

Estudio térmico e hidráulico de un sistema de enfriamiento por inmersión en líquidos para baterías de iones de litio en vehículos eléctricos mediante dinámica de fluidos computacional (CFD)

Thermal and hydraulic study of an immersion liquid cooling system for lithium-ion batteries in electric vehicles using computational fluid dynamics (CFD)

Diego Ortega Rivera¹, Margarita Guadalupe Correa Ibarra¹, Jorge Arturo Alfaro Ayala¹, Agustín Ramon Uribe Ramírez¹

¹ Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Gto.

d.ortegarivera@ugto.mx, mg.correaibarra@ugto.mx, ja.alfaroayala@ugto.mx, agustin@ugto.mx

Resumen

El presente estudio analiza el comportamiento térmico e hidráulico de un sistema de enfriamiento por inmersión en líquidos dieléctricos para baterías de iones de litio (Li-ion) empleadas en vehículos eléctricos. Utilizando simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), se evaluó el rendimiento de diferentes fluidos entre ellos agua desionizada, aceite de silicona, aceite mineral, sunflower, AMP Cool AC-100 y E5-TM410 en una geometría basada en literatura previa. Se identificaron el número de Prandtl (Pr) y la difusividad térmica (α) como variables clave para determinar la eficiencia del enfriamiento, encontrando que fluidos con alta α y bajo Pr presentaron mejores desempeños. El agua desionizada y el fluido E5-TM410 destacaron como los más eficientes con temperaturas de 301.49 K (28.34 °C) y 302.35 K (29.2 °C), respectivamente, mientras que los aceites presentaron el peor rendimiento debido a sus altas viscosidades. En términos hidráulicos, la caída de presión varió desde 23.9 Pa (E5-TM410) hasta 5344375 Pa (aceite de silicona), destacando la relación directa entre alta viscosidad y pérdidas de carga. La simulación validó el modelo numérico y demostró temperaturas operativas seguras (293.15 – 313.15 K) en todos los casos. Sin embargo, se identificó una distribución térmica no uniforme, sugiriendo futuras investigaciones con modificaciones geométricas para mejorar la homogeneidad del enfriamiento.

Palabras clave: Baterías de iones de litio; CFD; fluido dieléctrico; inmersión; automóviles eléctricos.

Introducción

El crecimiento sostenido de la demanda energética global, junto con la necesidad urgente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ha impulsado una transformación significativa en el sector del transporte. Los vehículos eléctricos (VE), impulsados principalmente por baterías de ion-litio (Li-ion), han emergido como una alternativa clave para enfrentar los desafíos medioambientales actuales, gracias a su alta densidad energética, baja tasa de autodescarga y larga vida útil [1-4].

Sin embargo, el rendimiento, la seguridad y la vida útil de estas baterías están estrechamente ligados a su comportamiento térmico, ya que, durante los ciclos de carga y descarga, especialmente a altas tasas, se genera una cantidad considerable de calor en el interior de las celdas, lo cual puede provocar temperaturas críticas y fenómenos peligrosos como la fuga térmica, reduciendo además la eficiencia y la capacidad del sistema [2].

En este contexto, la refrigeración directa por inmersión en líquidos dieléctricos ha ganado atención como una estrategia prometedora para la gestión térmica de baterías de alto rendimiento, pues permite el contacto directo entre el fluido refrigerante y la superficie de la celda, eliminando resistencias térmicas intermedias y maximizando el área efectiva de transferencia de calor [3-4].

Los fluidos dieléctricos, al ser eléctricamente no conductores, posibilitan una refrigeración segura sin riesgo de cortocircuitos, y muchos de ellos presentan propiedades adicionales favorables, como alta biodegradabilidad, bajo impacto ambiental y puntos de inflamación elevados [5-8]. En este estudio se han considerado distintos fluidos, seleccionados por sus variadas propiedades térmicas, viscosidades y comportamientos eléctricos [7-9]. Fluidos tanto convencionales como especializados, entre los que se incluyen agua desionizada [6], aceite mineral [2], aceite de silicona [2], aceite vegetal (sunflower) [2], así como fluidos comerciales específicos como AMP Cool AC-10 [9] y E5-TM410 [10].

A fin de evaluar y optimizar el comportamiento térmico de estos sistemas, la dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha consolidado como una herramienta fundamental, pues permite analizar con precisión la distribución de temperatura, los perfiles de flujo y la eficacia del enfriamiento bajo diferentes configuraciones operativas, sin necesidad de recurrir exclusivamente a ensayos experimentales complejos o costosos [6-11].

El presente proyecto tiene como objetivo analizar, mediante simulaciones CFD, el desempeño térmico e hidráulico, estos fluidos durante el enfriamiento por inmersión de baterías Li-ion en vehículos eléctricos, identificando las soluciones más seguras para prolongar la vida útil de estos sistemas de almacenamiento energético [2-3].

