

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR INMERSIÓN EN LÍQUIDO PARA BATERÍAS DE IONES DE LITIO EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Juan Gabriel Agripino Mata ^a, Jorge Arturo Alfaro Ayala ^{a,*}

^a Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato,
Universidad de Guanajuato, ja.alfaroayala@ugto.mx

Resumen

Este estudio evalúa el desempeño térmico de un sistema de enfriamiento por inmersión para baterías de iones de litio tipo 18650, ampliamente utilizadas en vehículos eléctricos. Se utilizaron simulaciones numéricas mediante CFD (ANSYS Fluent) para analizar el comportamiento y la eficiencia térmica de diferentes fluidos dieléctricos (E5-TM410, HFE-7200 y aceite mineral) en una configuración geométrica propuesta en este mismo trabajo. Inicialmente, se replicó una geometría basada en trabajos anteriores, la cual fue validada con resultados obtenidos en este trabajo. Posteriormente, se propuso una mejora geométrica incrementando el número y el diámetro de las entradas/salidas del fluido, de 3 a 6 entradas/salidas y de 12 mm a 20 mm, lo que permitió reducir la temperatura máxima en un 0.36 % y la diferencia térmica entre celdas en un 12.4 %. Los resultados con un flujo volumétrico de 5 L/min muestran que el fluido E5-TM410 ofreció el mejor rendimiento térmico con una temperatura máxima de 305.93 K, aunque con mayor caída de presión de 34.81 Pa. Por otro lado, el HFE-7200 presentó la menor caída de presión, 4.88 Pa, pero con menor efectividad térmica con una temperatura máxima de 307.75 K. El aceite mineral mostró un comportamiento intermedio con una temperatura máxima de 306.44 K y una caída de presión de 9.15 Pa. Se concluye que una adecuada selección del fluido y diseño geométrico mejoran significativamente la eficiencia del sistema de enfriamiento por inmersión.

Palabras clave: baterías ion-litio; enfriamiento por inmersión; fluido dieléctrico; CFD.

STUDY OF AN IMMERSION LIQUID COOLING SYSTEM FOR LITHIUM-ION BATTERIES IN ELECTRIC VEHICLES USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Abstract

This study evaluates the thermal performance of an immersion cooling system for 18650-type lithium-ion batteries, which are widely used in electric vehicles. Numerical simulations using CFD (ANSYS Fluent) were conducted to analyze the thermal behavior and effectiveness of different dielectric fluids (E5-TM410, HFE-7200, and mineral oil) within a geometric configuration proposed in this work. Initially, a geometry based on previous works was replicated and validated with results obtained in this study. Subsequently, a geometric improvement was proposed by increasing the number and diameter of the fluid inlets/outlets, from 3 to 6 fluid inlets/outlets and from 12 mm to 20 mm, which helped reduce both the maximum temperature by 0.36 % and the thermal difference between cells by 12.4 %. The results obtained using a volumetric flow of 5 L/min indicate that the E5-TM410 fluid exhibits the best thermal performance, with a maximum temperature of 305.93 K, albeit with a higher-pressure drop of 34.82 Pa. In contrast, HFE-7200 exhibited the lowest pressure drop with 4.88 Pa but had lower thermal effectiveness with a maximum temperature of 307.75 K. Mineral oil demonstrated intermediate behavior with a maximum temperature of 306.44 K and a pressure drop of 9.15 Pa. It is concluded that proper fluid selection and geometric design significantly enhance the efficiency of immersion cooling systems.

Keywords: Lithium-ion batteries; immersion cooling; dielectric fluid; CFD.



1. Introducción

El crecimiento de la industria de los vehículos eléctricos (EV) ha impulsado el desarrollo de baterías de iones de litio con alta densidad energética, lo que ha aumentado la necesidad de sistemas de gestión térmica eficientes que garanticen un desempeño seguro y prolongado. Uno de los retos más importantes es controlar la temperatura de operación y mantener la homogeneidad térmica dentro del paquete de baterías, ya que el sobrecalentamiento puede causar algún tipo de degradación, pérdida de eficiencia o incluso eventos peligrosos como la fuga térmica (Wang y col., 2014 y Wang y col., 2017).

Diversas estrategias de gestión térmica han sido exploradas, entre ellas el enfriamiento por aire forzado, placas frías, canales miniaturizados y, más recientemente, el enfriamiento por inmersión. En los estudios recientes, (Wang y col., 2014) se han analizado diferentes disposiciones estructurales de celdas y configuraciones de flujo que impactan en la distribución de temperatura, destacando la importancia del diseño del módulo y de la ubicación de entradas y salidas de flujo (Wang y col., 2014 y Wang y col., 2017). Por ejemplo, se ha

demostrado que arreglos cúbicos con ventiladores ubicados en la parte superior mejoran significativamente la uniformidad térmica en comparación con arreglos hexagonales o circulares (Wang y col., 2014).

Frente a las limitaciones de los métodos tradicionales, el enfriamiento por inmersión (IC) se ha posicionado como una solución altamente efectiva. Este método elimina las resistencias térmicas intermedias al sumergir directamente las celdas en fluidos dieléctricos, lo cual mejora la transferencia de calor y suprime la propagación de eventos térmicos peligrosos (Banerjee y Nidhul, 2025 y Wahab y col., 2025). Se ha estudiado el enfriamiento de baterías con diversos fluidos dieléctricos como el Novec 7200, n-heptano y agua desionizada, y se ha comprobado que el uso de estructuras como aletas en V o ductos optimizados permite reducir hasta en 14 K la temperatura máxima de operación de las baterías (Banerjee y Nidhul 2025). Además, el uso de geometrías mejoradas en los ductos y el enfriamiento a través de tabs han permitido reducir en más del 79 % el volumen de los sistemas de enfriamiento y, en algunos casos, el consumo energético de bombeo ha sido menor al 0.004 % de la energía del módulo (Han y col., 2025).



Los modelos numéricos y experimentales también han contribuido al desarrollo de sistemas eficientes. Se ha aplicado dinámica de fluidos computacional (CFD), metodologías de optimización paramétrica y análisis de superficies de respuesta para identificar parámetros críticos como la velocidad del flujo, el espaciamiento entre celdas, y el diseño de canales y aletas (Afzal y col., 2025; Zhao y col., 2021; Chu y col., 2024). Por ejemplo, Zhao y col. (2021), en su trabajo, presentan el diseño con pin-fins de diámetro variable optimizado mediante algoritmos genéticos, que logró reducir la desviación estándar de temperatura en 17.43 % y el consumo de energía en casi 30 %. Asimismo, se ha encontrado que configuraciones con menor número de canales y distribuidores mejoran la densidad energética al tiempo que se mantiene la temperatura dentro del rango óptimo.

