II).

Finalmente, la tabla II ilustra cómo la temperatura de las celdas se reduce a medida que se incrementa la velocidad del fluido refrigerante. Sin embargo, a medida que se aumenta esta velocidad, su impacto es cada vez menor en la disminución de la temperatura, mientras que la energía consumida en el sis-

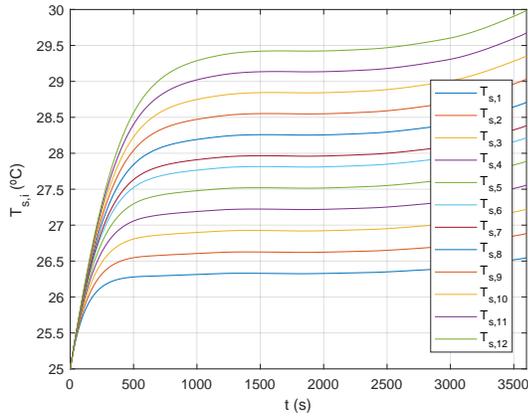


Fig. 5: Evolución de las temperaturas de las doce celdas conectadas en serie del módulo de baterías con convección y velocidad dependiente del vehículo en movimiento ( $v = 3 \text{ m/s}$ ).

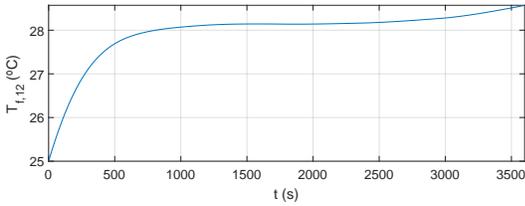


Fig. 6: Evolución de la temperatura de salida del fluido refrigerante en la duodécima celda del módulo de baterías.

TABLA II Estudio de la influencia de la velocidad del aire refrigerante sobre los coeficientes de transferencia de calor por convección. Se considera un proceso de descarga del 80 % al 20 %.

$v$	$h$	$T_{s,1}$	$T_{s,12}$	$T_{f,12}$
1,5	72,3	27,3	33,8	31,8
3	112	26,5	30,0	28,6
7	191	25,9	27,5	26,6
10	239	25,7	26,8	26,1

tema de refrigeración aumenta considerablemente. Asimismo, la Fig. 7 muestra el efecto que tendría sobre la temperatura el activar, en el instante  $t = 1000 \text{ s}$ , un ventilador que aumente la velocidad del aire desde  $3 \text{ m/s}$  a  $5 \text{ m/s}$ . La temperatura final del aire refrigerante es menor ya que el aumento de velocidad permite que, para una misma área de ventilación, el caudal másico de refrigerante introducido en el sistema sea mayor, tal y como muestra la Fig. 8.

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis del estado del arte, resulta de gran relevancia implementar modelos térmicos que simulen el comportamiento de las baterías embarcadas en vehículos eléctricos. De este modo, se facilita la implementación de soluciones BTMS mediante procedimientos MBD para que la batería trabaje en un punto de operación óptimo y se garantice su integridad y seguridad.

Desde un punto de vista matemático, se concluye que es posible trabajar con sistemas agregados para representar el comportamiento térmico del módulo, los cuales suponen la temperatura en la celda constante con la posición y únicamente

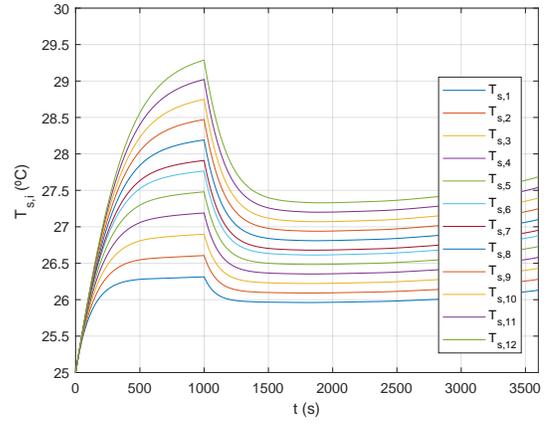


Fig. 7: Evolución de las temperaturas de las doce celdas conectadas en serie del módulo de baterías con convección forzada (se varía la velocidad del refrigerante en  $t=1000 \text{ s}$  desde  $3 \text{ m/s}$  a  $5 \text{ m/s}$ ).

