

Influence of Cell Spacing on the Thermal Distribution of Lithium-Ion Batteries with Forced-Air Cooling

Julio C. Mamani Aguilar, Student¹ , Angie C. Quispe Herrera, Student² ,
Angel E. Obispo, Dr.³ , y Andrés G. Jirón, Msc.⁴ 
^{1,4} Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú,
aobispo@utp.edu.pe

Abstract- *The adoption of electric vehicles has become a well-established initiative, driven by their sustainability and significant environmental advantages compared to combustion vehicles. However, it has been observed that the batteries of these vehicles encounter temperature-related challenges during their charge and discharge cycles. This study investigates the influence of cell spacing on airflow distribution and temperature within the module through computational simulations. Two configurations with separations of $S_x = 20$ mm and $S_x = 23$ mm are analyzed to evaluate their impact on thermal dissipation. The results indicate that when the cell spacing is smaller, the airflow exhibits a more enveloping pattern around the cells, promoting a more uniform thermal dissipation. However, in this configuration, the maximum temperature reaches approximately 328 K. Conversely, when the spacing increases to $S_x = 23$ mm, the airflow moves more rapidly through the module without fully surrounding the cells, creating higher temperature regions on the right side of the module and reaching a maximum temperature of 325 K. It is concluded that a smaller spacing improves thermal uniformity, while a larger spacing reduces the peak temperature but generates more pronounced thermal gradients. The correlation between airflow distribution and temperature underscores the importance of optimizing cell arrangement to enhance cooling efficiency.*

Keywords- *Thermal management, Lithium-ion batteries, Forced-air cooling, Electric vehicles, Cell spacing.*

Influencia de la Separación entre Celdas en la Distribución Térmica de Baterías de Iones de Litio con Refrigeración por Aire Forzado

Julio C. Mamani Aguilar, Estudiante¹ , Angie C. Quispe Herrera, Estudiante² ,
Angel E. Obispo, Dr.³ , y Andrés G. Jirón, Mg.⁴ 
^{1,4}Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú,
aobispo@utp.edu.pe

Resumen— *A medida que la adopción de vehículos eléctricos se consolida como una iniciativa positiva, impulsada por su sostenibilidad y sus ventajas significativas al medio ambiente en contraste con los vehículos de combustión, se examina que el proceso inherente a las baterías de estos vehículos enfrenta desafíos asociados con la temperatura durante su ciclo de carga y descarga. En este estudio, se investiga cómo la separación entre celdas influye en la distribución del flujo de aire y la temperatura dentro del módulo mediante simulaciones computacionales. Se analizan dos configuraciones con separaciones de $S_x = 20$ mm y $S_x = 23$ mm para evaluar su impacto en la disipación térmica. Los resultados muestran que cuando la separación entre celdas es menor, el flujo de aire se distribuye de manera más envolvente alrededor de las celdas, lo que favorece una disipación térmica más uniforme. Sin embargo, en esta configuración, la temperatura máxima alcanza aproximadamente 328 K. Por otro lado, cuando la separación aumenta a $S_x = 23$ mm, el flujo de aire atraviesa el módulo más rápidamente sin rodear completamente las celdas, generando regiones de mayor temperatura en el lado derecho del módulo y alcanzando una temperatura máxima de 325 K. Se concluye que una menor separación mejora la uniformidad térmica, mientras que una mayor separación reduce la temperatura máxima, pero genera gradientes térmicos más pronunciados. La coherencia entre la distribución del flujo de aire y la temperatura destaca la importancia de optimizar la disposición de las celdas para mejorar la eficiencia del enfriamiento.*

Palabras clave— *Gestión térmica, Baterías de iones de litio, Refrigeración por aire forzado, Vehículos eléctricos, Separación entre celdas.*

I. INTRODUCCIÓN

A. Contextualización y Planteamiento del Problema

La transición hacia la movilidad eléctrica refleja un compromiso global con la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, en países como Perú, la adopción de vehículos eléctricos aún enfrenta barreras, como la limitada infraestructura de carga, los altos costos de adquisición y la falta de incentivos gubernamentales que promuevan su masificación. Además, factores culturales y la falta de conciencia sobre los beneficios ambientales y económicos a largo plazo de los vehículos eléctricos contribuyen a la lenta adopción en la región.

Un componente crítico para el desarrollo de estos vehículos es la batería, cuya gestión térmica es fundamental debido al calor generado durante los ciclos de carga y descarga. La

acumulación excesiva de calor puede afectar la seguridad, la eficiencia y la vida útil de las baterías de ion de litio, lo que subraya la necesidad de sistemas de refrigeración efectivos. Las altas temperaturas pueden acelerar la degradación de los materiales activos de las celdas, reducir la capacidad de almacenamiento de energía y, en casos extremos, provocar fallos catastróficos como incendios o explosiones.