Metodología

Método numérico

Se puede determinar la potencia generada durante el proceso de descarga bajo diferentes tasas de corriente mediante experimentos de descarga con aislamiento térmico combinados con ecuaciones caloríficas [7]. Se asume que la cantidad total de calor generado por la celda en condiciones adiabáticas contribuye al aumento de temperatura y que hay poca diferencia de temperatura a lo largo de la dirección radial de la celda durante el proceso de descarga con aislamiento térmico; por lo tanto, se utiliza el valor promedio de la temperatura más alta y la más baja de los puntos de medición inicial y final para calcular el valor calorífico.

El valor calorífico se expresa como:

$$Q = Cp \cdot m \cdot \Delta T \quad (1)$$

La potencia térmica generada durante el proceso de descarga se puede derivar como:

$$Pot = \frac{Q}{t} \quad (2)$$

Método de Simulación

Modelo agrupado de celda única

Cada celda de la batería se considera un cilindro homogéneo con una fuente de generación de calor interna. Aunque los componentes internos tienen propiedades termo físicas teóricamente diferentes, cada celda del módulo de batería se trató como un cuerpo homogéneo con propiedades termo físicas constantes.

Durante la descarga, las ecuaciones de gobierno del módulo de batería se expresan como sigue:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3)$$

Ecuación de conservación del momento

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (4)$$

Ecuación de conservación de energía

$$\rho \cdot Cp \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \quad (5)$$

Donde:

$\vec{v} \rightarrow$ velocidad del fluido

$P \rightarrow$ presión

$\vec{g} \rightarrow$ gravedad

$\rho \rightarrow$ densidad

$\mu \rightarrow$ viscosidad dinámica

$Cp \rightarrow$ capacidad calorífica específica

$T \rightarrow$ temperatura

$\kappa t \rightarrow$ conductividad térmica efectiva

Tabla 1. Propiedades de las celdas de litio 18,650.

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

Descripción de la geometría

El presente análisis se fundamenta en el diseño geométrico reportado por Han et al [10], dada su demostrada eficiencia en el control de temperatura. El artículo analizado contó con 32 celdas de baterías simuladas tipo 18,650, 3 entradas de fluido en la caja de baterías y 3 salidas de fluido.

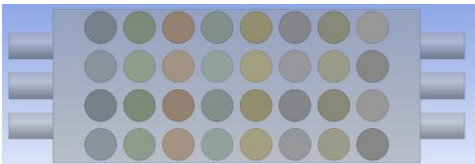
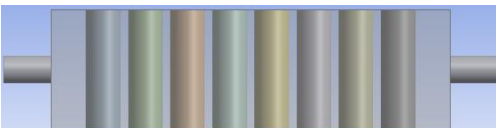
Celdas		Cantidad	32	
		Diámetro (mm)	18	
		Altura (mm)	65	
		Espaciamento (mm)	6	
Caja de baterías	de	Largo (mm)	208	
		Ancho (mm)	86.4	
Entradas salidas fluido	y del	Cantidad	3	
		Diámetro (mm)	15	
		Longitud (mm)	25	

Figura 1. Detalles de la geometría.

Análisis de sensibilidad de malla

Con el objetivo de optimizar la precisión de los resultados, se llevó a cabo un análisis de malla para la geometría. Dada la distancia transversal de 1.2 mm entre la carcasa de la batería y las celdas, el estudio inicial de mallado se realizó en un rango de 2.5 mm a 0.75 mm. Las simulaciones se efectuaron en estado estable, y las variables de interés primario fueron la temperatura de las celdas y la caída de presión dentro de la carcasa de la batería. Durante las simulaciones, la implementación de tamaños de malla de 1 mm y 0.75 mm generó un costo computacional mayor e ineficiente, al producir 7,058,076 y 15,835,914 celdas respectivamente. Por consiguiente, el análisis final se restringió al rango de mallado de 1.5 mm a 2.5 mm. El tamaño de malla óptimo para el presente estudio fue determinado en 1.75 mm, resultando en un total de 1,347,856 celdas.

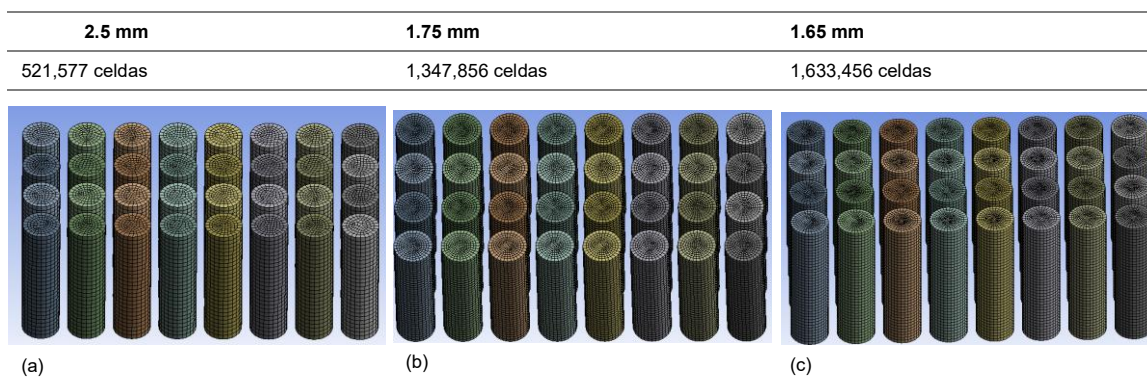


Figura 2. Mallado de las baterías a diferentes tamaños de malla.