Los trabajos previos demuestran que el enfriamiento por inmersión monofásico es una alternativa viable y eficiente para la gestión térmica de baterías de iones de litio. La CFD ha sido una herramienta fundamental para entender los fenómenos de transferencia de calor involucrados, y los estudios coinciden en que la selección adecuada del

fluído, la configuración geométrica de las celdas y las condiciones de flujo son factores críticos para optimizar el rendimiento del sistema. Sin embargo, aún existen retos por abordar como la estabilidad a largo plazo de los fluidos y la compatibilidad entre materiales. Estas brechas marcan el camino para futuras investigaciones, y justifican el presente estudio, que busca evaluar mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) el desempeño térmico de un sistema de enfriamiento por inmersión aplicado a baterías de iones de litio para vehículos eléctricos

2. Metodología

Para este trabajo se usó el software comercial ANSYS Fluent® para hacer las simulaciones correspondientes basadas en el trabajo de Han y col. 2025, en su estudio, se muestra el análisis de enfriamiento de baterías de iones de litio tipo 18650, un formato ampliamente utilizado en aplicaciones de vehículos eléctricos por su densidad energética y estandarización industrial.

Desde el punto de vista termofísico, las propiedades fundamentales de las celdas de la batería se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de las baterías.

Propiedad	Batería
Densidad (kg/m ³)	2055.1
Calor específico (J/kg·K)	1129.95
Conductividad térmica (W/m·K)	1.07 (radial) 19.03 (axial, tangencial)

Para este estudio se simuló el enfriamiento de baterías de iones de litio con varios fluidos dieléctricos con el fin de comparar su desempeño térmico y viabilidad técnica, así como analizar su interacción con la geometría. Se simularon 3 fluidos dieléctricos diferentes, E5-TM410, HFE 7200 y un aceite mineral, (Chu y col., 2024, Han y col., 2025 y Aguirre y col., 2023). Las propiedades de estos fluidos se muestran en la Tabla 2. También se definieron aspectos como el modelo de turbulencia que se empleó, en este

caso para definirlo se tomó como base el cálculo del Reynolds en una región específica de la geometría, justo en la separación entre las baterías, en este caso el Reynolds tiene un valor aproximado de 1.25×10^4 (altamente turbulento), además la geometría del aletado favorece en gran medida que el flujo tenga un régimen turbulento, por lo que el modelo elegido para la simulación fue el Standard k- ϵ y se consideró en estado estacionario.

Tabla 2. Propiedades de los diferentes fluidos dieléctricos, (Chu y col., 2024; Han y col., 2025; Aguirre y col., 2023).

Propiedad	E5-TM410	HFE 7200	Aceite mineral
Densidad (kg/m ³)	805	1435	774
Calor específico (J/kg·K)	2100	1367.9	2130
Conductividad térmica (W/m·K)	0.14	0.0667	0.135
Viscosidad (Pa·s)	0.015617	0.000602	0.00333

2.1. Ecuaciones gobernantes.

Para predecir las características de transferencia de calor de las baterías con enfriamiento por inmersión en fluido dieléctrico, se resuelven numéricamente las ecuaciones de continuidad, momento y energía (1)-(3).

$$\frac{\partial \rho_\omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\omega U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_\omega}{\partial t} U + \nabla \cdot (\rho_\omega U) U = -\nabla p + (\mu_\omega \nabla U) \quad (2)$$

$$\rho_\omega C_{p,\omega} \frac{\partial T_\omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\omega C_{p,\omega} U T_\omega) = \nabla \cdot (k_\omega \nabla T_\omega) \quad (3)$$

Donde ρ_ω es la densidad del fluido de trabajo, U es la velocidad, p es la presión, k_ω es la conductividad térmica del fluido, μ_ω es la viscosidad del fluido, T_ω es la temperatura del fluido y $C_{p,\omega}$ es el calor específico del fluido.

La ecuación de conservación de energía es:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_b C_{p,b} T_b) = \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) + Q_{\text{total}} \quad (4)$$

Donde el subíndice “b” indica que es una propiedad de las baterías.

2.2. Condiciones de frontera.

La fuente de calor de la batería a una tasa de descarga de 5C puede expresarse con la ecuación:

$$Q_b = 0.0013t^3 - 0.97t^2 + 143.12t + 293016 \quad (5)$$

Esta se obtiene de los datos experimentales del trabajo presentado por (Dong y col., 2021) y que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos experimentales de la generación de calor de baterías de ión-litio.

Tiempo	Generación de calor (W)	Tiempo	Generación de calor (W)
0	4.91	432	4.75
71	4.89	504	4.75
144	4.84	576	4.72
216	4.82	648	5.57
287	4.73	720	6.29
360	4.66		

La expresión (5) se considera como la generación de calor para el paquete de baterías al simular sus características de transferencia de calor y se emplea como condición de frontera en el modelo numérico. Para el refrigerante E5-TM410 seleccionado como fluido de trabajo para esta simulación numérica se consideran las siguientes propiedades: la temperatura de entrada del fluido de trabajo se establece en 25 °C, la condición de la pared de la superficie de las baterías se establece como “no deslizamiento”, la velocidad de flujo es de 5 L/min y la presión a la salida se considera de 0 Pa. En las simulaciones numéricas, se asume que las propiedades termofísicas son constantes; por lo tanto, se ignora el efecto de la temperatura sobre las propiedades termofísicas.

2.3. Geometría y mallado.

Tomando como base el trabajo de Han y col. (2025) donde se proponen varias configuraciones de cajas, de acomodo de las celdas y diferentes tipos de aletados, la geometría final que tiene el mejor rendimiento es la mostrada en las Figuras 1 y 2 y las características físicas de esta geometría se muestran en la Tabla 4.

Por otro lado, la geometría que se propuso en este trabajo cuenta con algunas mejoras como el aumento tanto de entradas como salidas de 3 a 6 y aumentando el diámetro de cada entrada y salida hasta los 20 mm, manteniendo el resto de las características como en el estudio original, esta geometría puede verse en la Figura 3 y 4, además, cuenta con las características mostradas en la Tabla 5.

