



ESTUDIO COMPARATIVO DE ESTRATEGIAS DE ENFRIAMIENTO EN UN MÓDULO DE BATERÍAS DE IONES DE LITIO PARA LA PREVENCIÓN DE LA FUGA TÉRMICA MEDIANTE CFD

COMPARATIVE STUDY OF COOLING STRATEGIES IN A LITHIUM-ION BATTERY MODULE FOR THERMAL RUNAWAY PREVENTION USING CFD

Ricardo Carpio-Chillogallo^{1,*} , Edwin Paccha-Herrera¹ 

Recibido: 16-08-2024, Recibido tras revisión: 14-11-2024, Aceptado: 26-11-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

En este estudio se evalúa el comportamiento térmico ante condiciones de fuga térmica de tres arreglos de celdas de iones de litio con distintos sistemas de enfriamiento: aire, agua y material de cambio de fase (PCM). Se utilizaron 16 celdas cilíndricas de tipo 18650 con una capacidad de 2.15 Ah. La geometría 1 tiene una forma de rombo irregular, mientras que las geometrías 2 y 3 tienen una forma de un octágono irregular. Se implementaron simulaciones numéricas CFD empleando el software ANSYS Fluent mediante la aplicación del modelo de abuso térmico basado en un enfoque multidimensional multiescala y el modelo empírico NTGK. Se ejecutaron simulaciones transientes considerando convección forzada y natural. Los resultados muestran que, para las condiciones dadas en el estudio, el enfriamiento natural por aire no previene la fuga térmica, mientras que el agua y PCM sí la previenen, al igual que la convección forzada con aire y agua.

Palabras clave: abuso térmico, ANSYS, enfriamiento, NTGK, fuga térmica

Abstract

This study investigates the thermal behavior of three lithium-ion battery configurations under thermal runaway conditions, focusing on cooling systems based on air, water, and phase change materials (PCM). The analysis was conducted using sixteen cylindrical 18650 cells, each with a capacity of 2.15 Ah. The battery arrangements include Geometry 1, characterized by an irregular rhomboid shape, and Geometry 2, which adopts an irregular octagonal shape. Numerical simulations were carried out using Computational Fluid Dynamics (CFD) tools in ANSYS Fluent, employing a thermal abuse model rooted in a multidimensional, multiscale approach, and incorporating the empirical Newman-Tiedemann-Gauthier-Kim (NTGK) model. Transient simulations were performed under forced and natural convection scenarios to capture dynamic thermal behavior. The findings reveal that natural air cooling fails to prevent thermal runaway under the studied conditions. In contrast, water and PCM-based cooling systems effectively mitigate thermal runaway risks. Furthermore, forced convection with air and water significantly enhances thermal management and successfully prevents thermal runaway.

Keywords: Thermal abuse, ANSYS, cooling, NTGK, thermal runaway

^{1,*}Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: ricardo.carpio@unl.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Carpio-Chillogallo, R y Paccha-Herrera, E. "Estudio comparativo de estrategias de enfriamiento en un módulo de baterías de iones de litio para la prevención de la fuga térmica mediante CFD," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 33, pp. 76-90, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.07>.

1. Introducción

Las baterías de iones de litio (BIL) desempeñan un papel importante en numerosas aplicaciones, como dispositivos electrónicos portátiles, vehículos eléctricos, teléfonos inteligentes, dispositivos médicos, etc. Sin embargo, surgen grandes desafíos, como evitar su operación a temperaturas excesivas, lo cual puede ocasionar la fuga térmica, una reacción exotérmica descontrolada que puede provocar incendios, representando un riesgo para la seguridad humana y de los dispositivos [1].

Las BIL se han destacado como una fuente confiable de energía debido a su alta eficiencia, densidad de energía y vida útil relativamente larga [2]. Una celda de BIL consta de un terminal negativo (ánodo de grafito), un terminal positivo (cátodo, óxido metálico de litio), el separador y el electrolito. El separador está entre los electrodos para evitar el contacto eléctrico y permitir el paso de los iones. El material electrolítico se utiliza para facilitar la conducción iónica [3]. El proceso de carga/descarga de las baterías de iones de litio se caracteriza por la transferencia de iones de litio y electrones, lo que se denomina proceso de ionización y oxidación [4].

La operación de las BIL está condicionada por su temperatura, dado que, para un funcionamiento confiable y seguro, esta se encuentra entre los 15 °C a 35 °C [5]. En las celdas de litio existe una capa de material formada en la superficie de los electrodos durante el proceso de ciclado y uso, la misma que se denomina capa de interfase del electrolito (SEI, por sus siglas en inglés) y se descompone a 100 °C, mientras que el separador se funde y se contrae a 143 °C; sin embargo, a una temperatura superior a 150 °C, se produce el fenómeno conocido como fuga térmica [6–9].

Las baterías de iones de litio son más seguras desde su invención. Aunque existe un riesgo de incendio y explosión causado por la fuga térmica, al producirse el aumento exponencial de la temperatura a un ritmo que no se puede disipar lo suficientemente rápido al entorno, el calor causado por la descomposición química exotérmica de los materiales dentro de las celdas [10].

Para mantener la batería en un rango de temperatura adecuado, existen sistemas de refrigeración o enfriamiento, que según su medio se pueden clasificar en aire, líquido y material de cambio de fase (PCM) [11, 12].

Los sistemas de enfriamiento por aire se pueden clasificar en dos tipos: aire natural y aire forzado (mediante ventiladores) [13, 14].

Los sistemas de refrigeración de baterías por líquido pueden ser de forma directa o indirecta. La refrigeración directa se da cuando existe el contacto directo entre el refrigerante y las celdas de la batería. La refrigeración indirecta ocurre cuando se mantienen los paquetes de batería en un líquido refrigerante aislante,

como aceites minerales y de silicona, que no reaccione químicamente con ninguno de los materiales en el exterior de las celdas [13].

En los sistemas de enfriamiento de PCM, se utilizan materiales que absorben o liberan cantidades de energía térmica en procesos de cambio de fase, que permitan un calentamiento o un enfriamiento [15].

Se han desarrollado varios estudios con los sistemas de enfriamiento de aire, agua y PCM, con el objetivo de prevenir la fuga térmica. Por ejemplo, Ouyang et al. [16] utilizaron cien baterías de litio tipo 18650 y demostraron que mediante el uso de aerogel de espesor 4 mm se puede reducir la temperatura máxima de la batería.

Zhou et al. [17] experimentaron un sistema de gestión térmica de baterías (BTMS) con tuberías de calor (heat pipes) y líquido de cambio de fase para controlar la temperatura y prevenir la propagación térmica. El sistema inhibe efectivamente el sobrecalentamiento y fuga térmica, manteniendo la temperatura por debajo de 185 °C y limitando la diferencia de temperatura a menos de 2.1 °C en condiciones de altas tasas de descarga.

Alghamdi et al. [18] llevaron a cabo un estudio experimental de diferentes sistemas de gestión térmica para BIL en vehículos eléctricos, centrándose en el uso de PCM. Los resultados muestran que cuando solo se usa PCM, la temperatura promedio alcanza 85 °C, superando el rango seguro. La adición de un módulo termoelectrónico y aletas de aluminio reduce la temperatura promedio a 48 °C, mejorando la seguridad del sistema.

Wu et al. [19] diseñaron un sistema de gestión térmica de baterías basado en PCM asistido por tubería de calor para vehículos eléctricos e híbridos. Los resultados experimentales muestran que las tuberías de calor influyen en la distribución de temperatura bajo altas tasas de descarga, manteniendo la temperatura máxima por debajo de 50 °C y logrando una fluctuación térmica más estable bajo condiciones cíclicas. Los autores demostraron que el aumento de la velocidad del aire reduce limitadamente la temperatura de las celdas debido al proceso de transición de fase del PCM.