Simulación

En el artículo de referencia, la simulación se ejecutó utilizando la ecuación de energía (5) en estado transitorio. Con el fin de caracterizar el comportamiento de enfriamiento de distintos fluidos bajo condiciones de máxima potencia, se implementó una potencia de 6.29 W durante el tiempo máximo de simulación, lo que resultó en una densidad de potencia térmica volumétrica de 380,000 W/m³ considerando el volumen de la celda. Dicho artículo [10] evaluó tres fluidos de enfriamiento, de los cuales el fluido E5-TM410 demostró un rendimiento superior a un flujo de 5 LPM en régimen laminar. En consecuencia, para la validación inicial de nuestro modelo, el presente estudio se centró en el análisis bajo las mismas condiciones.

Tabla 2. Especificaciones del fluido dieléctrico E5-TM410 utilizado como referencia.

Especificación	
Fluido de trabajo	E5-TM410
Caudal (LPM)	5
Velocidad del fluido(m/s)	0.157
Temperatura de entrada del fluido (K)	300
Presión de salida (Pa)	0
Condición de deslizamiento	No deslizamiento
Potencia térmica volumétrica de la batería (W/m ³)	380,000

Validación de resultados

La validación del modelo numérico se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados obtenidos con los reportados en el artículo de referencia [10]. Las variables seleccionadas para esta validación, $T_{\max}$, T_{prom} y ΔP , son críticas para evaluar el rendimiento térmico e hidráulico del sistema. Esta comparación arrojó un porcentaje de diferencia del 13.0% para la temperatura promedio y del 4.7% para la caída de presión. A pesar de que la diferencia en la temperatura máxima en las celdas alcanzó un 17.3%, estos resultados permiten considerar el modelo como aceptable para los propósitos del estudio.

Tabla 3. Comparación de resultados entre el artículo de referencia y el presente estudio.

Variables de interés	Artículo base	Presente estudio	Diferencia (%)
$T_{\max}$ (K)	37	31.555	17.3
T_{prom} (K)	33	29.2009	13.0
ΔP (Pa)	25.02	23.90633	4.7

Las diferencias observadas se consideran aceptables dentro del margen común para modelos numéricos que simulan fenómenos de transferencia de calor y flujo de fluidos en geometrías complejas, donde las simplificaciones y las suposiciones dimensionales pueden introducir desviaciones. Esta validación establece la confiabilidad del modelo numérico para la exploración y análisis del enfriamiento de las baterías con diferentes fluidos.

Tabla 4. Propiedades termofísicas de los fluidos dieléctricos estudiados en el presente artículo.

Fluido dieléctrico	ν (cSt)	ρ (kg/m ³)	k (W/m·K)	C_p (J/kg·K)	T_{eb} (°C)	α (m ² /s)	Pr
Aceite de silicona	994.2	970	0.15	1370	140	1.13e-07	8800
Mezcla agua-glicol (1:1)	4.9	1080	0.40	3473	107	1.07e-07	45.8
Aceite mineral	56	920	0.13	1900	180	7.43e-08	754
Fluido térmico de concha	19.40	810	0.14	2100	>310	8.23e-08	236
PAO (Chevron)	5.10	800	0.14	2241	~250	7.81e-08	65.3
Hidrofluoroéter (3M Novec 7000)	0.30	1400	0.08	1300	34	4.40e-08	6.82
Éster (MIVOLT DF7)	16.40	920	0.130	1907	>220	7.43e-08	221
Agua desionizada	1	998.2	0.6	4182	~100	1.44e-07	6.96
AmpCool AC-100	9.86	811	0.1373	2203.2	>180	7.66e-08	128.8
SF33 (HFO)	279.40	1360	0.077	1200	33.4	4.72e-08	5917
E5-TM410 (Shell)	0.19	805	0.140	2100	56–60	8.28e-08	2.34
Sunflower	39.2	910	0.175	1800	420	1.076e-07	366.9

Propuesta de estudio

Considerando el comportamiento de enfriamiento del sistema de baterías con el fluido E5-TM410 y su demostrada eficiencia, el presente estudio propone la evaluación de fluidos alternativos utilizando la misma configuración geométrica. Mediante una revisión bibliográfica, se identificaron doce fluidos dieléctricos reportados en la literatura como los más eficientes dentro de sus respectivos estudios. Para la simulación de estos fluidos dieléctricos, se llevó a cabo un análisis preliminar de sus propiedades termo físicas con el fin de determinar cuáles tendrían el mayor impacto en el proceso de enfriamiento.

En consecuencia, se priorizaron propiedades como la viscosidad cinemática (ν), densidad (ρ), conductividad térmica (k) y el calor específico (C_p), lo que condujo a la hipótesis de que el enfriamiento está predominantemente influenciado por el Número de Prandtl (Pr) y la difusividad térmica (α) dado que estas magnitudes adimensionales y propiedades combinadas engloban las propiedades termo físicas principales relevantes para el proceso.