En este contexto, la gestión térmica eficiente de las baterías se convierte en un desafío tecnológico crucial. Los sistemas de refrigeración por aire forzado han surgido como una alternativa viable debido a su simplicidad, bajo costo y facilidad de mantenimiento en comparación con sistemas de enfriamiento por líquidos. No obstante, la efectividad de estos sistemas depende en gran medida del diseño geométrico del arreglo de celdas y de la optimización del flujo de aire. Por ello, se propone el uso de modelos computacionales para evaluar diferentes disposiciones de celdas y optimizar la distribución térmica mediante refrigeración por aire forzado, con el objetivo de mejorar la uniformidad de la temperatura, reducir los picos térmicos y, en última instancia, prolongar la vida útil de las baterías.

B. Revisión Literaria

Diversos estudios han explorado estrategias para mejorar la gestión térmica en baterías de ion de litio, enfocándose tanto en sistemas de enfriamiento por aire como en métodos más avanzados de refrigeración líquida y de materiales de cambio de fase. En [1], se destaca la importancia de considerar limitaciones térmicas en el diseño de cargadores de batería para vehículos eléctricos (VE), subrayando cómo las temperaturas extremas afectan la eficiencia y la seguridad operativa de las celdas de ion de litio.

En [2], se investiga un sistema de gestión térmica basado en enfriamiento líquido, demostrando una mejora significativa en la disipación de calor en comparación con los sistemas de refrigeración por aire. Sin embargo, aunque el enfriamiento líquido es más eficiente, presenta desafíos en términos de costos, complejidad del sistema y mantenimiento. Por otro lado, [3] analiza la optimización de la estructura interna de los módulos de batería mediante simulaciones computacionales, destacando cómo la disposición geométrica de las celdas influye en la uniformidad de la temperatura.

Estudios como [4] y [5] abordan la implementación de materiales de cambio de fase (PCM) para mejorar la estabilidad térmica. En [4], se destaca el uso de PCM integrados

directamente en el módulo de batería, lo que permite una absorción eficiente del calor generado durante los ciclos de carga y descarga. Este enfoque mejora la estabilidad térmica al mantener temperaturas más constantes, aunque puede aumentar el peso total del sistema. Por su parte, [5] explora configuraciones híbridas que combinan PCM con sistemas de enfriamiento por aire, demostrando que esta sinergia optimiza la eficiencia térmica al tiempo que mitiga algunos de los desafíos relacionados con la masa y el volumen.

En [6], se exploran configuraciones geométricas rectangulares optimizadas mediante simulaciones con COMSOL Multiphysics, enfocándose en la evaluación de la distribución de temperatura y los gradientes térmicos generados bajo diferentes condiciones de operación. Este enfoque permite identificar puntos críticos de acumulación de calor y proponer mejoras en la disposición interna de las celdas para maximizar la eficiencia de la disipación térmica.

Por su parte, [7] se centra en la simulación de arreglos cilíndricos utilizando ANSYS Fluent, donde se analiza cómo la variación en el espaciado entre celdas y la orientación del flujo de aire influyen en la eficiencia del enfriamiento. Los resultados indican que configuraciones con espaciados optimizados permiten una mejor distribución del flujo de aire, reduciendo así los puntos calientes y mejorando la uniformidad térmica en todo el módulo.

En [8], se introduce un enfoque híbrido que combina la refrigeración por aire con disipadores de calor de alta conductividad térmica. Este estudio destaca cómo el uso de aletas de disipación térmica optimizadas en combinación con el flujo de aire forzado mejora significativamente la eficiencia en la disipación de calor. Los resultados indican que la incorporación de materiales con alta conductividad térmica, como el cobre o el aluminio, mejora la uniformidad térmica sin incrementar de manera significativa el peso del sistema, lo que es crucial para aplicaciones en vehículos eléctricos donde la relación peso-rendimiento es un factor determinante.

Por su parte, [9] explora técnicas de optimización del flujo de aire mediante el uso de algoritmos de inteligencia artificial (IA). Este enfoque permite la adaptación dinámica de parámetros operativos, como la velocidad del flujo de aire y la distribución del mismo, en función de las condiciones térmicas en tiempo real. Los resultados del estudio muestran mejoras sustanciales en la eficiencia térmica y una reducción del consumo energético asociado al sistema de refrigeración, lo que se traduce en una mayor eficiencia global del sistema de gestión térmica de la batería.

Estudios recientes, como [10] y [11], se centran en la optimización de la distribución del flujo de aire mediante variaciones en el espaciado entre celdas. En [10], se analiza cómo diferentes configuraciones de espaciado afectan la eficiencia térmica y el consumo de energía auxiliar, encontrando que un diseño cuidadosamente ajustado puede reducir significativamente la necesidad de energía adicional para la refrigeración. En [11], se realiza un estudio numérico sobre la gestión térmica de un módulo de batería de ion de litio utilizando enfriamiento por aire forzado, destacando la importancia de la orientación del flujo y la disposición de las

celdas para mejorar la disipación de calor y mantener la estabilidad térmica.