Además, Liu et al. [20] simulon los comportamientos de la fuga térmica en un paquete de doce BIL prismáticas. Se evaluaron tres medidas de seguridad térmica para la protección contra cortocircuitos internos. Se propuso el uso de PCM de parafina para retrasar la propagación de la fuga térmica entre las baterías. Además, afirmaron que, adicionando aislamiento al PCM, este tiempo se puede extender. Complementariamente, se propone una protección térmica novedosa basada en refrigeración por inmersión con ebullición de líquido fluorinado.

Li et al. [21] propusieron un modelo numérico de abuso térmico con enfoque CFD, para estudiar la pro-

pagación térmica en un paquete de baterías de iones de litio. El modelo mostró que el espacio entre celdas acelera la transferencia de calor, pero reduce la densidad energética.

Se han realizado múltiples estudios para la simulación del acoplamiento electroquímico-térmico para baterías, que radica en el campo multiescala y multifísica. Para abordar esta dificultad, se ha empleado el método multidimensional multiescala (MSMD), que se encuentra implementado en ANSYS Fluent. El MSMD se resuelve en diferentes escalas y en varios dominios [22] y puede simular un paquete de baterías con sus celdas conectadas eléctricamente [23]. Además, se puede simular la fuga térmica de una batería bajo condiciones de abuso térmico y cortocircuito [24]. También Paccha-Herrera et al. [25] proponen el método MSMD junto con la implementación del modelo empírico NTGK, el cual permite calcular las propiedades térmicas y eléctricas para evaluar el desempeño térmico de las BIL.

En este estudio se analizarán estrategias que puedan prevenir la fuga térmica, con diferentes tipos de enfriamiento y disposiciones geométricas del modelo de celdas. La motivación principal de este estudio es evitar que las baterías de iones de litio lleguen a presentar el fenómeno de la fuga térmica al funcionar a temperaturas fuera del rango normal establecido,

evitando posibles incendios o incluso que exploten. Este estudio aporta con propuestas de soluciones para la prevención de la fuga térmica, mediante la implementación de sistemas de enfriamiento en baterías de iones de litio, por medio de análisis y simulación con base en CFD. Se proponen distintas configuraciones geométricas de celdas, distintos sistemas de enfriamiento. De esta manera, se proponen sistemas de baterías de litio más seguros y eficientes.

2. Materiales y métodos

Para la ejecución del presente trabajo, se utilizaron tres disposiciones geométricas de las celdas con diferentes sistemas de enfriamiento. La simulación numérica se implementará en el paquete computacional ANSYS STUDENT 2024 R1, mediante modelos CFD.

En la Figura 1 se muestra una representación esquemática del procedimiento empleado para efectuar este estudio sobre las estrategias de enfriamiento para la prevención de la fuga térmica. Se inicia por la selección de la celda y sistemas de enfriamiento. A continuación, se desarrollan las geometrías y el mallado. Luego, se seleccionan los modelos CFD, configurando materiales, condiciones iniciales y de frontera y solver numérico. Finalmente, se realiza el análisis formal de resultados.

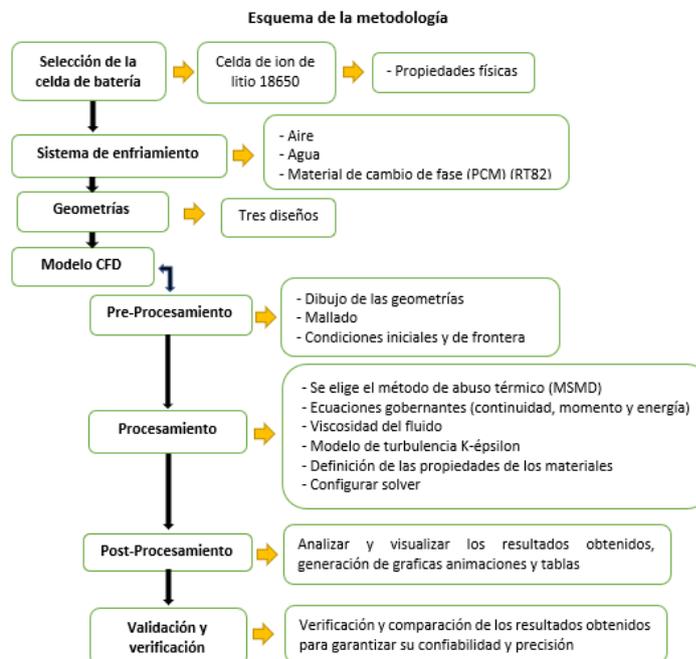


Figura 1. Esquema de la metodología del estudio CFD para prevenir la fuga térmica

2.1. Resolución numérica

Las ecuaciones gobernantes que se resuelven en la simulación CFD para el dominio de aire y agua son las

ecuaciones de continuidad, momento y energía. Se ha considerado condiciones de flujo incompresible, donde la densidad del fluido es constante. La ecuación de continuidad se observa en la ecuación (1) [26]:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

Donde ∇ es el operador de divergencia y \vec{v} es la velocidad del fluido.

La ecuación (2) representa la conservación del momento para un fluido incompresible y viscoso:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{v} \quad (2)$$

La ecuación (3) muestra la forma de conservación de la energía para un fluido:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla(\rho e \vec{v}) = -p \nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot (k_f \nabla T) + \Phi \quad (3)$$

Donde \vec{v} es la velocidad del fluido, p es la presión, ρ es la densidad del aire, μ es la viscosidad dinámica, e es la energía interna, T es la temperatura, k_f es la conductividad térmica del fluido, Φ la disipación viscosa y t es el tiempo.

Para modelar los efectos de turbulencia, se empleó el modelo $k - \epsilon$ debido a su robustez [27].

Para el caso del PCMRT82, dado que existe cambio de fase, se utilizan las ecuaciones de continuidad (ecuación (4)), momento (ecuación (5)) y energía (ecuación (6)) [28].

$$\frac{\partial(\rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{U}) = 0 \quad (4)$$

Donde $\frac{\partial \rho_f}{\partial t}$ es la tasa de cambio temporal de la densidad, ρ_f es la densidad en fase de fluido, \vec{U} es el vector de velocidad del fluido (con componentes \vec{u} , \vec{v} y \vec{w}).

$$\rho_f \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho_f (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{U} + \frac{(1 - f_l)^2}{f_l^3 + \delta} A_m \vec{U} + \rho_f g \beta (T_f - T_m) \vec{k} \quad (5)$$

Donde β es el número consecutivo en la región de transición (*mushy region*), A_m es un parámetro para la región de transición, δ es una cantidad pequeña para evitar que el término se divida por cero, y f_l es la fracción líquida.

$$\frac{\partial \rho_f H_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{u} H_f) = k_f \nabla^2 T_f \quad (6)$$

Donde H_f es la entalpía de fluido.

2.2. Modelo NTGK

Para modelar el fenómeno de la fuga térmica se ha empleado el modelado multidominio multiescala (MSMD), basado en el modelo empírico NTGK/DCIR.

El modelo NTGK, mediante las ecuaciones (7), (8) y (9), permite calcular las propiedades termoeléctricas del dominio del ánodo, cátodo y zona activa de una celda o banco de baterías que pueden estar conectadas eléctricamente [25]:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} - \nabla \cdot (k_c \nabla T) = \sigma_{\text{pos}} |\nabla \phi_{\text{pos}}|^2 + \sigma_{\text{gen}} |\nabla \phi_{\text{neg}}|^2 + q_{\text{ech}} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{\text{pos}} \nabla \phi_{\text{pos}}) = -j \quad (8)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{\text{neg}} \nabla \phi_{\text{neg}}) = -j \quad (9)$$

Donde k_c es la conductividad térmica, σ es la conductividad eléctrica, ϕ es el potencial eléctrico, q_{ech} es la tasa de transferencia de calor debido al intercambio térmico con el entorno, y los subíndices pos y neg se refieren al electrodo positivo y negativo, respectivamente. La tasa de corriente volumétrica j se formula mediante la ecuación (10) [29]:

$$j = \frac{C_N}{C_{\text{ref}} \text{Vol}} Y [U - (\phi_{\text{pos}} - \phi_{\text{neg}})] \quad (10)$$

Donde Vol es el volumen de la zona activa, C_{ref} capacidad de la batería utilizada para obtener los parámetros de las funciones U y Y , las cuales están dadas por las ecuaciones (11) y (12), respectivamente [29] y sus coeficientes se muestran en la Tabla 1.

$$U = \left(\sum_{n=0}^5 a_n (D0D)^n \right) - C_2 (T - T_{\text{ref}}) \quad (11)$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 b_n (D0D)^n \right) \exp \left[-C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \right] \quad (12)$$

Donde C_2 y C_1 son constantes para una batería específica.

