VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Estudio térmico e hidráulico de sistemas de enfriamiento por inmersión en líquido dieléctrico con promotores de turbulencia para baterías de iones de litio en vehículos eléctricos

Thermal and hydraulic study of dielectric liquid immersion cooling systems with turbulence promoters for lithium-ion batteries in electric vehicles

Emilio Alejandro Hernandez Figueroa, Jorge Arturo Reyes Puerta, Yleth Valeria Pérez Gallegos, Jorge Arturo Alfaro Ayala, Margarita Guadalupe Correa Ibarra, Agustín Ramón Uribe Ramírez

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

ea.hernandezfigueroa@ugto.mx, ja.reyespuerta@ugto.mx, yv.perezgallegos@ugto.mx, ja.alfaroayala@ugto.mx, mg.correaibarra@ugto.mx, agustin@ugto.mx.

Resumen

La gestión térmica eficaz de las baterías de iones de litio representa un reto primordial para garantizar la seguridad, eficiencia y vida útil de los vehículos eléctricos (EVs), especialmente ante la exigencia de mantener la temperatura operacional entre 20 °C y 45 °C y asegurar gradientes térmicos reducidos. En este estudio se realizó un análisis numérico tridimensional transitorio mediante ANSYS Fluent (utilizando el modelo de turbulencia SST k-ω) para evaluar el desempeño térmico e hidráulico de un Sistema de Gestión Térmica de Baterías (BTMS) por inmersión líquida directa monofásica, empleando el fluido dieléctrico E5-TM410 y promotores de turbulencia triangulares.

El modelo numérico se validó previamente con aire como fluido de trabajo y datos reportados en la literatura. Aunado a esto, se determinó una malla óptima con tamaño de celda de 0.8 mm y un paso de tiempo de 100s para la simulación transitoria, ambos reducen el costo computacional con errores inferiores al 0.56 % en la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) y 0.22 % en la caída de presión (ΔP).

Los resultados con el fluido dieléctrico E5 demostraron que con el incremento del flujo volumétrico (de 1 a 5 L/min) reduce significativamente la temperatura máxima de las celdas. Además, la adición de los deflectores triangulares ($A = 9$ mm, $B = 4.36$ mm) favorece la ruptura de la capa límite y térmica y por lo tanto el mezclado del fluido, logrando un perfil de temperaturas casi completamente homogéneo en el paquete de baterías a 5 L/min sin generar penalizaciones hidráulicas severas, pues la caída de presión máxima generada no superó los 30 Pa.

Palabras clave: Gestión térmica de baterías (BTMS); Enfriamiento por inmersión; Fluidos dieléctricos; Promotores de turbulencia; Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Introducción

En los últimos años, la disminución acelerada de las reservas de combustibles fósiles, la dependencia geopolítica global y los severos impactos ambientales derivados de las emisiones de gases de efecto invernadero han impulsado una necesidad crítica de fuentes de energía alternativas, propiciando la proliferación de los vehículos eléctricos (EVs) [1, 2]. Como núcleo de almacenamiento energético en estos vehículos, las baterías de iones de litio han emergido como la tecnología más prometedora y ampliamente adoptada debido a su alta eficiencia, gran capacidad, ligereza de construcción y prolongado ciclo de vida [1, 3]. No obstante, las reacciones electroquímicas exotérmicas inherentes a su funcionamiento y la resistencia óhmica interna generan una liberación sustancial de calor durante los ciclos operativos [1, 3], lo que eleva de forma drástica la temperatura de las celdas [1]. Mantener la temperatura de los módulos estrictamente dentro de un rango óptimo de operación (típicamente entre 20 °C y 45 °C) [1, 3, 4], así como garantizar una

distribución térmica homogénea donde la diferencia máxima interna sea inferior a 5 °C [1, 2, 4], resulta fundamental. Superar estos umbrales térmicos no solo acelera la degradación y reduce la vida útil del paquete, sino que incrementa exponencialmente el riesgo de fallas catastróficas como el embalamiento térmico (thermal runaway) [3, 4]. En consecuencia, la implementación de un Sistema de Gestión Térmica de Baterías (BTMS, por sus siglas en inglés) altamente efectivo y práctico es una estrategia clave para asegurar la viabilidad industrial y la seguridad de los EVs modernos [1, 2].