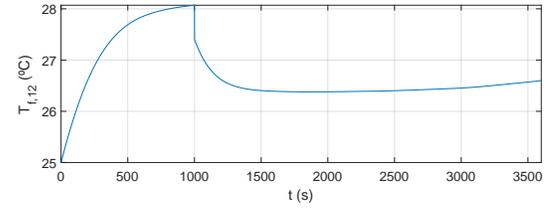


Fig. 8: Evolución de la temperatura de salida del fluido refrigerante en la duodécima celda del módulo de baterías con convección forzada (se varía la velocidad del refrigerante en  $t=1000 \text{ s}$  desde  $3 \text{ m/s}$  a  $5 \text{ m/s}$ ).

dependiente del tiempo. Esto es posible cuando se trabaja con materiales de alta conductividad térmica, es decir, en caso de que los gradientes en el interior de la batería sean reducidos. Esto es así para el módulo de baterías de automoción estudiado.

Como es de esperar, se observa que una velocidad superior del aire refrigerante da lugar a temperaturas inferiores en las celdas, por ejemplo, se obtiene una reducción de  $7^\circ\text{C}$  en los casos extremos estudiados en la tabla II. Asimismo, cabe destacar que la temperatura varía hasta 6 grados entre la primera celda y la última en el sentido de circulación del fluido refrigerante para el caso más crítico estudiado.

Es importante remarcar que el modelo desarrollado es parametrizable, por lo que se puede emplear para modelar el comportamiento térmico de distintos módulos de baterías de automoción con características de diseño similares. Además, dispone de la capacidad de emular cambios en la velocidad del fluido refrigerante. Estas características permitirán utilizar este modelo, en un futuro, para el desarrollo de algoritmos BTMS mediante simulaciones offline y HIL.

Como limitaciones principales del modelo, cabe destacar que este no considera la transferencia de calor por radiación. Esto no supone un problema en el caso práctico estudiado en este artículo, ya que la contribución de la radiación es muy inferior a la contribución de los fenómenos de convección. Sin embargo, es posible que esta simplificación no sea válida para otras situaciones operacionales. Asimismo, la utilización de modelos agregados introduce cierto error en los valores de temperatura estimados. Aunque estos errores se consideran

pequeños en el contexto del módulo de baterías estudiado en este trabajo, como trabajo futuro se pretende desarrollar un modelo de mayor precisión que permita caracterizar el gradiente térmico dentro de la celda, así como los términos de transferencia de calor radiativos. El mayor hándicap en el desarrollo de este nuevo modelo consistiría en mantener su carga computacional lo suficientemente baja como para asegurar su ejecución en tiempo real y ser, de este modo, de utilidad para aplicaciones HiL.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno del País Vasco dentro de las ayudas para grupos del Sistema Universitario Vasco (IT1440-22) y a través del proyecto de investigación EPOGAN del programa ELKARTEK (KK-2023/00091), por el Aula Tecnalia de la Escuela de Ingeniería de Bilbao y por la Unión Europea Horizon Europe en el contexto del proyecto eBRT2023 (nº 101095882).