C. Contribución

Este estudio ofrece una contribución al campo de la gestión térmica de baterías de ion de litio, al centrarse en la evaluación de una disposición rectangular de celdas dentro de un sistema de refrigeración por aire forzado. La principal contribución radica en la integración de simulaciones avanzadas utilizando COMSOL Multiphysics, lo que permite un análisis del comportamiento térmico bajo diferentes configuraciones geométricas.

Además, el enfoque utilizado permite establecer correlaciones clave entre parámetros operativos, como la velocidad del flujo de aire y el espaciado entre celdas, y su influencia en la estabilidad térmica.

Esta investigación proporciona una base para futuras optimizaciones en el diseño térmico de módulos de baterías para vehículos eléctricos, abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo de sistemas de gestión térmica más eficientes, sostenibles y adaptables a diferentes condiciones operativas.

II. METODOLOGÍA

El modelo matemático utilizado en este estudio combina un enfoque electroquímico unidimensional con un modelo térmico bidimensional, permitiendo la representación del comportamiento de las baterías de ion de litio [10-15].

A. Modelo electroquímico unidimensional

El modelo electroquímico empleado, conocido como modelo Pseudo Bidimensional (P2D), permite describir con la dinámica de las baterías de iones de litio. Este modelo se basa en la teoría de soluciones concentradas y la teoría de electrodos porosos [11], permitiendo analizar el transporte de especies iónicas y la evolución de las reacciones electroquímicas dentro de la celda.

El análisis se centra en el movimiento unidireccional de los iones de litio desde el electrodo negativo, atravesando el separador, hasta el electrodo positivo. Se considera que el material activo en fase sólida está constituido por partículas esféricas de tamaño uniforme, lo que facilita la formulación matemática del problema [11,13]. La Fig. 1 presenta una representación esquemática del modelo P2D.

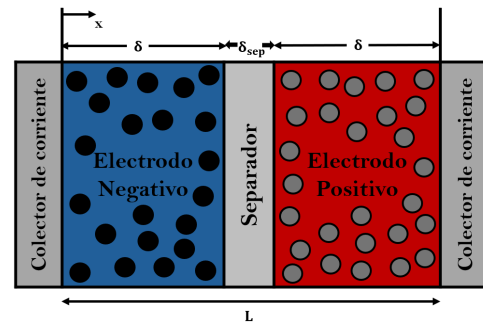


Fig. 1. Esquema del modelo electroquímico unidimensional de una celda de ion de litio.

1) Ecuaciones del modelo electroquímico

En las ecuaciones presentadas a continuación, el subíndice **n** representa el electrodo negativo, **s** el separador, y **p** el electrodo positivo. Estas ecuaciones describen la conservación de masa y carga en cada una de estas fases.

Conservación de la masa en la fase sólida: modela la difusión del litio dentro de las partículas sólidas de los electrodos.

$$\frac{\partial c_{s,i}}{\partial t} = \frac{D_{s,i}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_{s,i}}{\partial r} \right), i = (n, p) \quad (1)$$

Conservación de la masa en la fase electrolítica: Describe el transporte y la evolución temporal de la concentración de litio en el electrolito.

$$\varepsilon_{l,i} \frac{\partial c_i}{\partial t} = D_{\text{eff},i} \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + a_{ij,i} (1 - t_+), i = (n, s, p) \quad (2)$$

Conservación de la carga en la fase sólida: Relaciona la densidad de corriente en la fase sólida con la conductividad y el gradiente de potencial.

$$i_{s,i} = -\sigma_{\text{eff},i} \frac{\partial \phi_{s,i}}{\partial x}, i = (n, p) \quad (3)$$

Conservación de la carga en la fase electrolítica: Considera la conducción iónica en el electrolito y los efectos del transporte de carga.

$$i_{e,i} = -\kappa_{\text{eff},i} \frac{\partial \phi_{e,i}}{\partial x} + 2\kappa_{\text{eff},i} \frac{RT(1-t_+)}{F} \left(1 + \frac{d \ln f_{\pm}}{d \ln c_i} \right) \frac{\partial \ln c_i}{\partial x}, \quad (4)$$

$$i = (n, p)$$

Cinética electroquímica (ecuación de Butler-Volmer): Modela la relación entre la corriente de reacción y el sobrepotencial en la interfaz electrodo-electrolito.

$$j_i = a_i i_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_i \right) - \exp \left(-\frac{\alpha_c F}{RT} \eta_i \right) \right] \quad (5)$$

Corriente de intercambio: Representa la tasa de reacción electroquímica en función de la concentración de litio en la superficie del electrodo

$$i_0 = \kappa_i \left(c_{S_{\text{max}},i} - c_{S_{\text{surf}},i} \right)^{\alpha_a} c_{S_{\text{surf}},i}^{\alpha_c} c_i^{\alpha_a} \quad (6)$$

Sobrepotencial de activación: Expresa la diferencia de potencial entre la fase sólida y la fase electrolítica, considerando los efectos de la interfase SEI.

$$\eta_i = (\phi_{s,i} - \phi_{e,i} - \Delta \phi_{\text{SEI},i}) - E_i, i = (n, p). \quad (7)$$

2) Condiciones de frontera

Las ecuaciones anteriores requieren condiciones de frontera que definan el comportamiento de las variables en los límites del dominio del sistema.