La configuración específica del paquete de baterías y la química de sus celdas son parámetros determinantes en la magnitud de la generación de calor y en las restricciones espaciales del vehículo. Actualmente, coexisten cuatro tipos principales de químicas de iones de litio aplicadas en el sector automotriz: el óxido de litio y cobalto (LCO), el óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC), el fosfato de hierro y litio (LFP), y el óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio (NCA) [3]. Cada una de estas variantes posee atributos diferenciados en términos de potencia específica, densidad energética, costo y estabilidad térmica intrínseca [3]. Desde la perspectiva del formato físico, estas celdas se fabrican comercialmente en tres configuraciones estándar: cilíndricas (comúnmente ensambladas en rollos compactos dentro de carcasas de acero), prismáticas (carcasas rectangulares rígidas de aluminio que optimizan el espacio en módulos grandes) y de tipo bolsa (pouch cells, encapsuladas en láminas flexibles de plástico-aluminio, las cuales ofrecen una excelente densidad de almacenamiento energético y una baja resistencia interna) [3]. Debido a la variada resistencia interna y la propensión a la acumulación calórica de estos formatos, el desarrollo de estrategias de enfriamiento optimizadas y avanzadas se ha vuelto un campo de investigación científica de alta prioridad [4, 5].

A lo largo de las últimas dos décadas, la investigación en BTMS ha dado lugar a diversas metodologías de enfriamiento clasificadas en técnicas activas y pasivas, que incluyen el uso de materiales de cambio de fase (PCMs), tubos de calor (heat pipes), enfriamiento por aire y enfriamiento por líquido [1, 4]. El enfriamiento por aire ha sido una de las técnicas más explotadas comercialmente gracias a sus ventajas de bajo costo, simplicidad mecánica, ligereza y ausencia total de riesgos de fugas fluidas [2, 3, 5]. Sin embargo, el aire posee una capacidad calorífica y una conductividad térmica inherentemente bajas, lo que limita de forma severa su eficacia en aplicaciones de alta densidad de potencia o bajo regímenes de carga y descarga acelerados [1, 2, 4]. Para mitigar estas deficiencias, se han explorado modificaciones topológicas extensas, tales como la inclusión de deflectores rectangulares o inclinados en los plenos de distribución [5], el rediseño de canales de flujo paralelo con geometrías escalonadas de tipo Z-step [4], e incluso mecanismos dinámicos avanzados como ventiladores de entrada oscilatorios [2]. A pesar de estas mejoras, las demandas térmicas de los sistemas de carga ultra rápida han forzado la transición hacia sistemas de enfriamiento por líquido, los cuales ofrecen coeficientes de transferencia de calor muy superiores [1]. Dentro de estos, el enfriamiento por inmersión directa (direct cooling) representa la vanguardia tecnológica, donde las celdas se sumergen por completo en un fluido de trabajo [1]. Esta configuración elimina las resistencias térmicas de contacto de las placas frías intermedias, incrementa drásticamente el área superficial de transferencia de calor y aísla físicamente a las baterías del oxígeno circundante, lo que previene de forma efectiva la propagación del fuego en caso de cortocircuito [1]. Para este propósito, la literatura científica identifica fluidos con propiedades termofísicas excepcionales, baja viscosidad y nula conductividad eléctrica, destacando los aceites dieléctricos, las mezclas optimizadas de agua-glicol y otros compuestos avanzados [1]

Con el objetivo de maximizar la eficiencia de los sistemas de enfriamiento por inmersión sin incurrir en penalizaciones hidráulicas severas, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como la metodología numérica estándar para el análisis preciso de los fenómenos de transferencia de calor y cantidad de movimiento [4,5].

En este contexto, el presente proyecto de investigación en el marco de Verano UG 2026 desarrolla un modelo geométrico tridimensional detallado de un banco de baterías sumergido en un líquido dieléctrico, para determinar el comportamiento térmico e hidráulico con y sin promotores de turbulencia y promover la homogeneidad de la temperatura intensa de las baterías.