Relación de la difusividad térmica con las propiedades termo físicas:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (6)$$

Relación del Número de Prandtl (Pr) con viscosidad:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (7)$$

El análisis de las propiedades del Número de Prandtl (Pr) y la difusividad térmica (α) condujo a la hipótesis de que el Número de Prandtl ejerce una influencia más grande en el comportamiento térmico del fluido. Esto se basa en que el Número de Prandtl incorpora intrínsecamente la difusividad térmica. En este sentido, un fluido con una viscosidad cinemática elevada resultaría en un alto Número de Prandtl, lo cual se correlaciona con una transferencia de calor ineficiente y, por ende, un enfriamiento deficiente. Por consiguiente, para optimizar el rendimiento de enfriamiento, la difusividad térmica del fluido debería ser significativamente superior a su viscosidad cinemática, resultando en un Número de Prandtl reducido.

Asimismo, en el proceso de selección de fluidos, se estableció como criterio de filtrado la temperatura de ebullición del fluido dieléctrico. Este requisito se fundamenta en un posible proceso bifásico si el fluido opera cerca o por encima de su punto de ebullición debido a la transferencia de calor de las baterías. Aunque la investigación actual ha explorado sistemas de transferencia de calor bifásica, el alcance del presente proyecto se restringió específicamente al análisis sustancias homogéneas para aplicaciones de enfriamiento.

Con base en la fundamentación expuesta previamente, se seleccionaron seis fluidos dieléctricos para su simulación en un rango de caudales que incluyó 4.15 LPM, 3.15 LPM y 2.5 LPM, además del caudal de 5 LPM utilizado en la validación de resultados. Los criterios de selección para los fluidos incluyeron un punto de ebullición superior a 50°C y una selección del Número de Prandtl que permitiera la evaluación de la hipótesis planteada: dos fluidos con Número de Prandtl bajo, dos con Número de Prandtl intermedio y dos con Número de Prandtl elevado. Esta distribución permitirá observar el comportamiento térmico de los fluidos y validar la hipótesis inicial referente a la influencia del Número de Prandtl en el proceso de enfriamiento.

Tabla 5. Fluidos seleccionados según número de Prandtl y difusividad térmica, ordenados de acuerdo con el desempeño térmico esperado (de menor a mayor).

Fluido	α (m ² /s)	Pr
Agua desionizada [6]	1.44E-07	6.96
E5-TM10 [10]	8.28E-08	35
AmCool AC-100 [9]	7.66E-08	128.3
Sunflower [2]	1.08E-07	366.9
Aceite Mineral [2]	7.43E-08	754
Aceite de Silicona [2]	1.13E-07	8808

Tabla 6. Caudal y sus respectivas velocidades.

Caudal (LPM)	5	4.15	3.15	2.15
Velocidad (m/s)	0.157	0.13	0.099	0.067

Resultados y discusión de resultados

El análisis de la independencia de malla se realizó en un rango de 2.5 mm a 0.75 mm como se observa en la Tabla 7, la temperatura no exhibió una convergencia constante entre 2.5 mm y 1.85 mm. No obstante, 1.75 mm y 1.65 mm mostraron resultados muy próximos, y 1.5 mm se mantuvo consistente con 1.75 mm. Con respecto a la caída de presión, se observa una diferencia entre los mallados de 1.75 y 1.5 mm que no es tan grande siendo menor de 0.21 Pa. Consecuentemente, 1.75 mm fue seleccionado como el tamaño de malla óptimo, dado que ofrece una precisión comparable a mallas más finas con un costo computacional significativamente menor.

Tabla 7. Resultados obtenidos para diferentes tamaños de celda en función de las propiedades de interés.

Tamaño de celda (mm)	Número de celdas	T_{prom} (K)	ΔP (Pa)
2.5	521,577	302.48	23.38
2	914,140	302.43	23.09
1.95	1,015,412	302.50	22.97
1.85	1,207,271	302.32	23.97
1.75	1,347,856	302.35	23.91
1.65	1,633,456	302.33	23.78
1.55	2,040,906	302.23	24.04
1.5	2,189,259	302.33	24.12
1	7,058,076.00	302.25	24.80
0.75	15,835,914.00	302.56	34.68

Durante la validación del modelo, se observó una discrepancia del 17.38% en la temperatura máxima y del 13% en la temperatura promedio con respecto a los datos reportados en el artículo de referencia Han et al [10]. Esta diferencia es atribuible, hipotéticamente, a las suposiciones dimensionales realizadas en el presente estudio, dado que las dimensiones exactas no fueron especificadas en la publicación original.

Adicionalmente, se considera pertinente analizar la influencia de la discretización espacial. En nuestro estudio, se identificaron resultados anómalos en la temperatura al emplear tamaños de malla inferiores que generaban un número de celdas superior a los 3 millones. En contraste, las simulaciones del artículo de referencia fueron realizadas con 6,239,514 celdas. Se cree que un mallado tan denso en el estudio de referencia pudiera haber influido en la sobreestimación de las temperaturas reportadas, contribuyendo así a la diferencia observada entre ambos trabajos.