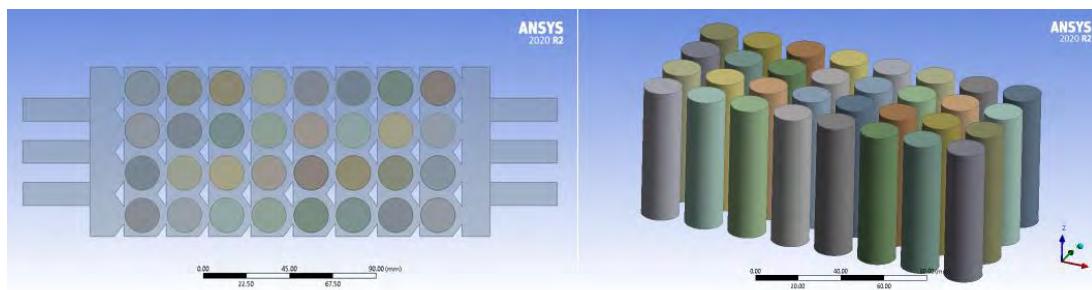
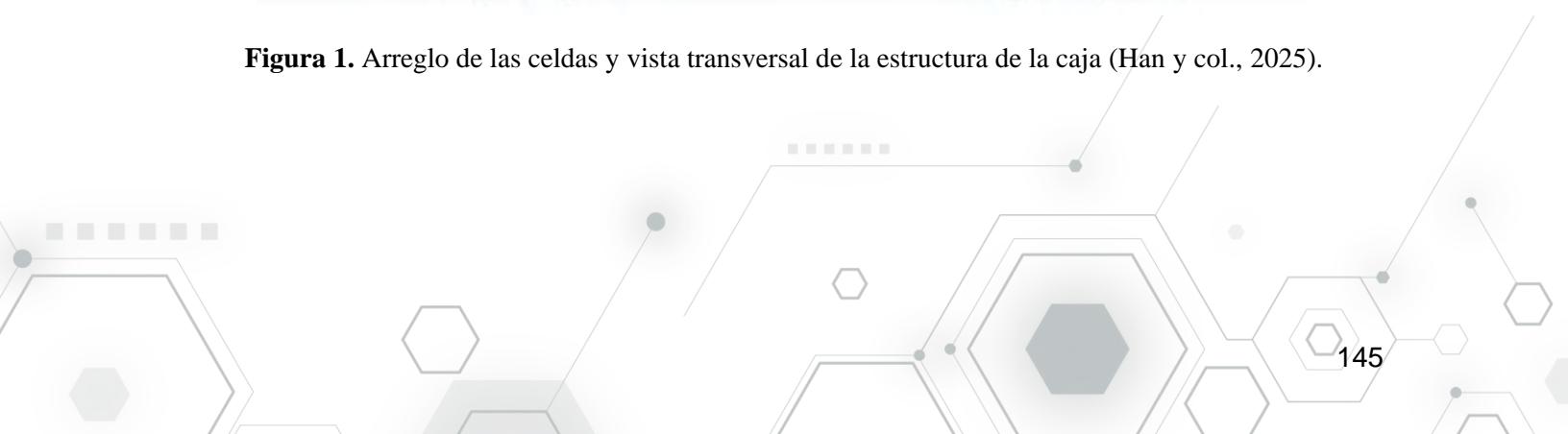


Figura 1. Arreglo de las celdas y vista transversal de la estructura de la caja (Han y col., 2025).



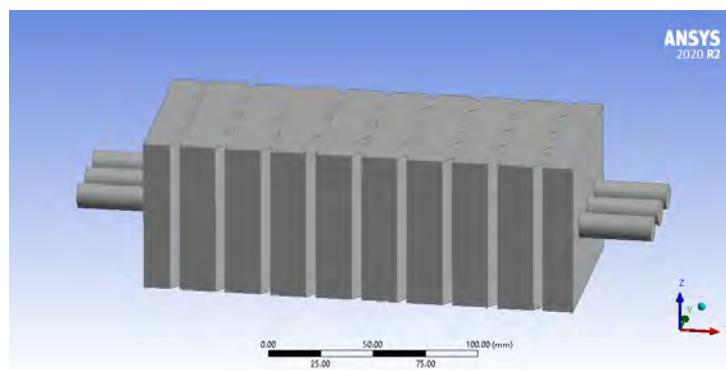


Figura 2. Estructura de la caja del trabajo (Han y col., 2025).

Tabla 4. Dimensiones de la geometría (Han y col., 2025).

Dimensión	Valor
Arreglo de las celdas	Cuadrado
Diámetro de celda (mm)	18
Altura de celda (mm)	65
Separación entre celdas (mm)	4
Separación entre baterías y las caras de la caja (mm)	4
Caras transversales al flujo	18
Caras paralelas al flujo	2
Número de entradas/salidas	3/3
Diámetro de entradas y salidas	12
Longitud de la base del triángulo (aletas)	13
Longitud de la altura del triángulo (aletas)	3.02

1

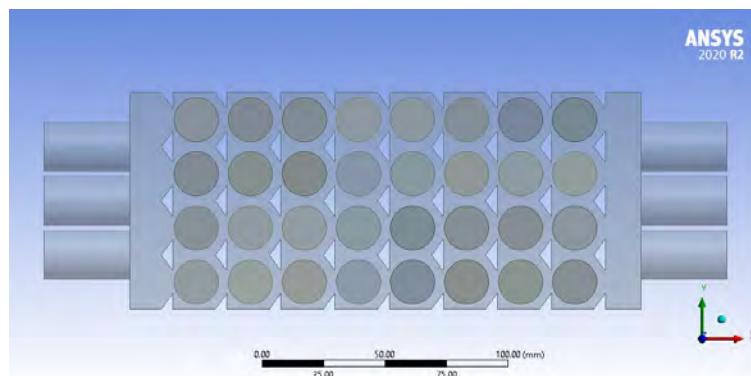


Figura 3. Vista transversal de la estructura propuesta.

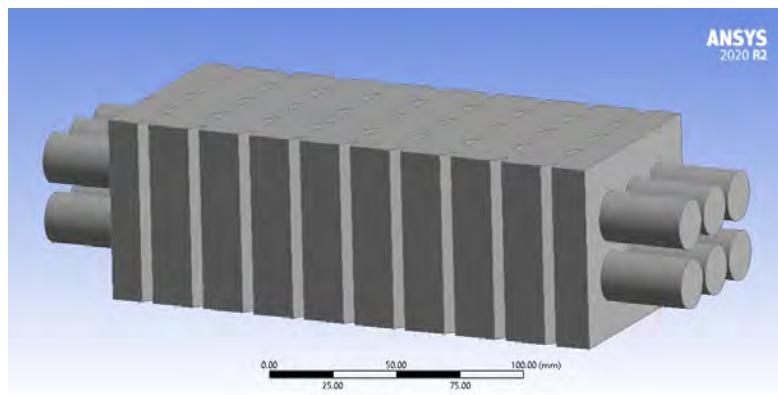


Figura 4. Estructura propuesta.

Tabla 5. Dimensiones de la geometría propuesta en este trabajo.