Tabla 1. Parameters for the NTGK model [25]

Funciones	
U	Y
$a_0=4.0682$	$b_0=16.5066$
$a_1=-1.2669$	$b_1=-27.0367$
$a_2=-0.9072$	$b_2=237.3297$
$a_3=3.7550$	$b_3=-632.603$
$a_4=-2.3108$	$b_4=725.0825$
$a_5=-0.1701$	$b_5=-309.8760$

La tasa de transferencia de calor debido al intercambio térmico con el entorno q_{ech} se describe como se ve en la ecuación (13) [25]:

$$q_{\text{ech}} = j \left[U - (\phi_{\text{pos}} - \phi_{\text{neg}}) - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (13)$$

Donde el primer término representa el calor sobrepotencial y el segundo término es el componente entrópico.

2.3. Modelo de abuso térmico

El modelo de abuso térmico fue propuesto por primera vez por Harchard et al. [30], luego fue ampliado por Kim et al. [31]. Este modelo se formula con base en la ecuación de Arrhenius y abarca un sistema de ecuaciones que describen las reacciones durante la descomposición del electrodo positivo, el electrodo negativo y el SEI (interfase sólido-electrolito), tal como se describe a continuación:

$$\frac{dc_{\text{sei}}}{dt} = -c_{\text{sei}} A_{\text{sei}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,\text{sei}}}{RT}\right) \quad (14)$$

$$\frac{dc_{\text{ne}}}{dt} = -c_{\text{ne}} A_{\text{ne}} \cdot \exp\left(-\frac{z_{\text{sei}}}{z_{\text{sei},0}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,\text{ne}}}{RT}\right) \quad (15)$$

$$\frac{dz_{\text{sei}}}{dt} = c_{\text{ne}} A_{\text{ne}} \cdot \exp\left(-\frac{z_{\text{sei}}}{z_{\text{sei},0}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,\text{ne}}}{RT}\right) \quad (16)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \alpha(1 - \alpha) A_{\text{pe}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,\text{pe}}}{RT}\right) \quad (17)$$

$$\frac{dc_{\text{el}}}{dt} = -c_{\text{el}} A_{\text{el}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,\text{el}}}{RT}\right) \quad (18)$$

Donde los subíndices ne , np y el representaran la reacción entre el electrodo negativo y el electrolito, la reacción entre el electrodo positivo y el electrolito, y la reacción de descomposición del electrolito, respectivamente. Además, z_{sei} es una medida adimensional del grosor de la capa SEI; $z_{(\text{sei},0)}$ es el grosor de referencia de la capa SEI; c_{sei} es la fracción de la concentración de especies metaestables que contienen litio en la capa SEI; c_{ne} es la fracción de la concentración de litio en el electrodo negativo; α representa el grado de conversión del cátodo y c_{el} es la concentración del electrolito. Todas estas variables son adimensionales. R es la constante universal de los gases.

2.4. Selección de la celda de batería

En este estudio se utilizaron celdas cilíndricas de iones de litio de tipo 18650. Las propiedades se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de la celda de ion de litio 18650 [26]

Parámetros	Unidades	Valor
Diámetro	mm	18.4
Altura	mm	65
Capacidad nominal	Ah	2.15
Voltaje nominal	V	3.62
Tasa máxima de carga	-	1 C
Tasa máxima de descarga	-	4.65 C
Resistencia interna	$m \cdot \Omega$	35
Densidad	kg/m^3	1852
Capacidad calorífica	$J/kg \cdot K$	1200
Conductividad térmica	-	-
Axial	$W/m \cdot K$	0.2
Radial	$W/m \cdot K$	37.6

En la Figura 2 se muestran las partes principales de una batería de iones de litio 18650 empleada en el presente estudio, que dispone de un diámetro de 18.4 mm, una altura del ánodo de 2 mm, el cátodo de 3 mm y la zona activa de 60 mm.

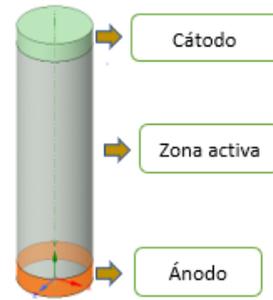


Figura 2. Partes principales de una batería de iones de litio empleadas en el enfoque MSM

2.5. Sistemas de enfriamiento

Los sistemas de enfriamiento propuestos en este trabajo son aire, agua y PCM. Para el caso del PCM, se utilizará el RT82, compuesto por materiales orgánicos puros que puede almacenar y liberar grandes cantidades de calor y utiliza un proceso de fusión de sólido a líquido o viceversa [32]. Las propiedades del PCM RT82 se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del PCM RT82 [32]

Propiedades termofísicas	Unidades	Valor
Densidad (sólido)	$kg \cdot m^{-3}$	950
Densidad (líquido)	$kg \cdot m^{-3}$	770
Calor específico	$J \cdot (kg^{-1} \cdot K^{-1})$	2000
Conductividad térmica	$W \cdot (m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.2
Calor latente	J/kg	176000
Viscosidad dinámica	$kg/m \cdot s$	0.03499
Temperatura (sólido)	K	350.15
Temperatura (líquido)	K	358.15
Coefficiente de expansión térmica	1/K	0.001

2.6. Disposiciones geométricas de las celdas

Las geometrías utilizadas para el estudio se realizaron en el módulo Ansys SpaceClaim de ANSYS Fluent.

Se propuso tres geometrías con dieciséis celdas de iones de litio 18650 con diferentes disposiciones, utilizando tres métodos de enfriamiento: aire, agua y PCM RT82. Para el análisis de la fuga térmica en las celdas se empleó el modelo de abuso térmico (*thermal abuse model*) de ANSYS Fluent, basado en el método MSMD con la implementación del modelo empírico NTGK.

Se establece la temperatura ambiente y de entrada de fluidos en 25 °C, con un coeficiente de convección entre la carcasa y el ambiente externo de $7 \frac{W}{m^2 K}$, como lo recomienda Liu et al. [20], una velocidad de entrada tanto para el aire como para el agua de $1.5 \frac{m}{s}$. El criterio de convergencia en este estudio fue cuando los residuos alcanzaron valores inferiores a 1×10^{-04} . Para cada caso, se utilizó una caja acrílica para encerrar las baterías. Las dieciséis celdas se conectaron en serie empleando la conexión virtual del MSMD de Fluent y el tamaño del paso del tiempo (*time step size*) fue de 1 s. El material empleado para simular el ánodo y cátodo fue el aluminio.

Se utilizó un mallado estructural de tipo hexaédrico buscando un balance entre precisión y eficiencia computacional, se realizó una prueba de independencia de mallas con tres tamaños de elementos para cada geometría, escogiendo la que mantuvo la temperatura constante al incrementar el número de elementos. El número de elementos para las distintas geometrías y el promedio de la calidad ortogonal se muestran en la Tabla 4. Los indicadores de este último parámetro evidencian que la calidad del mallado es muy buena.

Tabla 4. Características de la malla

Geometrías	Número de elementos	Calidad ortogonal promedio
Geometría 1	269930	0.79
Geometría 2	201794	0.80
Geometría 3	249264	0.80

Para el caso de la convección natural, se aplicó el método PRESTO! para la discretización de la presión, mientras que para el acoplamiento presión-velocidad se empleó un esquema COUPLED.