No obstante, el presente estudio demostró una eficacia superior en el enfriamiento del sistema de baterías. En la Figura 3, se muestra el comportamiento térmico de los seis fluidos para su estudio. Se puede observar que la temperatura disminuye con el aumento de la velocidad del fluido. En particular, con el fluido E5-TM410, se obtuvo una temperatura máxima en las celdas de 304.14 K, en comparación con los 310.15 (37 °C) reportados en el artículo base. Este resultado no solo indica un mejor rendimiento térmico, sino que también confirma que las temperaturas operativas se mantienen dentro del rango seguro de 293.15-313.15 K para las baterías de litio, lo cual es fundamental para su vida útil y seguridad.

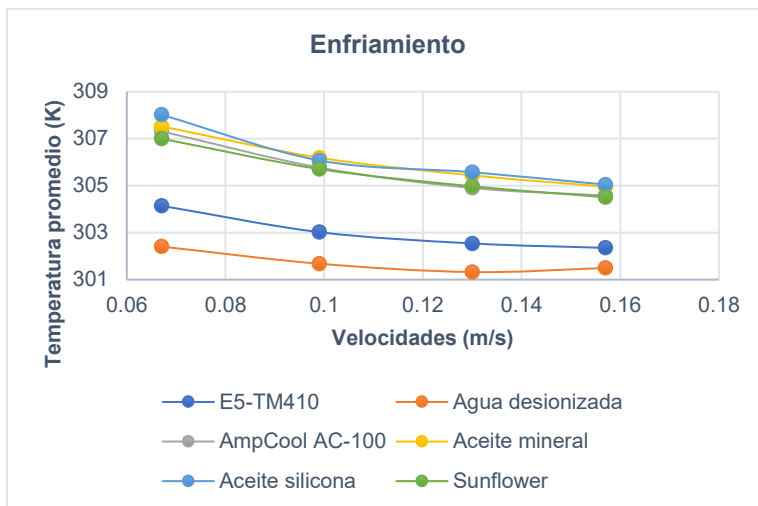


Figura 3. Comportamiento de la temperatura respecto a la velocidad de diferentes fluidos.

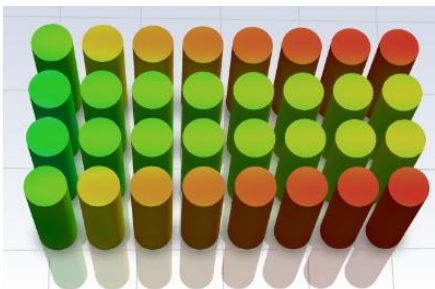
Aunque este enfriamiento resultó con un desempeño térmico mejor, la Figura 4 y Figura 5 revela la ausencia de una distribución térmica uniforme en todas las celdas. Esta observación abre la posibilidad para futuros estudios que exploren la implementación de elementos como baffles o promotores de turbulencia, con el fin de generar un enfriamiento más homogéneo en todo el paquete de celdas.

El comportamiento térmico de los fluidos dieléctricos simulados a diferentes caudales corroboró la hipótesis planteada, evidenciando que la temperatura del enfriamiento es predominantemente influenciada por el Número de Prandtl (Pr) y la difusividad térmica (α). Tal como se ilustra en la Figura 3, el agua desionizada exhibió el rendimiento de enfriamiento superior, incluso superando al fluido E5-TM410. Los fluidos con mejor desempeño en enfriamiento fueron generalmente los de menor viscosidad, mientras que los aceites mostraron una eficiencia inferior, siendo el aceite de silicona el más deficiente. Consistentemente, el enfriamiento óptimo se obtuvo en el caudal de 5 LPM (mayor velocidad).

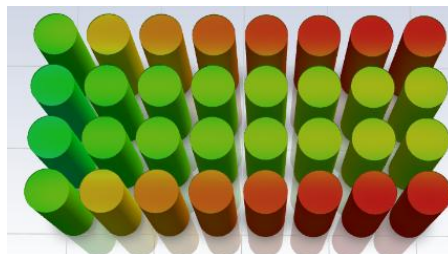
Esta observación se fundamenta en la relación entre la difusividad térmica con un mejor enfriamiento. De acuerdo con la Tabla 8, el agua desionizada posee la difusividad térmica más elevada, lo cual se correlaciona directamente con su capacidad superior de enfriamiento. En contraposición, el aceite mineral, con la difusividad térmica más baja, mostró el peor rendimiento. A pesar de que el aceite de silicona posee la segunda difusividad térmica más alta, su deficiente comportamiento en el enfriamiento se atribuye a su elevada viscosidad cinemática (ν). Una alta viscosidad incrementa el Número de Prandtl, lo que limita la convección y, por ende, la transferencia de calor. En este sentido, el agua desionizada cumple con los criterios de la hipótesis al presentar simultáneamente una baja viscosidad cinemática y una alta difusividad térmica.