Condiciones de frontera para la conservación de la masa en la fase sólida: Para la difusión de litio en las partículas de material activo, se establecen las siguientes condiciones de frontera:

$$D_{s,i} \frac{\partial c_{s,i}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (8)$$

$$-D_{s,i} \frac{\partial c_{s,i}}{\partial r} \Big|_{r=r_{s,i}} = j_i \quad (9)$$

Condiciones de frontera para la conservación de la masa electrolítica: El flujo de iones de litio en la fase electrolítica se impone como nulo en los extremos del dominio:

$$D_{\text{eff},i} \frac{\partial c_i}{\partial x} \Big|_{x=0,L} = 0. \quad (10)$$

Condiciones de frontera para la conservación de la masa electrolítica: El potencial de la fase sólida en los electrodos debe cumplir con:

$$\phi_{s,i} \Big|_{x=0} = 0, \quad (11)$$

$$-\sigma_{\text{eff},i} \frac{\partial \phi_{s,i}}{\partial x} \Big|_{x=L} = i_{\text{app}}. \quad (12)$$

Adicionalmente, en la interfaz entre el separador y los electrodos, el flujo de corriente en la fase sólida es nulo, lo que impone la condición:

$$-\sigma_{\text{eff},i} \frac{\partial \phi_{s,i}}{\partial x} \Big|_{x=\delta,L-\delta} = 0. \quad (13)$$

Estas condiciones aseguran que no haya corriente dentro del separador y que el potencial de la fase sólida sea continuo a través de la interfaz.

Condiciones de frontera para la conservación de la masa electrolítica: Para la fase electrolítica, las condiciones de frontera imponen la ausencia de acumulación de carga en los extremos:

$$\frac{\partial \phi_{e,i}}{\partial x} \Big|_{x=0,L} = 0. \quad (14)$$

B. Ecuaciones del modelo térmico bidimensional

Durante los procesos de carga y descarga, la batería genera calor debido a diferentes mecanismos físicos y electroquímicos.

Este calor es conducido hacia la superficie y disipado, mientras que una fracción permanece almacenada dentro de la batería. Para modelar la distribución de temperatura en el sistema, es necesario considerar ecuaciones clave como la ecuación de balance de energía y las ecuaciones de generación de calor.

La ecuación de balance de energía, basada en la conservación de la energía, permite analizar la distribución de temperatura y puede adaptarse a coordenadas cilíndricas para baterías de este tipo [15]. La ecuación general para la energía almacenada en la batería se expresa como:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2(\kappa_T T) + \dot{Q}_{act} + \dot{Q}_{rea} + \dot{Q}_{ohm} \quad (15)$$

donde el término del lado izquierdo representa la variación temporal de la temperatura en la batería, ρ es la densidad del material y C_p es la capacidad calorífica específica.

El primer término del lado derecho modela la conducción de calor, con como la conductividad térmica efectiva del material. Los tres últimos términos describen los mecanismos de generación de calor:

Calor por activación electroquímica: Proviene de las pérdidas de energía asociadas al sobrepotencial de activación en la interfaz electrodo-electrolito.

$$\dot{Q}_{act} = a_i F j_i \eta_i \quad (16)$$

Calor generado por la reacción electroquímica: Se origina debido a la variación del potencial de equilibrio con la temperatura.

$$\dot{Q}_{rea} = a_i F j_i T \frac{dE_i}{dT} \quad (17)$$

Calor óhmico: Considera las pérdidas térmicas debidas a la resistencia electrónica e iónica en la batería.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ohm} = & \sigma_{eff,i} \left(\frac{\partial \Phi_{s,i}}{\partial x} \right)^2 + \kappa_{eff,i} \left(\frac{\partial \Phi_{e,i}}{\partial x} \right)^2 \\ & + \frac{2\kappa_{eff,i} RT(1 - t_+)}{F} \left(1 + \frac{\partial \ln f_{\pm}}{\partial \ln c_i} \right) \frac{\partial \ln c_i}{\partial x} \frac{\partial \Phi_{e,i}}{\partial x} \\ & + a_i F j_i \Delta \Phi_{SEI} \end{aligned} \quad (18)$$

C. Parámetros del modelo

En este estudio, se resuelve un modelo electroquímico unidimensional acoplado a un modelo térmico bidimensional utilizando el software de elementos finitos COMSOL Multiphysics 4.2 [16]. Se considera un flujo de aire laminar e incompresible a través de un conjunto de baterías alojadas en un módulo compacto.