Metodología

Las simulaciones hidrodinámicas y térmicas de este estudio se llevan a cabo mediante el software especializado ANSYS Fluent versión 2020, resolviendo bajo un régimen transitorio riguroso las ecuaciones

de conservación de masa, momento lineal, turbulencia y energía. Fundamentalmente, las simulaciones numéricas y la definición de las condiciones de contorno se realizan tomando como base el modelo físico del Jahromi et al., 2026 [2]. El sistema se somete a condiciones de carga rápida severas correspondientes a una tasa de 4C, donde la corriente eléctrica I_{max} alcanza un valor de 10.4 A, caracterizando la generación de calor volumétrica en cada celda a través del modelo termodinámico simplificado de Bernardi [2]. Los efectos de turbulencia y los gradientes de velocidad en la vecindad de las paredes sólidas de las baterías se capturan de forma precisa mediante el modelo de transporte de esfuerzos cortantes (SST k-omega) [2]. Mediante este enfoque computacional robusto, el proyecto Verano UG 2026 busca determinar la configuración geométrica de promotores de turbulencia para prolongar la vida útil de las baterías de ion-litio y garantizar los más altos estándares de seguridad en la próxima generación de vehículos eléctricos.

El sistema de estudio consiste en un sistema de gestión térmica de baterías (BTMS) por inmersión líquida monofásica directa. Para el desarrollo del dominio tridimensional y el área de estudio, el diseño base fue adoptado de Jahromi et al., 2026 [2]. La Figura 1 muestra el esquema utilizado para el paquete de baterías y en la Tabla 1 se encuentran las dimensiones detalladas del paquete de baterías utilizadas.

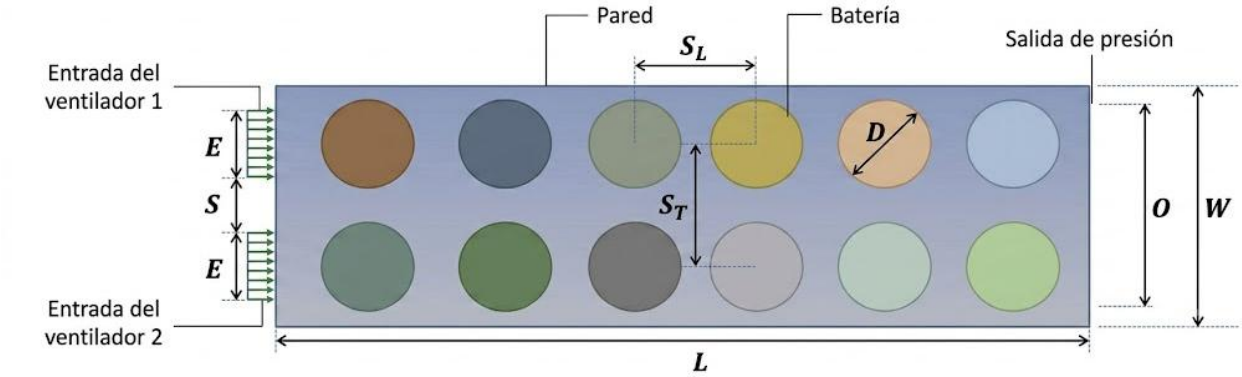

Figura 1. Esquema del paquete de baterías.

Tabla 1. *Dimensiones detalladas del paquete de baterías utilizadas para definir el dominio de la solución. [1]*

Parámetro	S_L	S_T	W	L	S	E	O
Valor [mm]	25	26	52	155	12	12.5	32

Para la definición geométrica de los baffles (deflectores) triangulares generadores de turbulencia, se tomaron como referencia los resultados numéricos de Han et al. (2023) [6]. En su investigación sobre enfriamiento por inmersión directa en fluidos dieléctricos, los autores demostraron que las aletas de perfil triangular ofrecen el Criterio de Evaluación del Rendimiento (PEC, por sus siglas en inglés) más elevado en comparación con las configuraciones circulares y rectangulares, gracias a su capacidad para favorecer el mezclado del fluido y romper la capa límite sin generar una pérdida de carga prohibitiva en el sistema. En el presente modelo, se adoptó la geometría caracterizada por una base $\boldsymbol{A = 9}$ mm y una altura $\boldsymbol{B = 4.36}$ mm (con una relación de aspecto $\boldsymbol{A/B = 2.064}$), tal como se ilustra en la Figura 2. Por su parte, en la Figura 3 se muestra el esquema del paquete de baterías con la integración final de los deflectores, donde los baffles centrales se colocaron sobre la línea media axial entre las dos filas de cilindros para redirigir el fluido hacia las superficies adyacentes y evitar que el flujo principal pase de largo por el centro sin mezclarse, mientras que los baffles de pared se dispusieron de forma alternada a lo largo de los límites del canal para eliminar zonas de estancamiento (puntos muertos) cerca de las paredes y mantener una alta intensidad de turbulencia en todo el dominio.