La geometría 1 tiene una forma de rombo irregular (Figura 3) con una separación entre filas de 48 mm y entre columnas de 38 mm. La geometría 2 es de forma de octagonal irregular (Figura 6) con una separación entre filas de 24 mm y entre columnas de 24 mm. La geometría 3 tiene una forma de un octágono irregular (Figura 9) con una separación entre filas de 38 mm y entre columnas de 48 mm.

En las figuras 3, 4 y 5 se exponen el orden enumerado de las celdas, la configuración de los espacios entre

celdas y carcasa y la dirección del flujo de refrigerante para la geometría 1, respectivamente. En las figuras 6, 7 y 8 se exhiben similares características para la geometría 2. En las figuras 9, 10 y 11 se muestran detalles análogos para la geometría 3.

Este estudio se realizó utilizando un computador tipo laptop con procesador Ryzen 7, 7.8 GHz, 16 GB RAM.

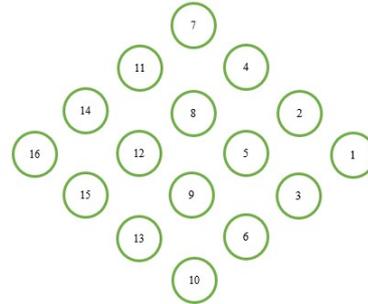


Figura 3. Disposición de celdas para la Geometría 1

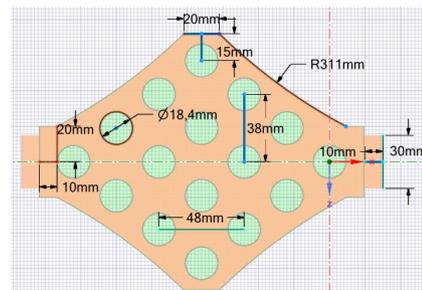


Figura 4. Geometría 1: dimensiones

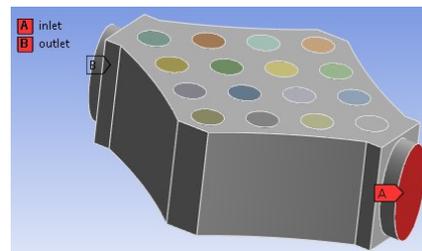


Figura 5. Geometría 1: flujo de refrigerante

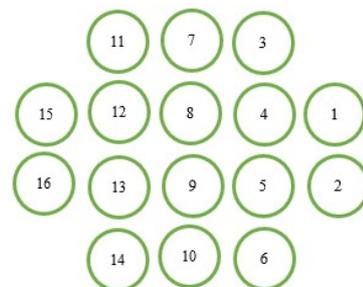


Figura 6. Disposición de celdas para la Geometría 2

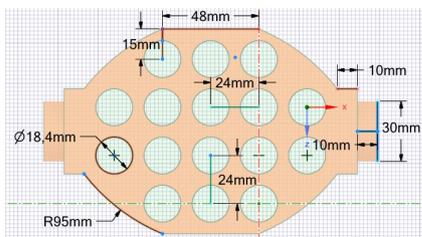


Figura 7. Geometría 2: dimensiones

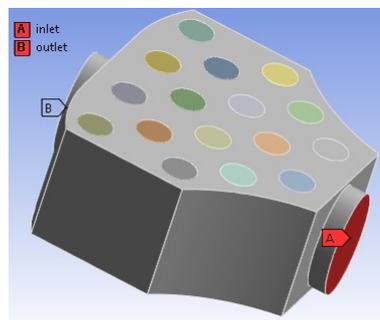


Figura 11. Geometría 3: flujo de refrigerante

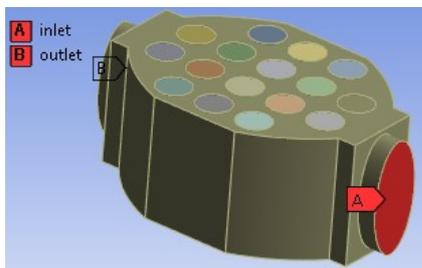


Figura 8. Geometría 2: flujo de refrigerante

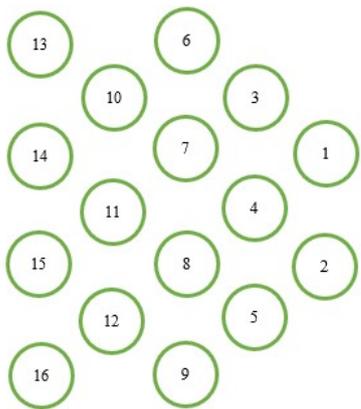


Figura 9. Disposición de celdas para la Geometría 3

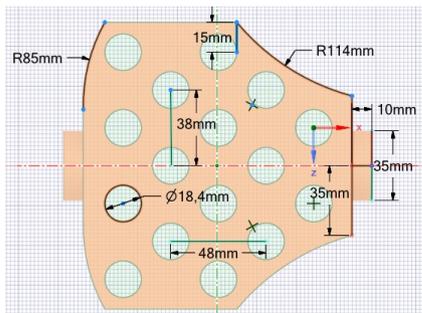


Figura 10. Geometría 3: dimensiones

3. Resultados y discusión

La Figura 12 muestra una gráfica típica del enfriamiento de una celda por medio de aire, donde al final del proceso se alcanza el estado estable.

Un patrón típico de la fuga térmica se expone en la gráfica 13, donde, luego del tiempo 505 s, un pequeño aumento de temperatura lleva a una reacción en cadena descontrolada que incrementa exponencialmente la temperatura del sistema. Esto es un fenómeno crítico, especialmente en baterías de litio, lo cual puede implicar fallos catastróficos si no se controla adecuadamente.

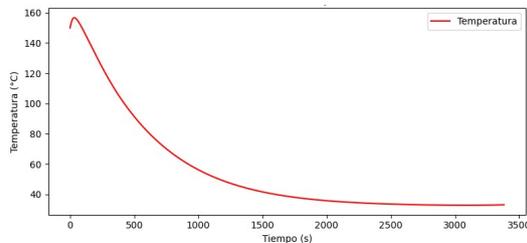


Figura 12. Dinámica de enfriamiento de una batería. Enfriado por aire con convección forzada, temperatura ambiente y de entrada de 25 °C, y velocidad de entrada de 1.5 $\frac{m}{s}$

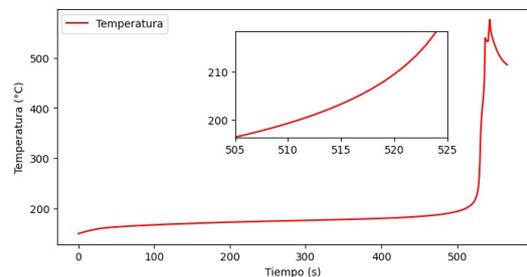


Figura 13. Perfil de temperatura característico de la fuga térmica en una celda. Enfriamiento por aire, con temperatura de entrada al módulo de 47 °C y velocidad 1.5 $\frac{m}{s}$

3.1. Enfriamiento por aire

En la Figura 14 se muestran los perfiles de temperatura de las celdas para la geometría 1, utilizando enfriamiento por aire mediante convección natural, la cual no evita la fuga térmica, siendo la celda 16, en un tiempo de 258 s, primera en sufrir dicho fenómeno. En la Figura 15 se expone la distribución de la temperatura en las celdas.

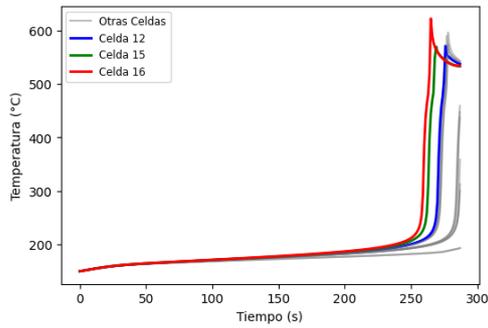


Figura 14. Geometría 1. Enfriado por aire bajo convección natural

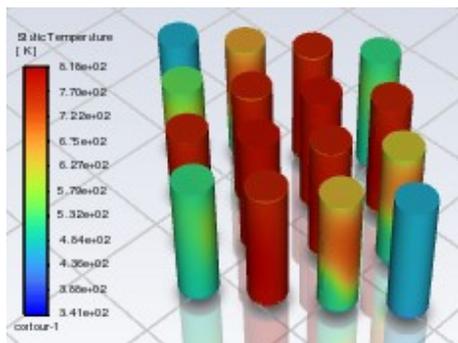


Figura 15. Geometría 1. Temperatura de las celdas a los 287 s mediante convección natural por aire

En la Figura 16 se presentan los resultados para la geometría 2, con enfriamiento por aire mediante convección natural, la cual no evita la fuga térmica, siendo las celdas 15 y 16 las primeras en presentar dicha condición anómala luego de un período de 228 s. La distribución de la temperatura en las celdas se presenta en la Figura 17.