Contornos de temperatura de baterías

Aceite mineral



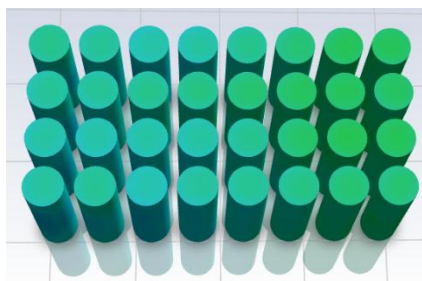
Aceite de silicona



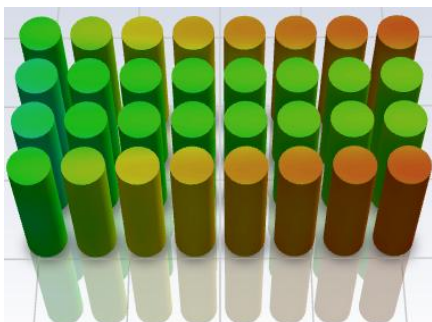
Agua desionizada



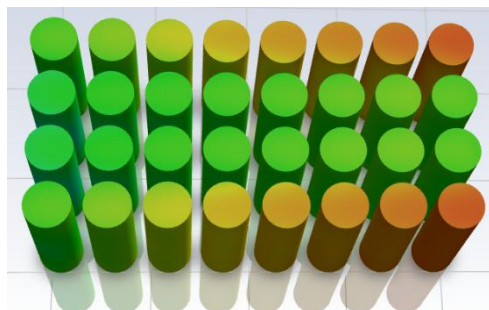
E5-TM410



Sunflower



AmpCool AC-100



temperatura-baterias
Static Temperature (K)

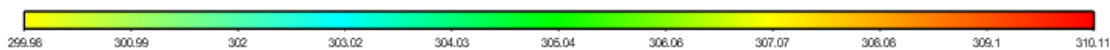
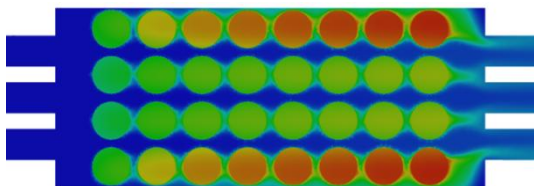


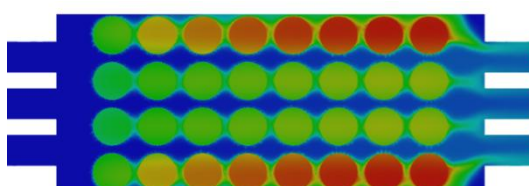
Figura 4. Comportamiento térmico de las baterías con diferentes fluidos a 5 LPM.

Contornos de temperatura del fluido

Aceite mineral



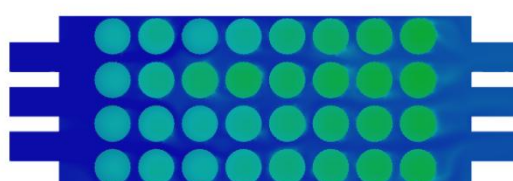
Aceite de silicona



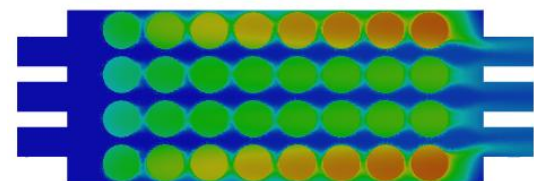
Agua desionizada



E5-TM410



Sunflower



AmpCool AC-100

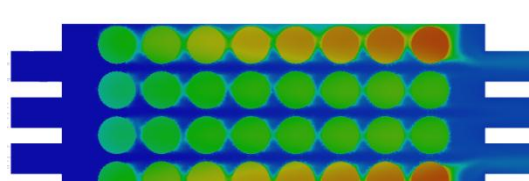


Figura 5. Comportamiento de la temperatura en el fluido y la celda para los diferentes fluidos a 5 LPM.

Tabla 8. Análisis final por fluido: resultados obtenidos y propiedades termofísicas.

Fluido	T_{prom} celdas (K)	ΔP (Pa)	Pr	α (m ² /s)	Viscosidad dinámica (kg/ms)	Densidad (kg/m ³)	Cp (J/kg·K)	k (W/m·K)
Agua desionizada	301.49	36.63	6.96	1.44E-07	0.0009982	998.2	4182	0.6
Sunflower	304.51	237.26	366.9	1.08E-07	0.035672	910	1800	0.175
AmpCool AC-100	304.58	78.79	128.3	7.66E-08	0.00799646	811	2203.2	0.1373
E5-TM410	302.35	23.91	35	8.28E-08	0.00015295	805	2100	0.14
Aceite mineral	304.96	324.67	754	7.43E-08	0.05152	920	1900	0.13
Aceite silicona	305.04	5344.75	8808	1.13E-07	0.964374	970	1370	0.15

Tabla 9. Análisis de la variable dominante en la selección del fluido de enfriamiento más eficiente.