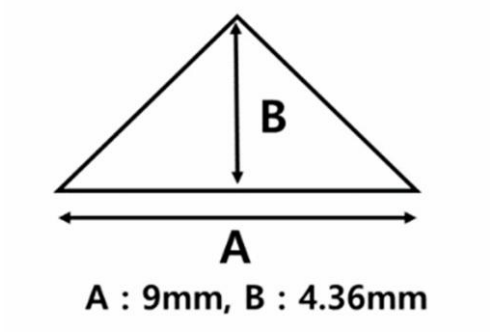

Figura 2. Dimensiones para el promotor de turbulencia [6].

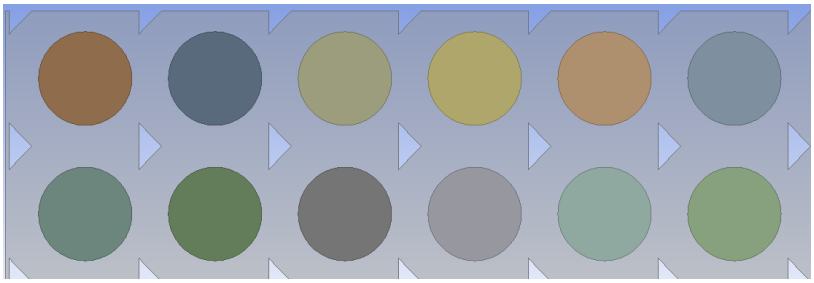

Figura 3. Esquema de baterías con promotores de turbulencias.

Mallado y tiempo

Con el objetivo de garantizar la precisión de los resultados se realizó un estudio de sensibilidad de malla y tiempo. Se realizó un estudio de malla considerando cuatro casos con diferente tamaño de celda, Caso 1 2 mm, Caso 2 1 mm, Caso 3 0.8 mm y Caso 4 0.5 mm, resultando 0.8mm el tamaño de malla que permite que los resultados no varíen de manera significativa (ver sección de resultados). En las **Figuras 4 y 5** se muestran algunas vistas de la malla utilizada.

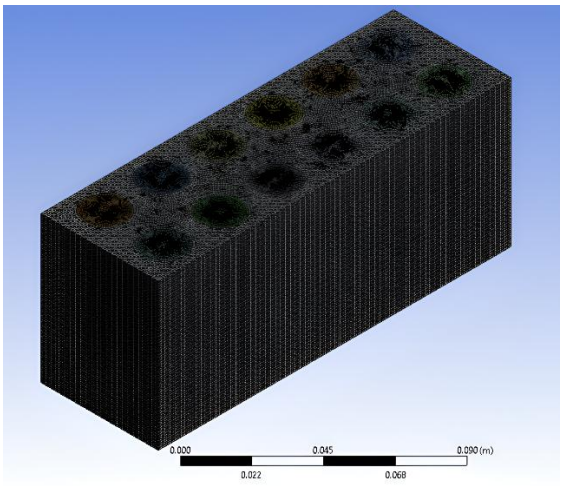

Figura 4. Vista lateral del mallado.

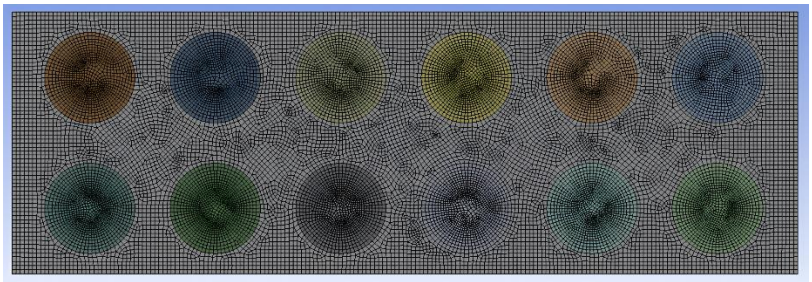

Figura 5. Vista cara superior del mallado, observando pilas y cuerpo completo.