En la Figura 18 se muestran las temperaturas de las baterías para la geometría 3, utilizando enfriamiento por aire mediante convección natural, siendo la celda 15 la primera en experimentar la fuga térmica luego de un tiempo de 255 s. La distribución de la temperatura en las celdas se aprecia con más detalle en la Figura 19, en donde las celdas centrales sufren los mayores incrementos de temperatura.

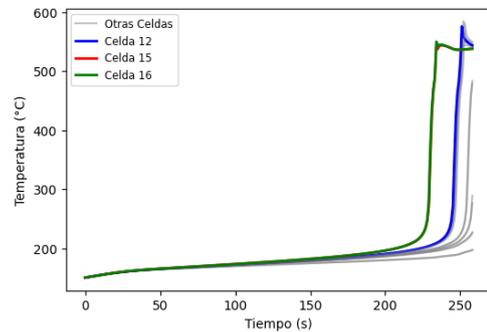


Figura 16. Geometría 2. Enfriado por aire bajo convección natural

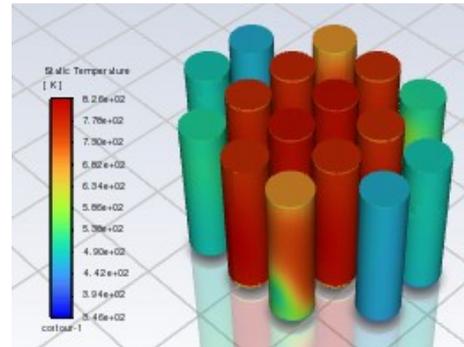


Figura 17. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 258 s mediante convección natural por aire

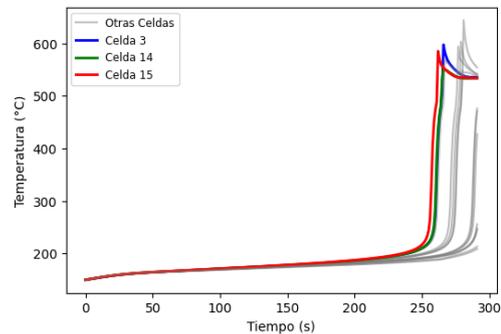


Figura 18. Geometría 3. Enfriado por aire a convección natural

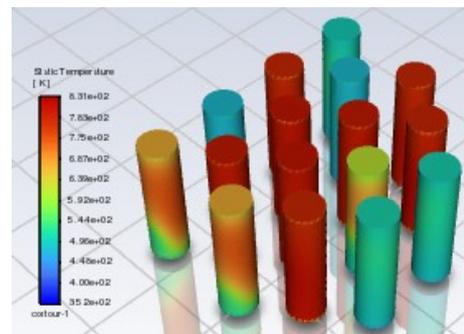


Figura 19. Geometría 3. Temperatura de las celdas a los 292 s mediante convección natural por aire

En la Figura 20 se observan las curvas de temperatura para la geometría 1, utilizando enfriamiento por aire mediante convección forzada, lo cual previno la fuga térmica, siendo la celda 5 la que alcanzó la temperatura más alta de 156.98 °C, en un tiempo de 35 s. En la Figura 21 se presenta la distribución de la temperatura en las celdas, en donde existen celdas localizadas en extremos que no se refrigeran adecuadamente.

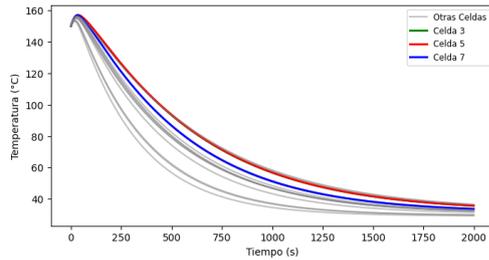


Figura 20. Geometría 1. Convección forzada por aire

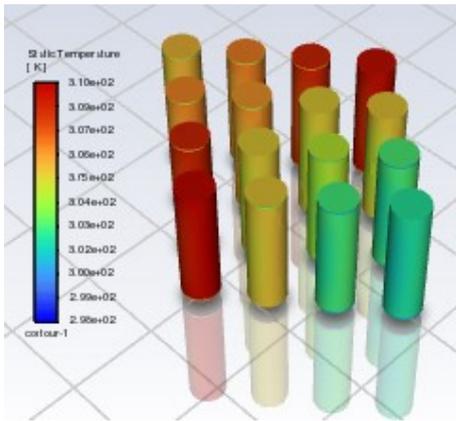


Figura 21. Geometría 1. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por aire

En la Figura 22 se exhiben los resultados de evolución de temperatura de las celdas para la geometría 2, utilizando enfriamiento por aire mediante convección forzada, lo cual inhibió la fuga térmica, siendo la celda 3 la que alcanzó la temperatura más alta que es 157.30 °C en un tiempo de 33 s. En la Figura 23 se muestra la distribución de la temperatura en el módulo, anotando que las celdas localizadas cerca de la entrada de aire se refrigeran de mejor manera con respecto a las ubicadas cerca de la salida de aire.

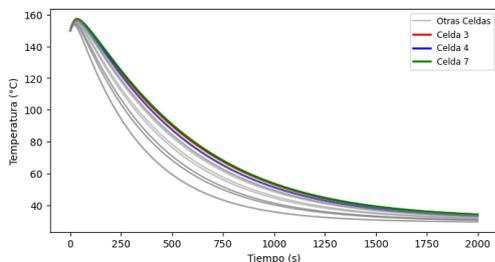


Figura 22. Geometría 2. Convección forzada por aire

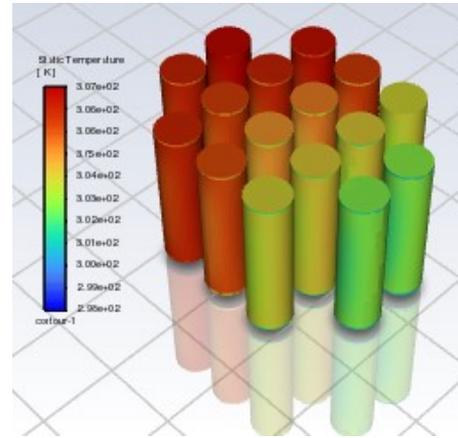


Figura 23. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por aire

En la Figura 24 se observa la geometría 3, utilizando enfriamiento por aire mediante convección forzada, lo cual previno la fuga térmica, pero existe un mayor gradiente de temperatura entre las celdas vecinas con respecto a la geometría 2. La celda 13 alcanzó la temperatura más alta que es de 159.31 °C en un tiempo de 56 s. La Figura 25 presenta la distribución de la temperatura en las celdas, en donde las celdas de la zona central del módulo presentan una mejor refrigeración.