Las baterías están dispuestas en una configuración rectangular con un número total de celdas de $N = 45$ dentro de

un módulo de $L = 30$ cm de largo. La separación entre celdas en ambas direcciones, horizontal y vertical, está dada por S_x , y en este estudio se consideran dos casos con valores de 20 mm y 23 mm para evaluar su impacto en la distribución térmica del módulo. Ambos valores se encuentran dentro del rango previamente analizado en [17]. Se utilizan baterías comerciales de iones de litio tipo 18,650 con un diámetro de celda de $d = 0.018$ m de un único fabricante [17-19]. La batería se descarga a 1C durante 1800 s a 25°C.

Los parámetros principales de la batería, como la densidad, la capacidad calorífica y la conductividad térmica de las capas de la batería, se adoptan como valores promedio tomados de la literatura. De manera similar, los valores de difusividad D , conductividad κ_{eff} y el factor termodinámico para el electrolito $f_{\pm}$ provienen de fuentes experimentales [20-22], mientras que los potenciales de circuito abierto de los materiales de los electrodos se obtienen de [23]. Además, se asume que la tasa de reacción electroquímica y el coeficiente de difusión del litio en las partículas de los electrodos siguen la fórmula de Arrhenius [11].

Finalmente, las condiciones de frontera consideradas incluyen una entrada de velocidad, una salida de presión y superficies de batería sin deslizamiento. La temperatura de enfriamiento del aire en la entrada es de 25°C y la tasa de flujo se establece en 0.01326 m³/s. Se analiza una única velocidad de entrada de aire forzado de $V_o = 0.1$ m/s. Basándose en las propiedades termofísicas del aire, el número de Reynolds ($Re = \rho L V_o / \mu$) se encuentra en un régimen de flujo laminar [11].

La Fig. 2 ilustra el esquema del flujo de aire a través del módulo de baterías dispuesto en una configuración rectangular.

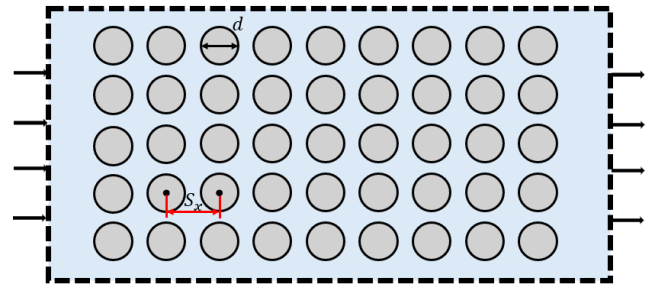


Fig. 2. Esquema del flujo de aire forzado a través del módulo de baterías dispuesto en una configuración rectangular.

D. Tabla de símbolos

Para complementar la descripción del modelo térmico, la Tabla I proporciona los símbolos utilizados en las ecuaciones térmicas y sus definiciones.

TABLA I
SÍMBOLOS DEL MODELO MATEMÁTICO

Símbolo	Descripción
a_i	Área interfacial específica de la fase sólida, m ⁻¹
c_s	Concentración de iones de Li en la fase sólida, mol m ⁻³

C_{Smax}	Concentración máxima teórica de Li en las partículas del electrodo, mol m ⁻³
C_{Ssurf}	Concentración de Li en la superficie de las partículas del electrodo, mol m ⁻³
c	Concentración del electrolito en la fase de solución, mol m ⁻³
C_p	Capacidad calorífica específica de la batería, J kg ⁻¹ K ⁻¹
D	Coefficiente de difusión del electrolito, m ² s ⁻¹
D_s	Coefficiente de difusión de Li en las partículas del electrodo, m ² s ⁻¹
E	Potencial de circuito abierto de los materiales del electrodo, V
F	Constante de Faraday, 96.485 C mol ⁻¹
$f_{\pm}$	Coefficiente de actividad de la sal molecular
i_{app}	Densidad de corriente aplicada a la batería, A m ⁻²
i_s	Densidad de corriente en la fase sólida, A m ⁻²
i_e	Densidad de corriente en la fase de electrolito, A m ⁻²
j_i	Flujo de reacción en la superficie, mol m ⁻² s ⁻¹
k_T	Conductividad térmica, W m ⁻¹ K ⁻¹
$\dot{Q}$	Tasa de generación de calor de la batería, W
r	Coordenada a lo largo de la dirección radial de la batería cilíndrica, m
R	Constante de los gases, mol m ⁻² K ⁻¹
T	Temperatura, K
t_+^0	Número de transferencia de los iones de litio con respecto a la velocidad del disolvente
x	Coordenada a lo largo de la dirección del grosor de los componentes de la célula, m
α_a	Coefficiente de transferencia del ánodo
α_c	Coefficiente de transferencia del cátodo
ε_l	Fracción volumétrica del electrolito
k	Conductividad iónica del electrolito, S m ⁻¹
H	Sobretensión en los materiales del electrodo, V
ϕ_s	Potencial en la fase sólida, V
ϕ_e	Potencial en la fase de electrolito, V
$\Delta\phi_{SEI}$	Caída de voltaje debido a la resistencia de la película SEI, V