Por otra parte, se realizó una evaluación comparativa a través de cuatro casos independientes diferenciados por la magnitud del paso de tiempo, evaluando su impacto sobre los resultados del sistema tales como: velocidad máxima, temperatura máxima y la caída de presión en las secciones de control. Los escenarios de simulación evaluados se definen a continuación: Caso 1 300 s, Caso 2 100 s, Caso 60 s y Caso 4 10 s, para la selección del paso de tiempo óptimo, se tomaron como criterios de control los porcentajes de error relativo en las variables térmicas e hidrodinámicas respecto a las soluciones convergentes (ver sección de resultados).

Condiciones de frontera

Para el desarrollo del modelo numérico y la convergencia de las simulaciones, se establecieron condiciones de frontera específicas basadas en los parámetros operativos del sistema. Se fijó:

- Una velocidad y temperatura de entrada constantes de 20 °C y 10.7 m/s para el aire.
- Una generación de calor en el volumen de las baterías con un valor constante de 34,680 W/m³.
- Y, por último, una presión manométrica de salida de 0 Pa.

Las propiedades de la batería son mostradas en la Tabla 3. Y las propiedades termofísicas del aire se establecieron conforme a las condiciones reportadas en la referencia [5]. Por otro lado, las propiedades del fluido dieléctrico de inmersión E5 (específicamente E5-TM410) se obtuvieron del estudio numérico y experimental desarrollado en la referencia [1]. Los parámetros correspondientes a ambos fluidos de trabajo se resumen en la Tabla 4. La condición de frontera de velocidad de entrada para el fluido dieléctrico E5 (para los sistemas del banco de baterías sin baffles y con baffles) se obtuvo a partir de los flujos volumétricos 1 lt/min, 2 lt/min, 3 lt/min, 4 lt/min y 5 lt/min.

Tabla 3. *Características de las baterías de litio usadas en la simulación [2].*

Parametro	Valor
Volumen [m³]	1.654×10^{-5}
Diametro [m]	0.018
Densidad [kg/m³]	1760
Calor especifico [J/kg·K]	1200
Conductividad Térmica Radial [W/m·K]	0.2

Tabla 4. *Propiedades del aire y el fluido E5 [2,6].*

Propiedad	Aire	Fluido Dielectrico E5
Densidad [kg/m³]	1.205	805
Calor especifico [J/kg·K]	1005	2100
Conductividad Térmica [W/m·K]	0.0257	0.14
Viscosidad Dinámica [Pa·s]	1.82×10^{-5}	0.015617

Modelos matemáticos

El comportamiento del flujo del fluido dieléctrico a través del canal y la disipación térmica proveniente de las celdas de la batería de iones de litio se modelan resolviendo las ecuaciones de conservación tridimensionales en régimen transitorio de continuidad, momentum (Navier-Stokes) y energía [2]:

Ecuación del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \qquad (1)$$

Ecuación de flujo volumétrico:

$$v = \frac{Q}{A} \qquad (2)$$

Ecuación de Continuidad (Conservación de la masa):

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

Ecuación de Momento (Conservación de la cantidad de movimiento):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\bar{\bar{\tau}}\right) \qquad (4)$$

Donde p es la presión estática, $\bar{\bar{\tau}}$ es el tensor de esfuerzos.