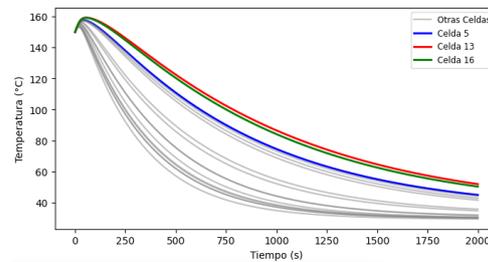


Figura 24. Geometría 3. Convección forzada por aire

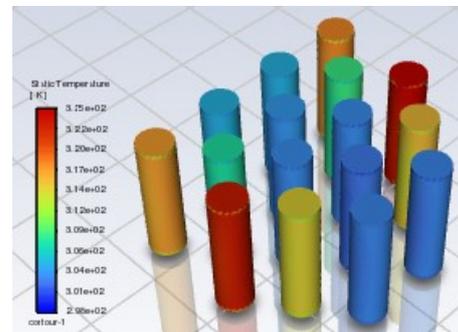


Figura 25. Geometría 3. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por aire

3.2. Enfriamiento por agua

La Figura 26 evidencia un decaimiento de temperatura de las celdas para la geometría 1, inhibiendo la fuga térmica por medio de enfriamiento por agua mediante convección natural. La celda 16 alcanzó la temperatura más alta correspondiente a 155.90 °C en un tiempo de 27 s. En la Figura 27 se muestra la distribución de la temperatura en las celdas, en donde se evidencia que la temperatura es prácticamente uniforme.

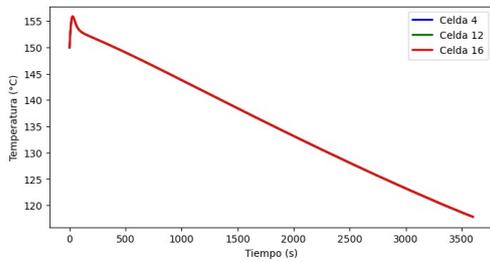


Figura 26. Geometría 1. Enfriado por agua convección natural

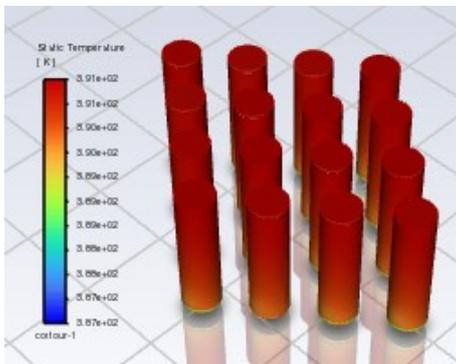


Figura 27. Geometría 1. Temperatura de las celdas a los 3600 s mediante convección natural por agua

El comportamiento térmico de las celdas correspondiente a la geometría 2 se ve en la Figura 28. Se empleó el enfriamiento por agua mediante convección natural, lo cual previno la fuga térmica. La celda 16 alcanzó la temperatura más alta de 156.09 °C en un tiempo de 29 s. En la Figura 29 se presenta la distribución de la temperatura en las celdas, que se muestra uniforme.

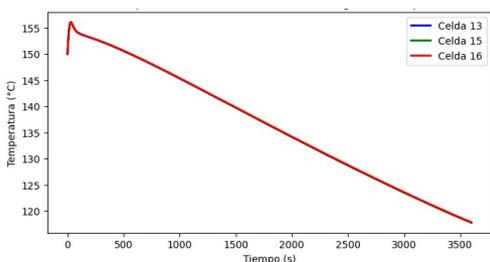


Figura 28. Geometría 2. Enfriado por agua mediante convección natural

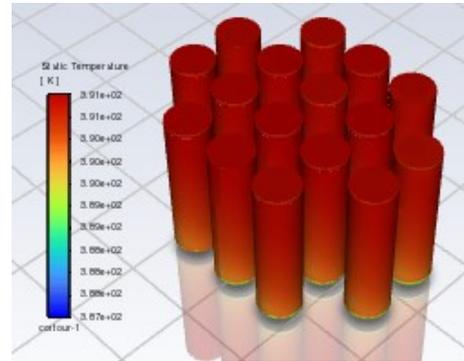


Figura 29. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 3600 s mediante convección natural por agua

En la Figura 30 se presentan los resultados para la geometría 3, utilizando enfriamiento por agua mediante convección natural. La celda 7 alcanzó la temperatura más alta, que es 156.19 °C en un tiempo de 29 s y no se experimentó fuga térmica. En la Figura 31 se muestra la distribución uniforme de la temperatura en las baterías.

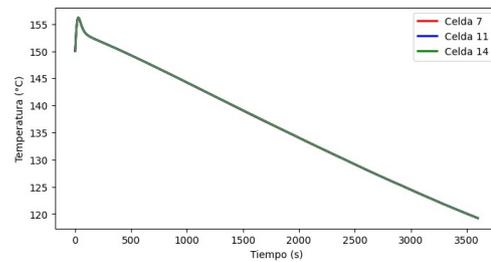


Figura 30. Geometría 3. Enfriado por agua convección natural

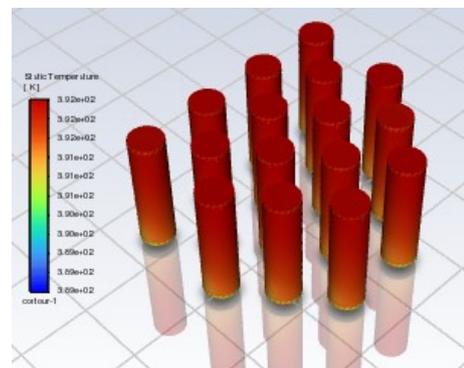


Figura 31. Geometría 3. Temperatura de las celdas a los 3600 s mediante convección natural por agua

En la Figura 32 se ven las temperaturas de algunas celdas para la geometría 1, empleando enfriamiento por agua mediante convección forzada. Todas las celdas alcanzan el estado estacionario, inhibiendo la fuga térmica. En la Figura 33 se ve una distribución uniforme de la temperatura en las celdas.

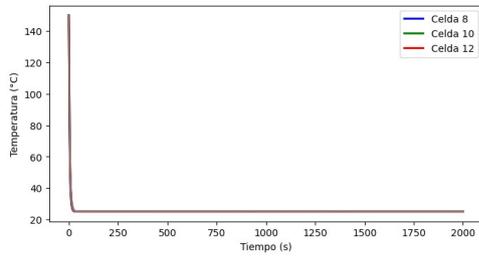


Figura 32. Geometría 1. Enfriado por agua, convección forzada

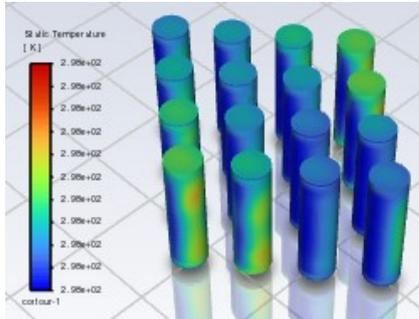


Figura 33. Geometría 1. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por agua

En la Figura 34 se observan las temperaturas de las celdas para la geometría 2. Se empleó el enfriamiento por agua mediante convección forzada, lo cual evitó la fuga térmica, conduciendo a un estado estacionario. En la Figura 35 se presenta la distribución de la temperatura en las celdas con un patrón uniforme.

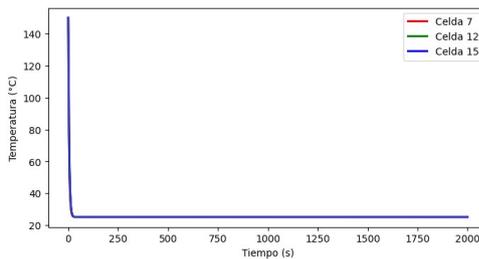


Figura 34. Geometría 2. Enfriado por agua convección forzada

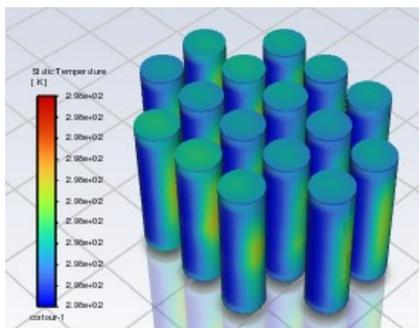


Figura 35. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por agua

En la Figura 36 se muestran los resultados para la geometría 3, empleando enfriamiento por agua mediante convección forzada. En este caso, también se inhibe la fuga térmica alcanzando el estado estable. En la Figura 37 está la distribución de la temperatura en las celdas, en donde los gradientes son despreciables.