Fluido	T _{prom} celdas (K)	ΔP (Pa)	Pr	Viscosidad (kg/ms)	Densidad (kg/m ³)	α (m ² /s)	Cp (J/kg·K)	k (W/m·K)
Posición								
1=Menor				1=Mayor				
Agua desionizada	1	1	1	1	6	1	1	1
Sunflower	3	4	3	4	3	3	5	2
AmpCool AC-100	4	2	4	3	2	5	2	5
E5-TM410	2	3	2	2	1	4	3	4
Aceite mineral	5	5	5	5	4	6	4	6
Aceite silicona	6	6	6	6	5	2	6	3

Finalmente, se infiere que, dentro de las propiedades termofísicas que componen la difusividad térmica, la conductividad térmica (k) es la más influyente. Un valor elevado de conductividad térmica, junto con una densidad (ρ) baja y un calor específico (C_p) alto, es crucial para optimizar la difusividad térmica y, consecuentemente, lograr una transferencia de calor eficiente y un mejor enfriamiento.

El comportamiento del Número de Reynolds (Re) en función de las velocidades simuladas se ilustra en la Figura 6. Se observa que el valor de Re está intrínsecamente ligado a las propiedades termofísicas del fluido, destacando la viscosidad cinemática (ν). Existe una relación inversamente proporcional fundamental: a mayor viscosidad cinemática, menor será el Número de Reynolds, incluso a velocidades elevadas Figura 6b. Esta relación es claramente perceptible al comparar la Figura 6, donde fluidos de baja viscosidad cinemática exhiben Números de Reynolds elevados Figura 6a, mientras que los de alta viscosidad se caracterizan por Números de Reynolds considerablemente menores.

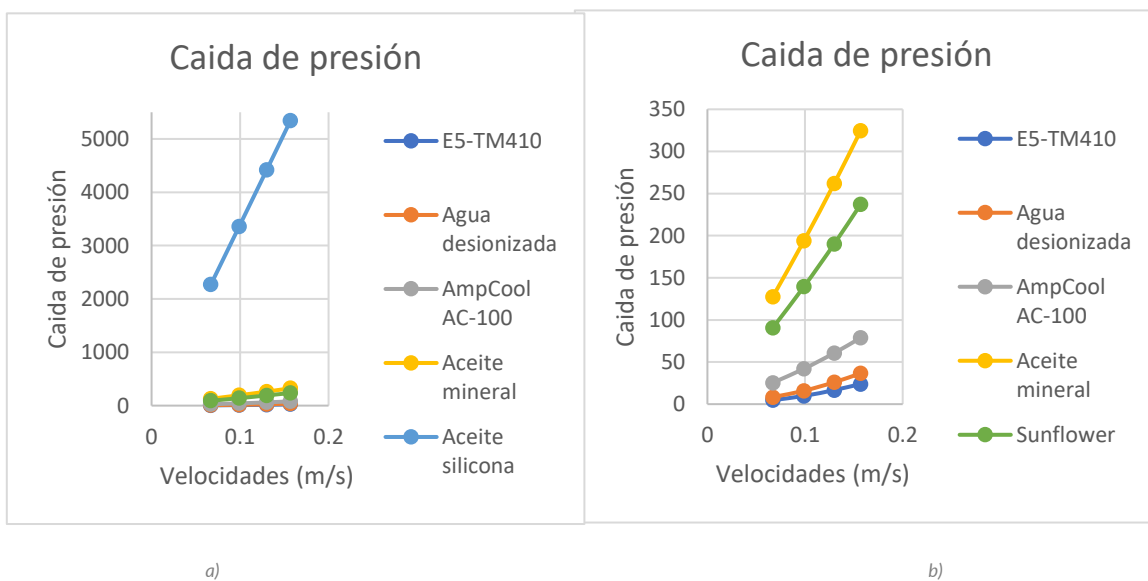


Figura 6. Caída de presión: a) ΔP mayores, b) ΔP menores.

Continuando con el análisis de la importancia de las propiedades termofísicas, la Figura 6 ilustra la variación en la caída de presión (ΔP) entre los diferentes fluidos. Al correlacionar estos datos con la Tabla 9, se observa una relación directamente proporcional entre la caída de presión y la viscosidad cinemática (ν) del fluido. Esta correlación es evidente en el contraste entre el agua desionizada, que presenta una baja viscosidad y, por ende, la menor caída de presión, y los aceites, que exhiben viscosidades más elevadas y, consecuentemente, mayores caídas de presión.

De acuerdo con la Tabla 9, el agua desionizada se posicionó como el fluido dieléctrico con el rendimiento de enfriamiento superior para las baterías, seguido en segundo lugar por el fluido E5-TM410. Este desempeño óptimo del agua desionizada se atribuye a su menor temperatura promedio alcanzada en las baterías, su baja viscosidad cinemática y la menor caída de presión resultante. Confirmando la hipótesis inicial, el agua desionizada también exhibió la mayor difusividad térmica, lo que se traduce en un Número de Prandtl reducido, optimizando la transferencia de calor.