#### REFERENCES

- [1] M. Rasheed, R. Hassan, M. Kamel, H. Wang, R. Zane, S. Tong, and K. Smith, "Active reconditioning of retired lithium-ion battery packs from electric vehicles for second-life applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 12, no. 1, pp. 388–404, 2024.
- [2] L. Timilsina, P. Badr, P. H. Hoang, G. Ozkan, B. Papari, and C. Edrington, "Battery degradation in electric and hybrid electric vehicles: a survey study," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 42 431–42 462, 2023.
- [3] J. Tian, Y. Fan, T. Pan, X. Zhang, J. Ying, and Q. Zhang, "A critical review on inconsistency mechanisms, evaluation methods and improvement features of lithium-ion battery energy storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, no. 113978, pp. 1–21, 2024.
- [4] E. B. Paccha Herrera, "Thermal behavior and stability study of a lithium-ion battery pack with air cooling," Ph.D. dissertation, Universidad de Chile, 2022.
- [5] J. Full, J. Wanner, S. Kiemel, R. Miehe, M. Weeber, and A. Sauer, "Comparing technical criteria of various lithium-ion battery cell formats for deriving respective market potentials," in *Proc. of the IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC)*, 2020, pp. 1–6.
- [6] C. Alaoui, "Modular energy efficient and solid-state battery thermal management system," in *Proc. of the International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, 2017, pp. 1–6.
- [7] S. N. Aaveen, S. R. Gunti, M. A. Naveen Kumar, S. Louis, and U. Sharma, "Optimizing BTM of HV battery pack for automotive application using electro-thermal simulation," in *Proc. of the IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, 2022.
- [8] F. S. Hwang, T. Confrey, C. Reidy, D. Picovici, D. Callaghan, D. Culliton, and C. Nolan, "Review of battery thermal management systems in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 192, no. 114171, pp. 1–2, 2024.
- [9] [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/solutions/model-based-design.html>
- [10] E. Ibarra, A. Arias, I. Martínez de Alegría, A. Otero-Olavarrieta, A. Matallana, and L. de Mallac, "Rapid control prototyping platform to regulate a high-current low-voltage DC/DC power converter prototype to feed superconducting electromagnets," in *Proc. of Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI)*, 2023, pp. 1–6.
- [11] C. Taborrelli and S. Onori, "State of charge estimation using extended Kalman filters for battery management system," in *Proc. of the IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, 2014, pp. 1–8.
- [12] D. D. Domenico, G. Fiengo, and A. Steganopoulos, "Lithium-ion battery state of charge estimation with a Kalman filter based on an electrochemical model," in *Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications*, 2008, pp. 702–707.
- [13] H. Haupt, M. Ploger, and J. Bracker, "Hardware-in-the-loop test of battery management system," in *Proc. of the IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, 2013.
- [14] [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/help/simulink/gs/model-based-design.html>
- [15] C. Lyu, B. Xia, W. Luo, Y. Sheng, and L. Wang, "Thermal simulation for a 48V/50Ah lithium-ion battery pack," in *Proc. of the IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2019, pp. 155–160.
- [16] D. Allart, M. Montaru, and H. Gualous, "Thermal model of battery for high capacity energy storage systems cell scale model and experimental validation," in *Proc. of the International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, 2017, pp. 1–6.
- [17] S. A. Khateeb, S. Amiruddin, M. Farid, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "Thermal management of li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation," *Journal of Power Sources*, vol. 142, no. 1–2, pp. 345–353, 2005.
- [18] B. Shabani and M. Biju, "Theoretical modelling methods for thermal management of batteries," *Energies*, vol. 8, no. 9, pp. 10 153–10 177, 2015.
- [19] X. Lin, A. G. Stefanopoulou, J. B. Siegel, and S. Mohan, "Temperature estimation in a battery string under frugal sensor allocation," in *Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Conference (DSCC)*, 2014, pp. 1–8.
- [20] N. H. F. Ismail, S. F. Toha, N. A. M. Azubir, N. H. Md Ishak, M. K. Hassan, and B. S. KSM Ibrahim, "Simplified heat generation model for lithium ion battery used in electric vehicle," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 53, pp. 1–6, 2013.
- [21] H. Gabbar, A. Othman, and M. Abdussami, "Review of battery management systems (BMS) development and industrial standards," *Technologies*, vol. 9, no. 2, pp. 1–28, 2021.
- [22] L. Calearo, A. Thingvad, and M. Marinelli, "Modeling of battery electric vehicles for degradation studies," in *Proc. of the International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2019, pp. 1–6.
- [23] T. D. Hatchard, "Importance of heat transfer by radiation in Li-Ion batteries during thermal abuse," *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 3, no. 7, pp. 305–308, 1999.
- [24] D. Linden and T. B. Reddy, Eds., *Handbook of batteries. Third Edition*, 3rd ed., ser. McGraw-Hill handbooks. New York: McGraw-Hill, 2002, rev. ed. of: *Handbook of batteries / David Linden, editor in chief*. 2nd ed. c1995 - Includes bibliographical references and index.
- [25] Q. Yun, Y. He, W. Lv, Y. Zhao, B. Li, F. Kang, and Q. Yang, "Chemical dealloying derived 3D porous current collector for Li metal anodes," *Advanced Materials*, vol. 28, no. 32, pp. 6932–6939, 2016.
- [26] J. Jaguemont, L. Boulon, and Y. Dube, "Characterization and modeling of a hybrid-electric-vehicle lithium-ion battery pack at low temperatures," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 1, pp. 1–14, 2016.
- [27] X. Gao, Y. Ma, and H. Chen, "Active thermal control of a battery pack under elevated temperatures," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 31, pp. 262–267, 2018.
- [28] N. Ghaeminezhad, Z. Wang, and Q. Ouyang, "A review on lithium-ion battery thermal management system techniques: A control-oriented analysis," *Applied Thermal Engineering*, vol. 219, no. 119497, pp. 1–20, 2023.
- [29] Y. Zhao, O. Pohl, A. I. Bhatt, G. E. Collis, P. J. Mahon, T. Rüther, and A. F. Hollenkamp, "A review on battery market trends, second-life reuse, and recycling," *Sustainable Chemistry*, vol. 2, no. 1, pp. 167–205, 2021.
- [30] D. Bernardi, E. Powlikowski, and J. Newman, "A general energy balance for battery systems," *Journal of Electrochemical Society: Electrochemical Science and Technology*, vol. 132, no. 1, pp. 5–12, 1985.
- [31] D. D. Madani and C. Ziebert, "A model-based approach for temperature estimation of a lithium-ion battery pack," in *Proc. of the Asia Power and Electrical Technology Conference*, 2022, pp. 357–360.
- [32] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. Mc Graw Hill, 2002.