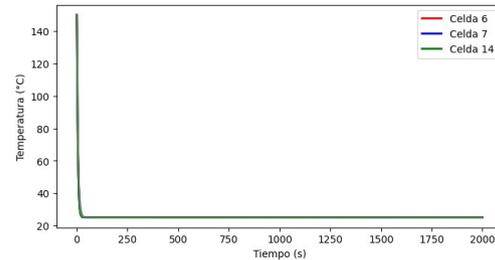


Figura 36. Geometría 3. Enfriado por agua convección forzada

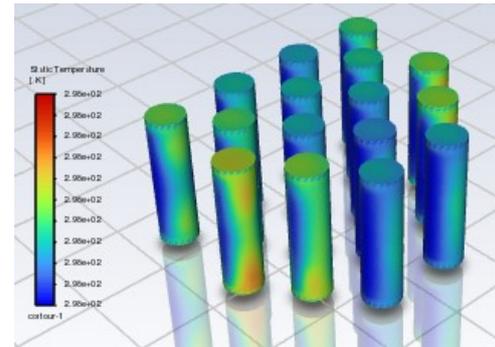


Figura 37. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por agua

3.3. Enfriamiento por PCM (RT82)

En la Figura 38 se expone el comportamiento térmico de la geometría 1, utilizando enfriamiento por PCM (RT82), lo cual previno la fuga térmica. La celda 16 alcanzó la temperatura más alta que fue de 161.40 °C en un tiempo de 61 s y luego se existe un decaimiento. En la Figura 39 se observa una distribución uniforme de la temperatura en las celdas.

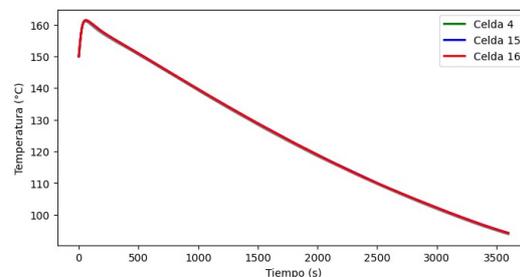


Figura 38. Geometría 1. Enfriado por PCM (RT82)

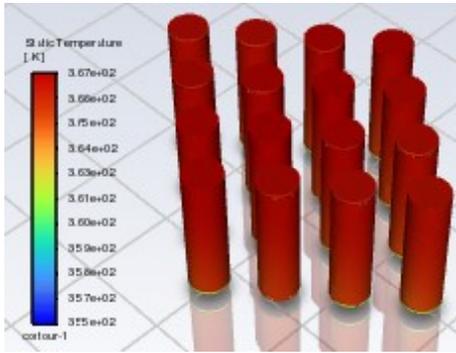


Figura 39. Geometría 1. Temperatura de las celdas a los 3600 s enfriado por PCM (RT82)

En la Figura 40 se presentan las temperaturas de las celdas para la geometría 2, empleando enfriamiento por PCM (RT82). En este caso también se evitó la fuga térmica, siendo las celdas 15 y 16 las que alcanzaron la temperatura más alta, que es 161.71 °C en un tiempo de 74 s. En la Figura 41 se muestra la distribución de la temperatura en las celdas, que también exhiben un patrón uniforme.

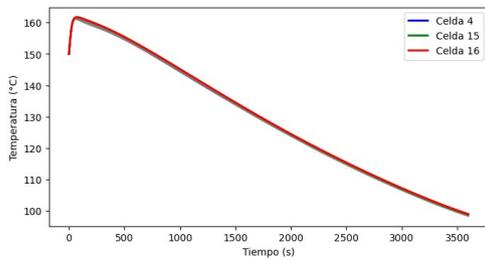


Figura 40. Geometría 2. Enfriado por PCM (RT82)

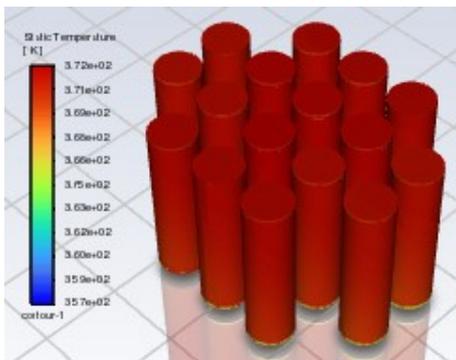


Figura 41. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 3600 s enfriado por PCM (RT82)

En la Figura 42 se muestran los resultados de la geometría 3, utilizando enfriamiento por PCM. La celda 15 alcanzó la temperatura más alta que es 161.46 °C en un tiempo de 59 s y luego también se produjo un decaimiento de temperatura. En la Figura 43 se muestra que la distribución de la temperatura en las celdas sigue siendo uniforme, de manera similar para las otras configuraciones geométricas con PCM.

El fenómeno de la fuga térmica tiene gran impacto al momento de elegir el sistema de enfriamiento y disposición geométrica de las celdas de las baterías, ya que de estos parámetros depende su inhibición. Por eso se han hecho varios estudios como Zhou et al. [17], que consiguieron prevenir la propagación de la fuga térmica, logrando permanecer por debajo de 185 °C y por encima de 60 °C durante solo 14 s. También Ouyang et al. [16] lograron reducir la temperatura máxima de las baterías de tipo 18650 desde 740.35 °C a 55.19 °C, previniendo la fuga térmica, mientras que en el estudio de Alghamdi et al. [18], utilizando PCM de parafina, se alcanzó una temperatura media de 85 °C.

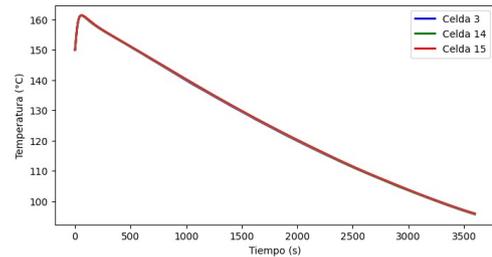


Figura 42. Geometría 3. Enfriado por PCM (RT82)

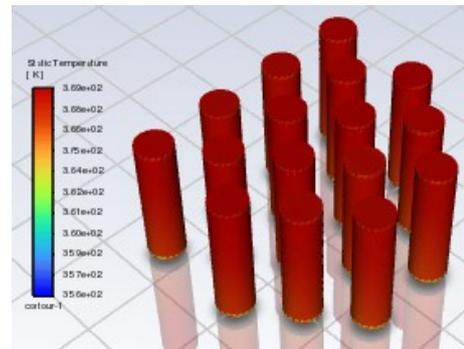


Figura 43. Geometría 3. Temperatura de las celdas a los 3600 s enfriado por PCM (RT82)

4. Conclusiones

Se llevó a cabo un estudio numérico para la refrigeración de celdas en un módulo de baterías refrigerado por aire, agua y PCM. Se propusieron tres diferentes configuraciones geométricas del módulo de baterías para estudiar la inhibición de la fuga térmica.

De las geometrías analizadas, en el caso de enfriamiento por convección natural por aire las tres configuraciones geométricas no evitaron la fuga térmica. Cuando se utilizó agua y PCM RT82 sí se logró evitar el fenómeno. Al emplear agua, la más eficiente es la geometría 1, alcanzando una temperatura máxima de 155.90 °C. Al usar PCM RT82, la más eficiente es la geometría 1, logrando una temperatura máxima de 161.40 °C.

Utilizando convección forzada por aire, la configuración más eficiente fue la geometría 1, obteniendo una temperatura máxima de 156.98 °C, mientras que, empleando enfriamiento por agua, la más eficiente también fue la geometría 1, logrando reducir la temperatura de 150 °C a 25.06 °C.

Con los resultados obtenidos se puede establecer que la geometría 1 es la más eficiente.

De los tres sistemas de enfriamiento utilizados en el estudio, el más eficiente en prevenir la fuga térmica es el agua, debido a la alta capacidad calorífica y alta conductividad térmica, permitiendo una distribución eficiente del calor y su posterior disipación.