Dimensión	Valor						
Arreglo de las celdas	Cuadrado						
Diámetro de celda (mm)	18						
Altura de celda (mm)	65						
Separación entre celdas (mm)	4						
Separación entre baterías y las caras de la caja (mm)	<table> <tr> <td>Arriba y abajo</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Caras transversales al flujo</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>Caras paralelas al flujo</td> <td>2</td> </tr> </table>	Arriba y abajo	4	Caras transversales al flujo	18	Caras paralelas al flujo	2
Arriba y abajo	4						
Caras transversales al flujo	18						
Caras paralelas al flujo	2						
Número de entradas/salidas	6/6						
Diámetro de entradas y salidas	20						
Longitud de la base del triángulo (aletas)	13						
Longitud de la altura del triángulo (aletas)	3.02						

El mallado se eligió con base a un análisis de malla, es decir que los resultados no dependan de ésta, resultando un tamaño de elemento óptimo de 0.0015 m, lo cual se traduce a un total de 2,013,422 elementos, el mallado se muestra en la Figura 5.

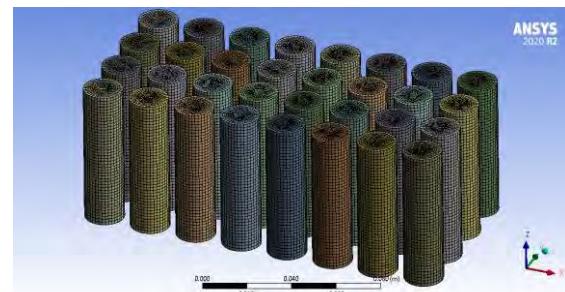


Figura 5. Mallado óptimo para este trabajo

3. Análisis de resultados

3.1. Análisis de malla

Respecto al análisis de malla, se realizó la simulación con varios tamaños de elemento

de la malla, desde 0.001 hasta 0.004 en intervalos de 0.0005. En la siguiente gráfica (Figura 6) es posible ver cómo cambia la temperatura máxima en función de la cantidad de elementos del mallado.

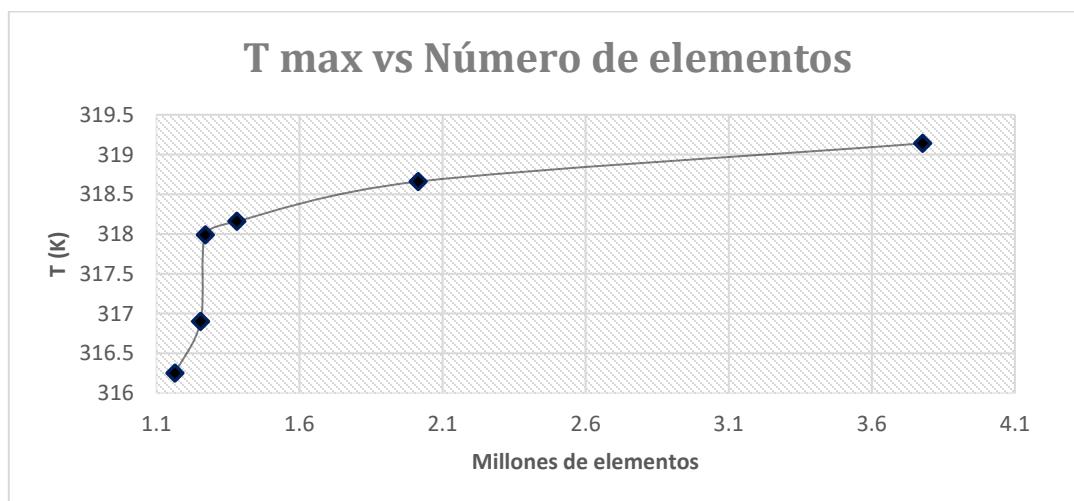


Figura 6. Gráfico "Temperatura máxima vs número de elementos" para el análisis de malla.

Con base en la Figura 6, se puede decir que, a partir de 2,014,803 elementos, correspondiente a un tamaño de elemento de 1.5 mm, es un buen parámetro para usar en nuestra simulación dada la tendencia que comienza a tomar la curva (línea horizontal).

3.2. Validación del modelo

Al replicar la geometría y condiciones de frontera del trabajo realizado por Han y col. y hacer la simulación con distintas velocidades

tal como en el estudio en el programa ANSYS Fluent se obtuvieron los resultados que se pueden ver en la Figura 7 que muestra los contornos de las celdas con la distribución de la temperatura, en la figura es posible ver como varía la distribución de la temperatura según se aumenta el flujo volumétrico; en la Figura 8 es posible ver los resultados mostrados en el trabajo de Han y col. (2025) a manera de comparación con los resultados obtenidos en el presente trabajo, la simulación se llevó a cabo bajo las mismas

condiciones que reportaba en su trabajo a excepción de la cantidad de celdas en el mallado, por lo que los resultados son muy similares. Además, en la Tabla 6 se muestran los datos de temperatura máxima y diferencia

de temperatura entre las celdas según el flujo volumétrico empleado y en la Tabla 7 se puede ver una comparación de los datos obtenidos con los del trabajo de Han y col. (2025) y su porcentaje de error.

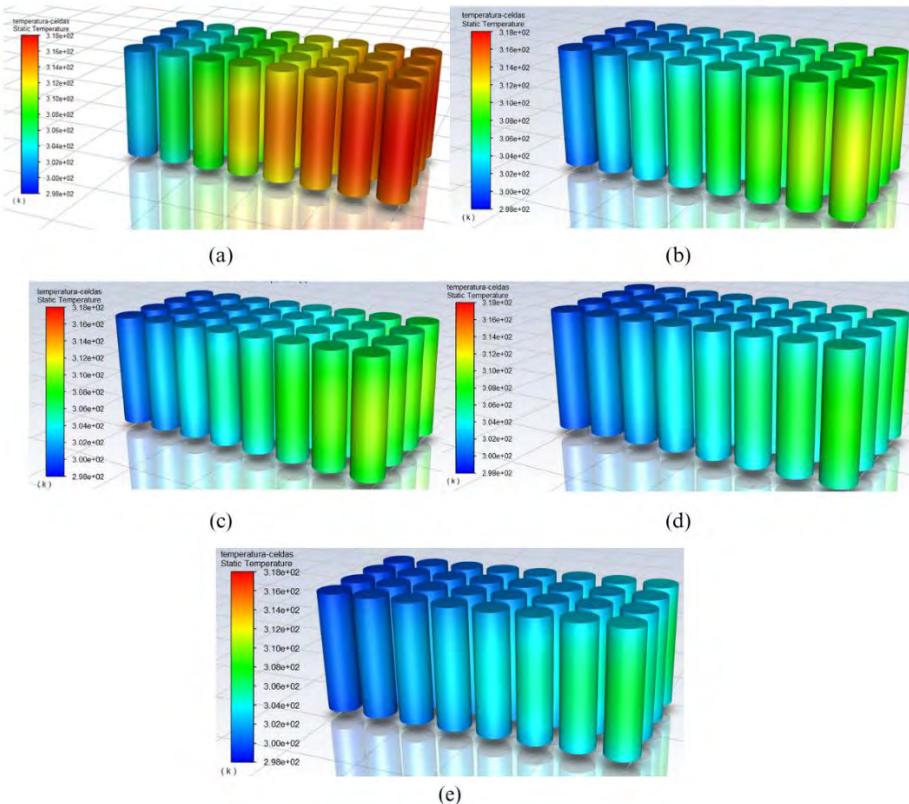


Figura 7. Resultados de contorno de temperatura (K) obtenidos de la simulación, usando la geometría del trabajo de Han y col. (2025), para un flujo de (a) 1 L/min, (b) 2 L/min, (c) 3 L/min, (d) 4 L/min, (e) 5 L/min.