Conclusión

El estudio del enfriamiento de las baterías de litio en vehículos eléctricos es de suma importancia para el prolongamiento de su vida útil y la seguridad de los usuarios. En este proyecto, se investigaron diversos fluidos de enfriamiento, cuya selección se basó rigurosamente en la hipótesis de la influencia de las propiedades termofísicas en la eficiencia del enfriamiento. Se concluye que el Número de Prandtl (Pr) y la difusividad térmica (α) son las propiedades más críticas para un enfriamiento eficiente.

Para optimizar el rendimiento térmico, la difusividad térmica debe poseer valores elevados, lo que resulta en un menor Número de Prandtl, dada su relación como el cociente entre la viscosidad cinemática y la difusividad térmica. Un Número de Prandtl reducido se correlaciona directamente con una mayor eficiencia de enfriamiento. En este contexto, el agua desionizada y el fluido E5-TM410 se identificaron como los fluidos más eficientes, mientras que los aceites analizados mostraron el menor rendimiento.

A lo largo de las simulaciones, realizadas con una geometría basada en un artículo de referencia y utilizando suposiciones dimensionales, se observó que la temperatura de todas las baterías se mantuvo consistentemente por debajo del rango operativo seguro de 293.15 K – 313.15 K (20-40 °C), independientemente del fluido o la velocidad de flujo empleados. Esto sugiere que la geometría simulada favorece una transferencia de calor efectiva. No obstante, se identificó que el sistema actual no promueve un enfriamiento uniforme en todas las celdas del paquete. Los hallazgos de este estudio abren futuras líneas de investigación centradas en la implementación de baffles, promotores de turbulencia o modificaciones geométricas para lograr una distribución térmica más homogénea.

Desde una perspectiva técnica e industrial, los fluidos con mejor desempeño —particularmente el agua desionizada y el E5-TM410— presentan una viabilidad diferenciada. El agua desionizada es ampliamente disponible y de bajo costo, aunque su uso exige controles estrictos para evitar contaminación iónica que pueda comprometer la seguridad eléctrica del sistema. Por otro lado, el fluido E5-TM410, aunque más costoso, ofrece gran estabilidad dieléctrica, baja viscosidad y alta compatibilidad con sistemas reales de enfriamiento por inmersión, lo que facilita su integración en módulos comerciales sin modificaciones sustanciales. En conjunto, ambos fluidos representan opciones técnicamente factibles para aplicaciones industriales, dependiendo del balance requerido entre costo operativo, confiabilidad y mantenimiento del sistema.

Finalmente, este estudio aporta una metodología de análisis y selección de fluidos basada en propiedades adimensionales, con resultados validados numéricamente. Estos resultados sientan las bases para futuras investigaciones aplicadas al diseño eficiente de sistemas de enfriamiento por inmersión para baterías de litio.

Bibliografía/Referencias

- [1] Patil, M. S., Seo, J.-H., & Lee, M.-Y. (2021). A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 229, 113715. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113715>
- [2] Jithin, K. V., & Rajesh, P. K. (2022). Numerical analysis of single-phase liquid immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using different dielectric fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 188, 122608. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122608>
- [3] Broatch, A., Olmeda, P., Margot, X., & Agizza, L. (2024). A novel methodology for the definition of an optimized immersion cooling fluid by means of a lumped electro-thermal battery pack model. *SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility*, 6, 193-205. <https://doi.org/10.4271/2023-01-0507>
- [4] Roe, C., Feng, X., White, G., Li, R., Wang, H., Rui, X., Li, C., Zhang, F., Null, V., Parkes, M., Patel, Y., Wang, Y., Wang, H., Ouyang, M., Offer, G., & Wu, B. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review. *Journal of Power Sources*, 525, 231094. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231094>

- [5] Giammichele, L., D'Alessandro, V., Falone, M., & Ricci, R. (2022). Preliminary analysis of a novel battery thermal management system based on a low boiling dielectric fluid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1106, 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1106/1/012017>
- [6] Dhisale, M. N. (2021). CFD simulation of thermal management system (immersion cooling) of lithium-ion batteries in EVs [Technical report]. *Indian Institute of Technology Bombay*, 1, 1-23. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19948.69767>
- [7] Patil, M. S. (2020). Heat transfer characteristics of Li-ion battery for electric vehicles using dielectric fluid (Doctoral dissertation). Dong-A University.
- [8] Méndez Gutiérrez, C., Ortiz Fernández, A., Renedo Estébanez, C. J., Olmo Salas, C., & Maina, R. (2017). Understanding the ageing performance of alternative dielectric fluids. *IEEE Access*, 11, 9656. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3239895>
- [9] Trimbake, A., Singh, C. P., & Krishnan, S. (2022). Mineral oil immersion cooling of lithium-ion batteries: An experimental investigation. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 19, 021007. <https://doi.org/10.1115/1.4052094>
- [10] Han, J.-W., Garud, K. S., Kang, E.-H., & Lee, M.-Y. (2023) Numerical Study on Heat Transfer Characteristics of dielectric Fluid Immersion Cooling with Fin Structures for Lithium-Ion Batteries. *Symmetry*, 15, 92. <https://doi.org/10.3390/sym15010092>