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 3, se observa el comportamiento del flujo de aire dentro del módulo de baterías para las dos configuraciones analizadas. En la disposición más compacta ($S_x = 20$ mm, Fig. 3a), el flujo de aire se incrementa en las regiones superior e inferior de las celdas, distribuyéndose de manera uniforme a lo largo del módulo. El flujo máximo en esta configuración alcanza aproximadamente 0.35 m³/s, lo que indica una moderada capacidad de enfriamiento con una circulación de

aire relativamente estable. Sin embargo, en esta disposición también se identifican vórtices en la región posterior del módulo, lo que sugiere que la proximidad entre celdas genera zonas de recirculación que pueden afectar la eficiencia del enfriamiento localmente.

Por otro lado, en la configuración con mayor separación ($S_x = 23$ mm, Fig. 3b), el flujo máximo aumenta a 0.4 m³/s, indicando que una mayor distancia entre celdas permite una menor resistencia al paso del aire, facilitando la refrigeración global del sistema. En esta configuración, la distribución del aire es más continua y sin vórtices significativos en la región posterior del módulo, lo que podría reducir posibles zonas de acumulación de calor. No obstante, al permitir un mayor caudal de aire, también es posible que se generen gradientes térmicos más pronunciados entre las celdas debido a la menor obstrucción en el flujo de refrigeración.

Un aspecto fundamental en la comparación de ambas configuraciones es el equilibrio entre disipación térmica uniforme y la magnitud del flujo de aire. Mientras que una mayor separación entre celdas incrementa el caudal de aire, la menor separación favorece una distribución más homogénea del flujo, evitando la formación de regiones con ventilación insuficiente. Este análisis sugiere que la selección del espaciado óptimo entre celdas debe considerar no solo la cantidad de flujo de refrigeración disponible, sino también la uniformidad con la que este se distribuye para evitar sobrecalentamientos localizados.

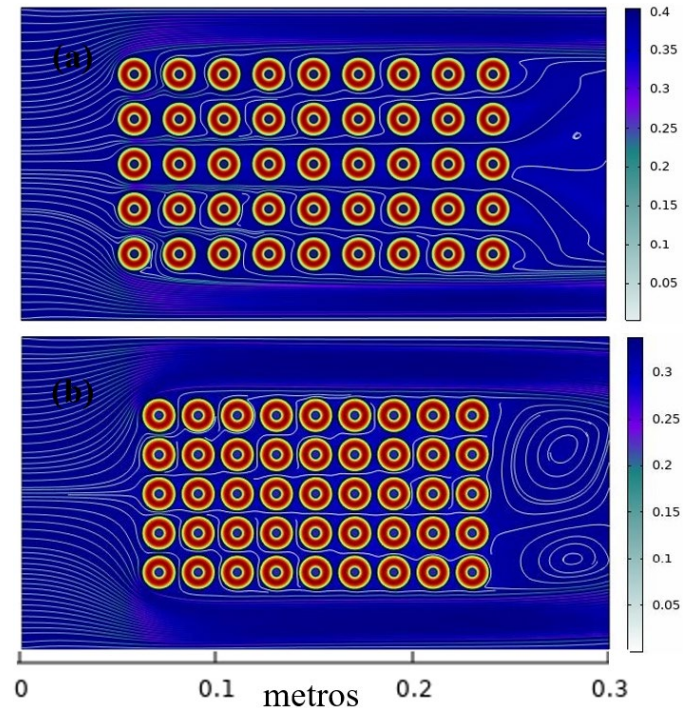


Fig. 3. Contorno del flujo volumétrico de aire (m³/s) a través del módulo de baterías. (a) Configuración con $S_x = 20$ mm. (b) Configuración con $S_x = 23$ mm.

En la Fig. 4, se presenta la distribución de temperatura en el módulo de baterías para ambas configuraciones de separación. En el caso de $S_x = 20$ mm (Fig. 4a), la temperatura máxima registrada es de aproximadamente 328 K, lo que indica una mayor acumulación de calor dentro del módulo debido a la restricción del flujo de aire. Por otro lado, en la configuración con $S_x = 23$ mm (Fig. 4b), la temperatura máxima es inferior, alcanzando 325 K, lo que sugiere una disipación térmica más eficiente gracias al mayor espacio disponible para la circulación del aire.

Se observa que, debido a que el flujo de aire es más envolvente cuando la distribución de celdas es más compacta, la temperatura en la Fig. 4a se distribuye de manera más uniforme en comparación con la Fig. 4b. En esta última, se aprecia que las celdas ubicadas en la región derecha del módulo se encuentran en un entorno con mayor temperatura que las celdas en la región izquierda. Esto ocurre porque, cuando las celdas están separadas por una mayor distancia, el flujo de aire atraviesa el módulo más rápidamente sin interactuar de manera homogénea con todas las celdas, lo que reduce el comportamiento envolvente del aire observado en el caso de la Fig. 4a.