Tabla 6. Datos de temperatura máxima y diferencia de temperatura según el flujo volumétrico.

Flujo volumétrico (L/min)	Temperatura máxima (K)	Diferencia de temperatura (K)
1	318.31	18.17
2	312.4	13.26
3	309.2	10.06
4	308.21	9.07
5	307.04	8.2

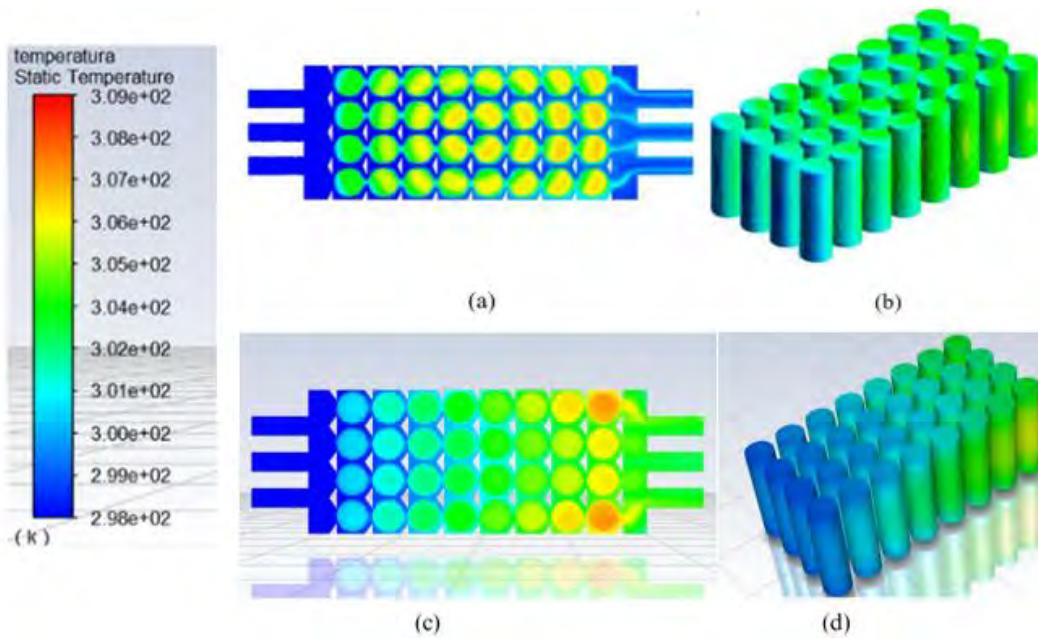


Figura 8. Comparación de los contornos de temperatura (K) con un flujo volumétrico de 5 L/min: (a) contorno de un plano del trabajo de Han y col. (2025), (b) contorno de las celdas del trabajo de Han y col. (2025), (c) contorno de un plano del presente trabajo, (d) contorno de las celdas del presente trabajo.

Tabla 7. Comparación de resultados y porcentaje de error respecto al estudio de Han y col. (2025).

Flujo volumétrico (L/min)	Para este trabajo		Trabajo de Han		% error	
	T max (K)	ΔT (K)	T max (K)	ΔT (K)	T max	ΔT
1	318.46	18.17	316.65	15.8	3.3	15
2	312.55	13.26	312.65	11.3	0.6	17.3
3	309.35	10.06	310.35	9.4	3	7
4	308.36	9.07	309	8.3	2.2	9.2
5	307.19	8.2	308.2	8	3.3	2.5

Estos valores de error nos ayudan a validar el modelo al notar que tenemos errores de entre

0.6 % y 3.3 % en los valores de temperatura máxima, lo que nos indica que este modelo

simula de forma correcta los fenómenos térmicos.

3.3. Mejoras en la geometría

Como parte de este trabajo, se propuso una mejora en la geometría del trabajo de Han y col. (2025) al que se le incrementan tanto el número de entradas y salidas como su diámetro, como se puede ver en la Figura 3 y la Figura 4. Al realizar estos cambios en la geometría y hacer la simulación, se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 9.

Ahora se puede comparar los resultados de esta simulación (con mejoras) con los de la validación; esta comparación puede verse en la Figura 10 donde es posible ver una comparación de los contornos en un plano,

con el fin de ver de mejor manera la distribución de la temperatura y como las mejoras añadidas a la geometría del trabajo de Han y col. lograron una mejor uniformidad en la temperatura, de igual forma se puede ver una comparativa en la Figura 11, en este caso en contornos de la distribución de temperatura en las baterías, lo que brinda otra perspectiva para ver cuan uniformemente se distribuye la temperatura en las celdas. También se muestran los resultados de forma numérica en la Tabla 8; en ella se puede ver claramente la diferencia en los datos obtenidos de la simulación, como la diferencia de temperaturas y la temperatura máxima.

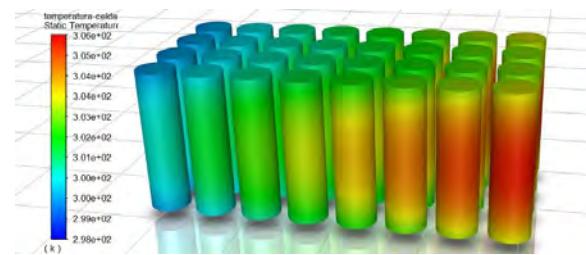
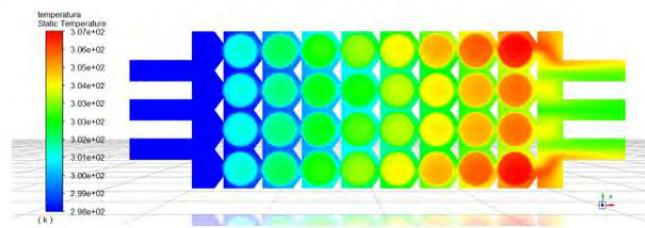
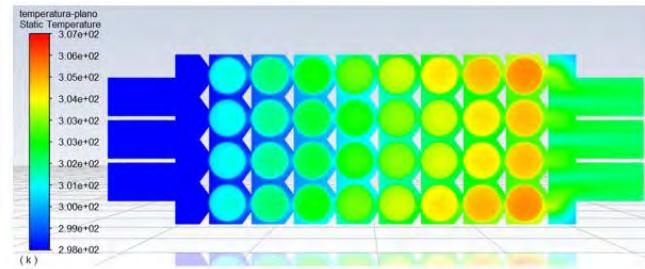


Figura 9. Contorno de temperatura en las celdas de la geometría del trabajo de Han y col. (2025) con las mejoras propuestas.