Una de las limitaciones de este estudio es el uso de un número limitado de celdas por lo que se sugiere como trabajo futuro poner en marcha modelos con otras disposiciones geométrías adicionales y número de celdas. Además, se sugiere evaluar el contacto indirecto entre celdas y refrigerante, así como otros tipos de PCM. Este estudio ayuda a comprender mejor el fenómeno de la fuga térmica y, de esta manera, instrumentar el sistema de enfriamiento más adecuado para evitarlo.

Referencias

- [1] R. Gebart, “Thermal runaway criterion for thick polymer composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 182, p. 108187, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108187>
- [2] A. M. Divakaran, D. Hamilton, K. N. Manjunatha, and M. Minakshi, “Design, development and thermal analysis of reusable li-ion battery module for future mobile and stationary applications,” *Energies*, vol. 13, no. 6, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13061477>
- [3] G. E. Blomgren, “The development and future of lithium ion batteries,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 164, no. 1, p. A5019, dec 2016. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1149/2.0251701jes>
- [4] A. Carnovale, *Investigation into the Effect of Thermal Management on the Capacity Fade of Lithium-ion Batteries*. Mechanical and Mechatronics Engineering. University of Waterloo, 2016. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing33ar6r4>
- [5] D. Patel, J. B. Robinson, S. Ball, D. J. L. Brett, and P. R. Shearing, “Thermal runaway of a li-ion battery studied by combined arc and multi-length scale x-ray ct,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 9, p. 090511, apr 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1149/1945-7111/ab7fb6>
- [6] G. Guo, B. Long, B. Cheng, S. Zhou, P. Xu, and B. Cao, “Three-dimensional thermal finite element modeling of lithium-ion battery in thermal abuse application,” *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 8, pp. 2393–2398, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.090>
- [7] J. Fan, “On the discharge capability and its limiting factors of commercial 18650 li-ion cell at low temperatures,” *Journal of Power Sources*, vol. 117, no. 1, pp. 170–178, 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00354-9)
- [8] K. Amin, J. Zhang, H.-Y. Zhou, R. Lu, M. Zhang, N. Ashraf, C. YueLi, L. Mao, C. F. J. Faul, and Z. Wei, “Surface controlled pseudo-capacitive reactions enabling ultra-fast charging and long-life organic lithium ion batteries,” *Sustainable Energy Fuels*, vol. 4, pp. 4179–4185, 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/D0SE00610F>
- [9] K. Märker, C. Xu, and C. P. Grey, “Operando nmr of nmc811/graphite lithium-ion batteries: Structure, dynamics, and lithium metal deposition,” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 142, no. 41, pp. 17 447–17 456, Oct 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/jacs.0c06727>
- [10] R. D. McKerracher, J. Guzman-Guemez, R. G. A. Wills, S. M. Sharkh, and D. Kramer, “Advances in prevention of thermal runaway in lithium-ion batteries,” *Advanced Energy and Sustainability Research*, vol. 2, no. 5, p. 2000059, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/aesr.202000059>
- [11] Z. Rao and S. Wang, “A review of power battery thermal energy management,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4554–4571, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.096>
- [12] H. Behi, D. Karimi, R. Youssef, M. Suresh Patil, J. Van Mierlo, and M. Bercibar, “Comprehensive passive thermal management systems for electric vehicles,” *Energies*, vol. 14, no. 13, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14133881>
- [13] T. I. C. Buidin and F. Mariasiu, “Battery thermal management systems: Current status and design approach of cooling technologies,” *Energies*, vol. 14, no. 16, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14164879>
- [14] J. Du, Y. Sun, Y. Huang, and X. Wu, “Analysis of influencing factors of thermal management system for lifepo4 lithium battery under high power charging,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 11, no. 2, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/wevj11020044>

- [15] E. Grimonia, M. R. C. Andhika, M. F. N. Aulady, R. V. C. Rubi, and N. L. Hamidah, "Thermal management system using phase change material for lithium-ion battery," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2117, no. 1, p. 012005, nov 2021. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2117/1/012005>
- [16] T. Ouyang, B. Liu, C. Wang, J. Ye, and S. Liu, "Novel hybrid thermal management system for preventing li-ion battery thermal runaway using nanofluids cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 201, p. 123652, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123652>
- [17] H. Zhou, C. Dai, Y. Liu, X. Fu, and Y. Du, "Experimental investigation of battery thermal management and safety with heat pipe and immersion phase change liquid," *Journal of Power Sources*, vol. 473, p. 228545, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228545>
- [18] H. Alghamdi, M. F. M. Rosdi, A. Mukhtar, A. S. H. M. Yasir, and A. Alviz-Meza, "Controlling thermal runaway by simultaneous use of thermoelectric module and phase change material in the lithium-ion batteries of electric vehicles," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 52, p. 103697, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103697>
- [19] W. Wu, X. Yang, G. Zhang, K. Chen, and S. Wang, "Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system," *Energy Conversion and Management*, vol. 138, pp. 486–492, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.022>
- [20] X. Liu, Z. Zhou, W.-T. Wu, L. Wei, W. Wu, Y. Li, L. Gao, Y. Li, and Y. Song, "Modelling for the mitigation of lithium ion battery thermal runaway propagation by using phase change material or liquid immersion cooling," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 52, p. 103749, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103749>
- [21] Y. Li, G. Liu, and Z. Li, "Numerical modeling of thermal runaway in high-energy lithium-ion battery packs induced by multipoint heating," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 38, p. 102335, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102335>
- [22] R. Ni, D. Zhang, R. Wang, Z. Xie, and Y. Wang, "Prevention and suppression effects of phase change material on thermal runaway in batteries," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 48, p. 103160, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103160>
- [23] Y. Liu, Y. G. Liao, and M.-C. Lai, "Transient temperature distributions on lithium-ion polymer sli battery," *Vehicles*, vol. 1, no. 1, pp. 127–137, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/vehicles1010008>
- [24] Q. Li, C. Yang, S. Santhanagopalan, K. Smith, J. Lamb, L. A. Steele, and L. Torres-Castro, "Numerical investigation of thermal runaway mitigation through a passive thermal management system," *Journal of Power Sources*, vol. 429, pp. 80–88, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.04.091>
- [25] E. Paccha-Herrera, W. R. Calderón-Muñoz, M. Orchard, F. Jaramillo, and K. Medjaher, "Thermal modeling approaches for a licoo2 lithium-ion battery—a comparative study with experimental validation," *Batteries*, vol. 6, no. 3, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/batteries6030040>
- [26] E. Paccha-Herrera, A. Medina-Sisalima, D. Tapiaperalta, B. Solórzano-Castillo, J. Gómez-Peña, and I. Coronel-Villavicencio, "A numerical study on the influence of geometric cell configurations over the thermal performance in a lithium-ion battery module," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1370, no. 1, p. 012002, jul 2024. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1370/1/012002>
- [27] B. Launder and D. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 269–289, 1974. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- [28] H. Liu, C. Jin, H. Li, and Y. Ji, "A numerical study of pcm battery thermal management performance enhancement with fin structures," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1793–1802, 2023, selected papers from 2022 International Conference on Frontiers of Energy and Environment Engineering. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.214>
- [29] K. H. Kwon, C. B. Shin, T. H. Kang, and C.-S. Kim, "A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery," *Journal of Power Sources*, vol. 163, no. 1, pp. 151–157, 2006, special issue including selected papers presented at the Second International Conference on Polymer Batteries and Fuel Cells together with regular papers. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.03.012>

- [30] T. D. Hatchard, D. D. MacNeil, A. Basu, and J. R. Dahn, “Thermal model of cylindrical and prismatic lithium-ion cells,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 148, no. 7, p. A755, jun 2001. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1149/1.1377592>
- [31] G.-H. Kim, A. Pesaran, and R. Spotnitz, “A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells,” *Journal of Power Sources*, vol. 170, no. 2, pp. 476–489, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.018>
- [32] Y. Han, Y. Yang, T. Mallick, and C. Wen, “Nanoparticles to enhance melting performance of phase change materials for thermal energy storage,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/nano12111864>