En ambas configuraciones, se observa que la temperatura aumenta a medida que el aire se desplaza hacia la salida del módulo, lo que indica que el enfriamiento es más efectivo en la región de entrada. Sin embargo, en la Figura 4a, la proximidad entre las celdas dificulta la extracción del calor, provocando una acumulación térmica más notable. En contraste, en la Fig. 4b, el flujo de aire se distribuye de manera más lineal, lo que disminuye la homogeneidad térmica y genera regiones de mayor temperatura en ciertas zonas del módulo.

En términos de eficiencia de enfriamiento, la configuración más compacta (Fig. 4a) presenta una disipación térmica más uniforme, aunque con una temperatura máxima ligeramente superior. Mientras tanto, la mayor separación entre celdas en la Fig. 4b permite un flujo de aire más rápido, pero reduce la uniformidad de la disipación térmica dentro del módulo. Estos resultados resaltan la importancia de optimizar la disposición de las celdas para lograr un balance entre la uniformidad de la disipación térmica y la eficiencia del flujo de refrigeración.

Finalmente, es importante destacar que los resultados mostrados en la Fig. 4 muestran una distribución de temperatura que concuerda con el comportamiento del flujo de aire presentado en la Fig. 3. Específicamente, se observa que las diferencias en la manera en que el aire circula dentro del módulo afectan directamente la disipación térmica. Cuando el flujo es más envolvente, la temperatura se distribuye de manera más uniforme, mientras que cuando el flujo atraviesa el módulo de forma más rápida, se generan regiones con mayor temperatura.

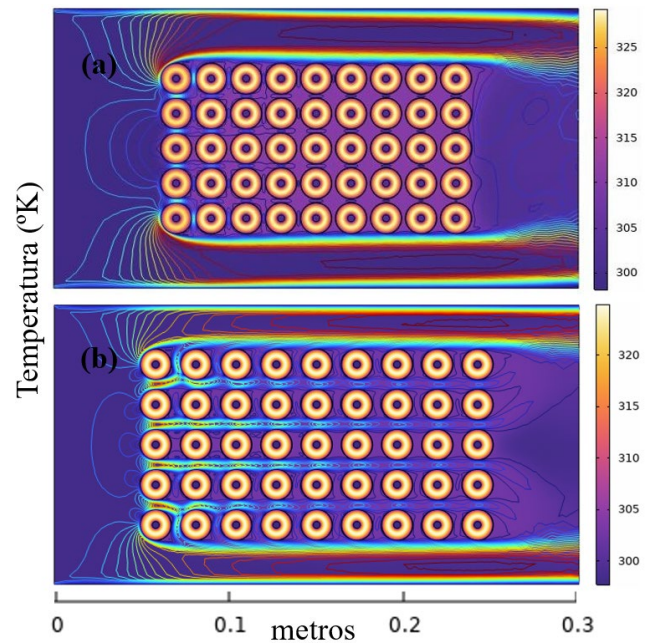


Fig. 4. Distribución de temperatura en el módulo de baterías. (a) Configuración con $S_x = 20$ mm. (b) Configuración con $S_x = 23$ mm.

IV. CONCLUSIONES

El análisis del comportamiento del flujo de aire y la distribución de temperatura en un módulo de baterías de ión de litio permitió evaluar el impacto de la separación entre celdas en la eficiencia del enfriamiento. Se compararon dos configuraciones con separaciones de $S_x = 20$ mm y $S_x = 23$ mm, mostrando diferencias significativas en la interacción del flujo con las celdas y en la disipación térmica del sistema.

Los resultados indicaron que, en la configuración más compacta ($S_x = 20$ mm), el flujo de aire presenta un comportamiento más envolvente, lo que favorece una distribución térmica más uniforme dentro del módulo. Sin embargo, también se observaron zonas de recirculación que pueden afectar la eficiencia del enfriamiento en ciertas regiones. Por otro lado, en la configuración con mayor separación ($S_x = 23$ mm), el flujo de aire atraviesa el módulo más rápidamente sin rodear completamente las celdas, lo que genera una mayor variabilidad térmica y regiones con temperaturas más elevadas.

Estos resultados destacan la importancia de optimizar la disposición de las celdas dentro del módulo para equilibrar la uniformidad de la disipación térmica y la magnitud del flujo de refrigeración. Una menor separación entre celdas favorece la homogeneidad térmica, mientras que una mayor separación permite un mayor caudal de aire, pero puede generar gradientes de temperatura más pronunciados. En aplicaciones donde la estabilidad térmica es crítica, la interacción del flujo con las celdas debe considerarse como un factor fundamental en el diseño de sistemas de refrigeración para baterías de ión de litio.