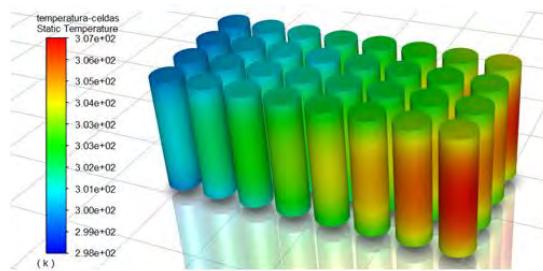


(a)



(b)

Figura 10. Comparación de los contornos de temperatura en un plano (a) geometría de Han y col. (2025), (b) geometría propuesta.



(a)



(b)

Figura 11. Contornos de temperatura en las celdas (a) geometría del estudio de Han y col. (2025), (b) geometría propuesta.



Tabla 8. Comparación de resultados entre la geometría de Han y col. (2025) y la geometría propuesta.

	Han y col. (2025)	Este trabajo
Temperatura máxima (K)	307.04	305.93
Diferencia de temperatura (K)	8.9	7.79

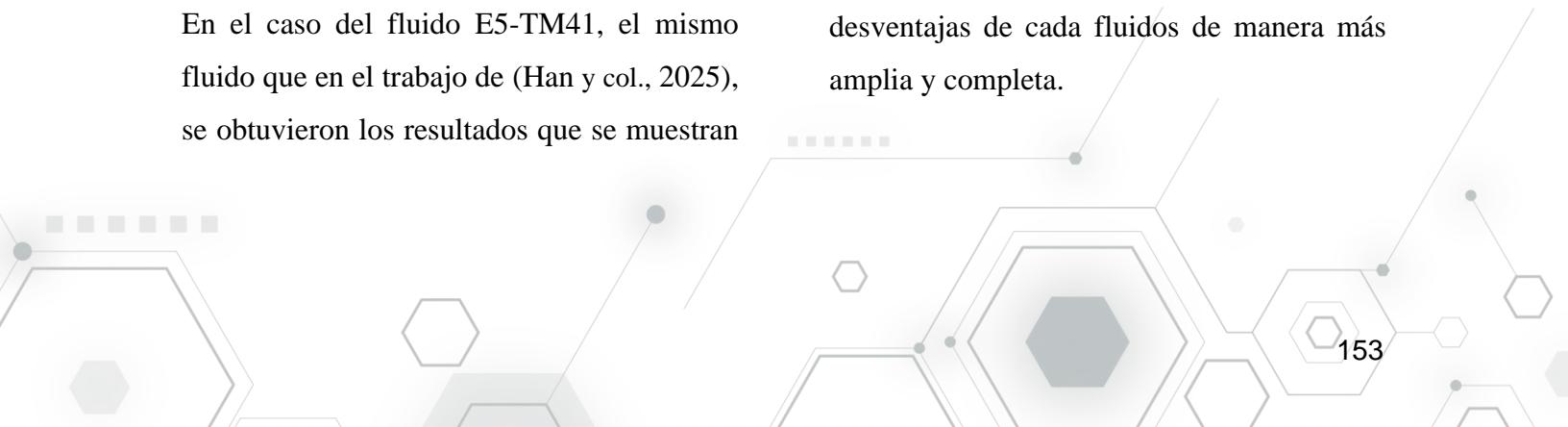
Al revisar estos datos, se puede decir que la geometría propuesta mejora en poco más de un grado tanto la temperatura máxima como la diferencia de temperaturas, dos aspectos muy importantes que afectan directamente la vida útil de las baterías, por lo que emplearemos esta geometría para realizar los análisis de los distintos fluidos a distintos flujos volumétricos.

3.4. Simulación de distintos fluidos a diferentes velocidades de flujo

Finalmente, usando la geometría con las mejoras que se proponen, se simularon los diferentes fluidos, cuyas propiedades ya se revisaron en el apartado 2 (Tabla 2); además, se hicieron variar los flujos volumétricos; los resultados de estas simulaciones se indican a continuación:

En el caso del fluido E5-TM41, el mismo fluido que en el trabajo de (Han y col., 2025), se obtuvieron los resultados que se muestran

en la Figura 12. En el caso del fluido HFE-7200, los resultados que se muestran en la Figura 13. Como último fluido, para el aceite mineral, los resultados se muestran en la Figura 14. Las tres figuras mencionadas muestran los contornos de temperatura de la simulación para cada fluido y para cada flujo volumétrico con el fin de ver de forma gráfica el comportamiento térmico de cada fluido a distintos flujos. Para facilitar la comprensión de los datos obtenidos y tener mejor claridad al analizar los resultados, la Tabla 10 muestra de forma simplificada y a manera de comparación los resultados de las simulaciones por fluido empleado y flujo volumétrico, en ella se muestran los valores obtenidos de temperatura máxima, diferencia de temperatura y caída de presión para cada fluido, en este caso se agrega la presión como variable a analizar para poder discutir más adelante en el documento las ventajas o desventajas de cada fluidos de manera más amplia y completa.



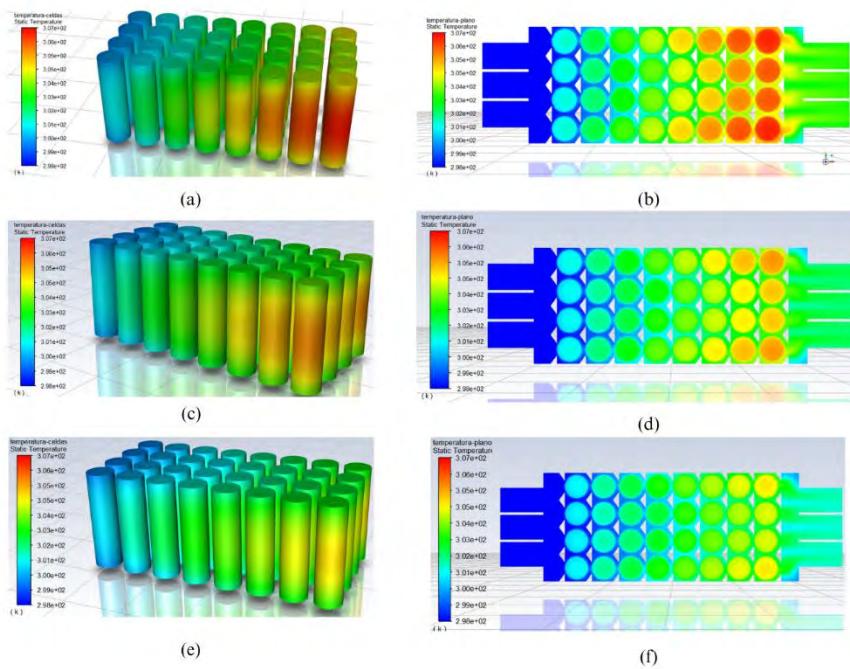


Figura 12. Contornos obtenidos de la simulación con E5-TM410, contorno de temperatura (a) en celdas con flujo de 4 L/min, (b) en un plano con flujo de 4 L/min, (c) en celdas con flujo de 5 L/min, (d) en un plano con flujo de 5 L/min, (e) en celdas con flujo de 6 L/min, (f) en un plano con flujo de 6 L/min.