REFERENCIAS

- [1] M. Bayati, M. Abedi, M. Farahmandrad, G. B. Gharehpetian, and K. Tehrani, "Important Technical Considerations in Design of Battery Chargers of Electric Vehicles," *Energies*, vol. 14, no. 18, pp. 5878, 2021.
- [2] G. Hailu, M. Henke, and T. Petersen, "Stationary Battery Thermal Management: Analysis of Active Cooling Designs," *Batteries*, vol. 8, no. 3, 2022.
- [3] J. Chen, D. Xuan, B. Wang, and R. Jiang, "Structure optimization of battery thermal management systems using sensitivity analysis and stud genetic algorithms," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 16, 2021.
- [4] T. I. C. Buidin and F. Mariasiu, "Battery Thermal Management Systems: Current Status and Design Approach of Cooling Technologies," *Energies*, vol. 14, no. 16, pp. 4879, 2021.
- [5] J. Duan, J. Zhao, X. Li, S. Panchal, J. Yuan, R. Fraser, and M. Fowler, "Modeling and Analysis of Heat Dissipation for Liquid Cooling Lithium-Ion Batteries," *Energies*, vol. 14, no. 14, pp. 4187, 2021.
- [6] A. Divakaran, D. Hamilton, K. 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, pp. 1477, 2020.
- [7] G. H. Kim and A. Pesaran, "Battery Thermal Management Design Modeling," *The World Electric Vehicle Association Journal*, vol. 1, pp. 126-133, 2007.
- [8] G. Zhao, X. Wang, and M. Negnevitsky, "A study of variable cell spacings to the heat transfer efficiency of air-cooling battery thermal management system," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 23, 2021.
- [9] G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, H. Zhang, and C. Li, "Performance Improvement of a Novel Trapezoid Air-Cooling Battery Thermal Management System for Electric Vehicles," *Sustainability*, vol. 14, no. 9, 2022.
- [10] A. B. Padalkar, M. B. Chaudhari, and A. M. Funde, "Computational investigation for reduction in auxiliary energy consumption with different cell spacing in battery pack," *Journal of Energy Storage*, vol. 65, Aug. 2023.
- [11] L. K. Singh, G. Mishra, A. K. Sharma, and A. K. Gupta, "A numerical study on thermal management of a lithium-ion battery module via forced-convective air cooling," *International Journal of Refrigeration*, vol. 131, pp. 218-234, Nov. 2021.
- [12] A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, "A review on electric vehicles: Technologies and challenges," *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp. 372-404, 2021.
- [13] M. S. H. Lipu, M. Faisal, S. Ansari, M. A. Hannan, T. F. Karim, A. Ayob, A. Hussain, M. S. Miah, and M. H. M. Saad, "Review of electric vehicle converter configurations, control schemes and optimizations: Challenges and suggestions," *Electronics*, vol. 10, no. 4, 2021.
- [14] G. Previati, G. Mastinu, and M. Gobbi, "Thermal Management of Electrified Vehicles: A Review," *Energies*, vol. 15, no. 4, 2022.
- [15] I. Pérez, "Reparación de baterías de alta tensión – Configuración interna," Blog Mecánicos, 28 de mayo de 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.blogmecanicos.com/2022/05/reparacion-de-baterias-de-alta-tension.html>. [Accedido el 6 de octubre de 2023].
- [16] Comsol, "COMSOL Multiphysics Reference Manual," 2022. [Online]. Disponible en: <https://doc.comsol.com/6.1/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>.
- [17] R. Zhao, S. Zhang, J. Liu, and J. Gu, "A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system," *Journal of Power Sources*, vol. 299, pp. 557-577, 2015.
- [18] Electromaps, "Puntos de carga en la Provincia de Lima, Perú." [Online]. Disponible en: <https://www.electromaps.com/es/puntos-carga/peru/provincia-de-lima>. [Accedido el 6 de octubre de 2023].
- [19] J. Jyoti, B. P. Singh, and S. K. Tripathi, "Recent advancements in development of different cathode materials for rechargeable lithium-ion batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 43, p. 103112, 2021.
- [20] H. A., T. Hussein, M. Azher, I. Hayder, and B. Nirmalendu, "A novel air-cooled Li-ion battery (LIB) array thermal management system – a numerical analysis," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 190, p. 108327, 2023.
- [21] N. Yao, X. Zhang, G. Li, and H. Dong, "Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements," *Applied Thermal Engineering*, vol. 80, pp. 55-65, 2015.
- [22] H. A., T. Hussein, I. Hayder, M. Azher, and Z. Raad, "CFD simulation of effect spacing between lithium-ion batteries by using flow air inside the cooling pack," *Journal of Energy Storage*, vol. 72, p. 108631, 2023.
- [23] S. Cagtay, G. Sinan, and C. Erdal, "Thermal management system for air-cooled battery packs with flow-disturbing structures," *Journal of Power Sources*, vol. 551, p. 232214, 2022.