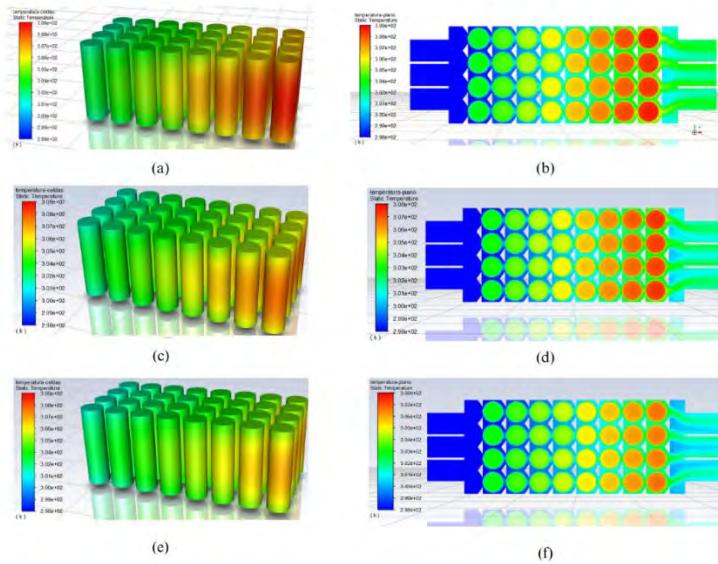


Figura 13. Contornos obtenidos de la simulación con HFE-7200, contorno de temperatura (a) en celdas con flujo de 4 L/min, (b) en un plano con flujo de 4 L/min, (c) en celdas con flujo de 5 L/min, (d) en un plano con flujo de 5 L/min, (e) en celdas con flujo de 6 L/min, (f) en un plano con flujo de 6 L/min.

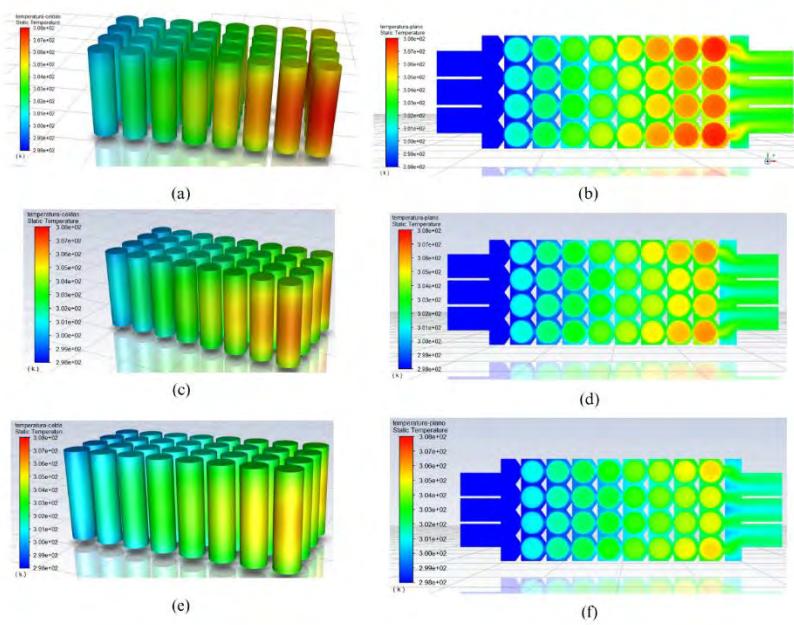


Figura 14. Contornos de la simulación con aceite mineral, contorno de temperatura (a) en celdas con flujo de 4 L/min, (b) en un plano con flujo de 4 L/min, (c) en celdas con flujo de 5 L/min, (d) en un plano con flujo de 5 L/min, (e) en celdas con flujo de 6 L/min, (f) en un plano con flujo de 6 L/min.

Tabla 9. Compilación de los resultados y comparación según el flujo volumétrico o el fluido.

Fluido	Flujo (L/min)	T max (K)	ΔT (K)	P max (Pa)
E5-TM410	4	307.23	9.09	27.44
	5	305.93	7.79	34.81
	6	305.02	6.88	40.37
HFE-7200	4	308.92	10.78	3.369
	5	307.75	9.61	4.88
	6	306.9	8.76	6.654
Aceite mineral	4	307.78	9.64	6.96
	5	306.44	8.3	9.159
	6	305.58	7.44	11.45

4. Conclusiones

Después del análisis numérico a través de la simulación de la transferencia de calor de 32

baterías cilíndricas sometidas a un enfriamiento por inmersión en un fluido dieléctrico, analizar varias estructuras y

diferentes fluidos usando como parámetros la temperatura máxima, diferencia de temperatura y la caída de presión, se puede decir que:

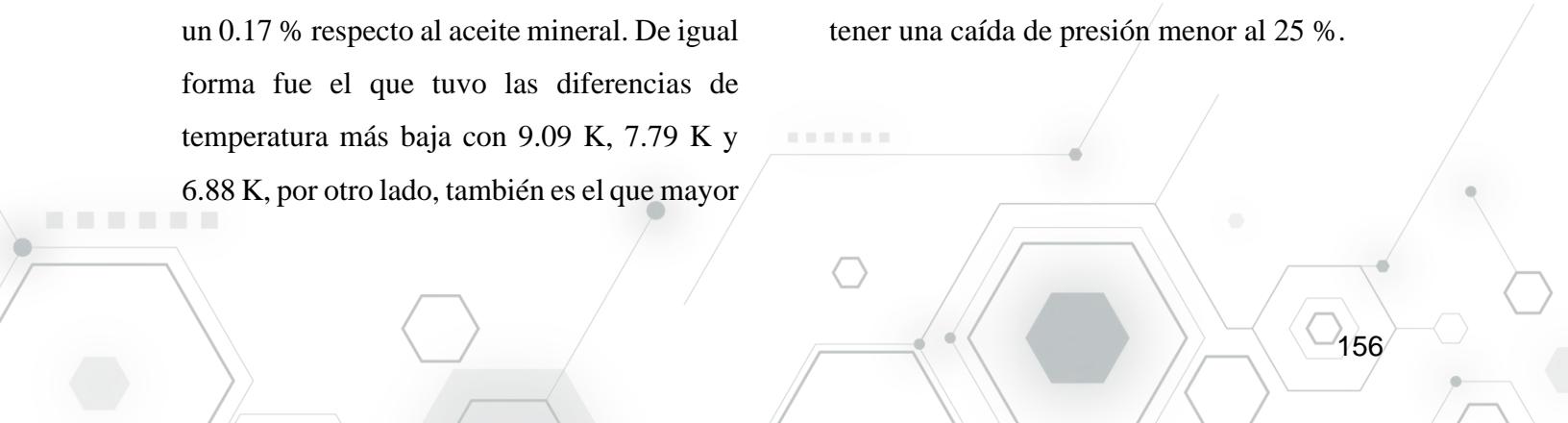
(a) Se logró disminuir la temperatura máxima y diferencia de temperatura de las baterías de iones de litio de 307.04 K y 8.9 K respectivamente, en el trabajo de Han y col. 2025, a 305.93 K como temperatura máxima y 7.79 K como diferencia de temperatura, teniendo así una mejora del 0.36 % en la temperatura máxima y un 12.4 % en la diferencia de temperatura en las celdas, lo que indica que tener una mejor distribución y mejor dimensionamiento de las entradas y salidas ayuda a la transferencia de calor (aumentar de 3 a 6 entradas y salidas y aumentar sus diámetros a 20 mm).

(b) De los tres fluidos simulados, el que mejor rendimiento tuvo es el E5-TM410, cuya temperatura máxima alcanzada fue 307.23 K, 305.93 K, 305.02 K para los flujos volumétricos de 4 L/min, 5 L/min y 6 L/min, respectivamente, mejorando el desempeño térmico en un 0.58 % respecto al HFE-7200 y un 0.17 % respecto al aceite mineral. De igual forma fue el que tuvo las diferencias de temperatura más baja con 9.09 K, 7.79 K y 6.88 K, por otro lado, también es el que mayor

caída de presión presentó con 27.44 Pa, 34.81 Pa y 40.37 Pa respectivamente, para los flujos volumétricos ya mencionados, esto se traduce en un aumento en promedio de los valores por flujo de 85.7 % más alta que para el HFE-7200 y un 73.3 % más alta que el aceite mineral.

(c) El fluido con menor caída de presión fue el HFE-7200 con 3.369 Pa, 4.88 Pa y 6.654 Pa para los flujos volumétricos de 4 L/min, 5 L/min y 6 L/min respectivamente, sin embargo, su rendimiento térmico fue el peor alcanzando en promedio 1.79 K más que el fluido E5-TM410 y 1.25 K más que el aceite mineral en la temperatura máxima alcanzada, sin embargo, esto se compensa muy bien con su poca caída de presión.

(d) Finalmente, pese al bajo rendimiento del fluido HFE-7200 frente a los demás fluidos dieléctricos, podría ser considerado como la mejor opción llevando el flujo volumétrico hasta 6 L/min, superando el rendimiento del fluido E5-TM410 (el de mayor rendimiento térmico) con un flujo volumétrico de 4 L/min, ya que alcanza a tener una caída de presión menor al 25 %.



Referencias bibliográficas

Aguirre, E., Gastelurrutia, J., Oca, L., Portillo, L., y Goienetxe, L. (2023). Dielectric flow- and tab-based battery thermal management system for EV high performance application. *Applied Thermal Engineering*, 1, 13. SSRN. <https://ssrn.com/abstract=4363609>

Afzal, A., Ramis, M. K., Jilte, R. D., Alwetaishi, M., Park, S. G., Buradi, A., Al Mdallal, Q. M., y Ağbulut, Ü. (2025). Thermal assessment of Li-ion battery cells and coolant in hybrid electric vehicles system: Application of conjugate condition and response surface methodology. *Case Studies in Thermal Engineering*, 66, 105766. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105766>

Banerjee, R., y Nidhul, K. (2025). Effect of various dielectric fluids on temperature homogeneity of Li-ion battery pack in an energy efficient novel immersion cooling design. *Results in Engineering*, 26, 104688. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104688>

Chu, X., Zhang, Y., y Li, Z. (2024). Parametric optimization of a direct liquid cooling-based prototype for electric vehicles focused on pouch-type battery cells.

Energies, 13(8), 1-14.

<https://doi.org/10.3390/wevj13080149>

Dong, F., Cheng, Z., Zhu, J., Song, D., y Ni, J. (2021). Investigation and optimization on cooling performance of a novel double helix structure for cylindrical lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 189, 116758. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116758>

Han, J., Garud, K., & Kang, E., y Lee, M. (2025). Numerical study on heat transfer characteristics of dielectric fluid immersion cooling with fin structures for lithium-ion batteries. *Symmetry*, 15(1), 1-21. <https://doi.org/10.3390/sym15010092>

Jungheinrich PROFISHOP AG y Co. KG. (2022, 11 de julio). *Cómo funciona una batería de litio y cuál es su estructura*. Guía-Profi. <https://www.jungheinrich-profishop.es/es/guia-profi/como-funciona-una-bateria-de-litio/>

Viva Energy Australia Pty Ltd. (2023). *Safety Data Sheet: Thermal Fluid E5 TM 410* (Versión 1.1, Fecha de revisión: 23 de agosto de 2023). <https://www.vivaenergy.com.au/>

Wahab, A., Najmi, A. U. H., Senobar, H., Amjadi, N., Kemper, H., y Khayyam, H. (2025). Immersion cooling innovations and

critical hurdles in Li-ion battery cooling for future electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 211, 115268.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115268>

Wang, T., Tseng, K. J., Zhao, J., y Wei, Z. (2014). Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air cooling strategies. *Applied Energy*, 134, 229–238.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.013>

Wang, Z., Fan, W., y Liu, P. (2017). Simulation of temperature field of lithium battery pack based on computational fluid dynamics. *Energy Procedia*, 105, 3339–3344.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.764>

Wattco. (s.f.). *El uso de aceites minerales en sistemas de refrigeración*. Recuperado el 18 de julio de 2025, de
<https://www.wattco.com/es/casestudy/el-uso-de-aceites-minerales-en-sistemas-de-refrigeracion/>

Zhao, R., Wen, D., Lai, Z., Li, W., Ye, M., Zhuge, W., y Zhang, Y. (2021). Performance analysis and optimization of a novel cooling plate with non-uniform pin fins for lithium battery thermal management. *Applied*

Thermal Engineering, 194, 117022.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117022>