Modelo de Turbulencia $k - \omega$ SST

Este modelo híbrido resuelve dos ecuaciones de transporte: una para la energía cinética de turbulencia (k) y otra para la tasa específica de disipación (ω):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(U_i \rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_k \mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \tilde{P}_k - \beta^* \rho \omega k \qquad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(U_i \rho \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + \gamma \frac{\rho}{\mu_t} S^2 - \beta \rho \omega^2 + 2\rho(1 - F_1)\frac{1}{\omega \sigma_{\omega,2}}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \qquad (6)$$

Para evitar una producción excesiva de turbulencia en puntos de estancamiento, se aplica el limitador de producción $\tilde{P}_k$:

$$P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (7)$$

$$\tilde{P}_k = \min(P_k, 10\beta^* \rho k\omega) \quad (8)$$

La viscosidad turbulenta o de remolino (μ_t) se formula considerando la hipótesis de Bradshaw ($\tau = \rho a_1 k$) para prevenir la sobreestimación del transporte de momento bajo gradientes de presión adversos:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1\omega, SF_2)} \quad (9)$$

donde S es la magnitud de la tasa de deformación y F_1, F_2 son las funciones de mezcla (*blending functions*) que permiten una transición suave entre el comportamiento cerca de la pared ($k-\omega$) y el flujo libre ($k-\epsilon$).

Ecuación de Energía para el Fluido:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f E) + \nabla \cdot \left(\vec{v}(\rho_f E + p)\right) = \nabla \cdot (k_f \nabla T) \quad (10)$$

Donde E es la energía interna, ρ_f es la densidad del fluido y k_f representa la conductividad térmica del fluido.

Ecuación de Energía para el Dominio Sólido (Celdas de Batería):

La conducción de calor interna en la celda se define mediante:

$$\rho_b C_{p,b} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_b \nabla T) + \dot{q}_{gen} \quad (11)$$

Donde ρ_b, $C_{p,b}$ y k_b corresponden a la densidad, calor específico y conductividad térmica de la batería, respectivamente, y $\dot{q}_{gen}$ representa la tasa de generación de calor por unidad de volumen debido al proceso electroquímico e interno de la celda.

Resultados

Análisis de malla y tiempo

Para determinar qué tamaño de malla y paso de tiempo serían adecuados para nuestro caso de estudio, se tomaron los resultados de T_{max} = 27 °C, V_{max} = 24.2 m/s y dP = 300 Pa de la referencia [2], y también se tomó aire como fluido de enfriamiento [2]. Una vez que se fijaron los resultados como referencia objetivo se corrieron cuatro casos variando el tamaño de malla 0.5 mm, 0.8 mm, 1 mm y 2 mm, buscando el caso que que proporcionara los resultados más cercanos a los valores de referencia sin un excesivo valor de numero de celdas.

En la Figura 6 se muestra la temperatura máxima de las baterías con respecto al número de elementos de malla observamos que, a un tamaño de malla de 0.8 mm deja de variar el valor de la T_{max}, lo que nos permite

descartar tamaños de malla más pequeños que implicarían mayores tiempos de simulación para obtener resultados similares.

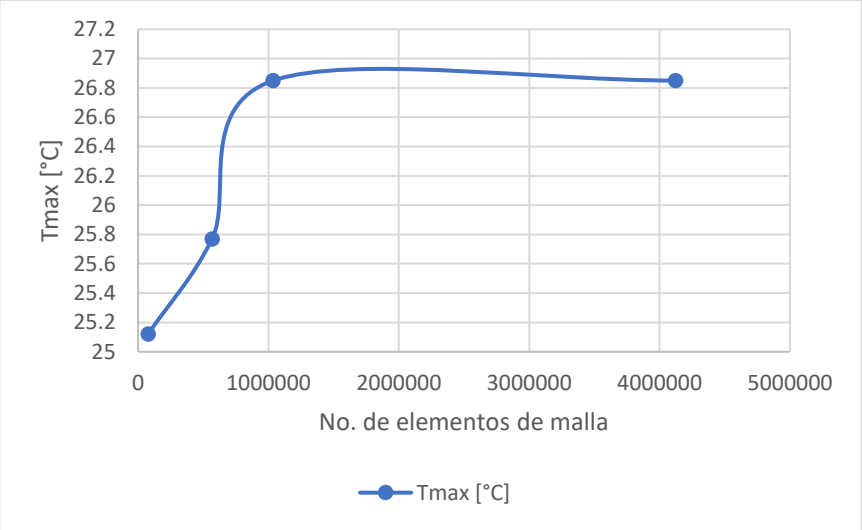

Figura 6. Tmax a diferentes tamaños de malla.

Definido el mallado, se realizó la validación considerando los mismos valores de referencia [2], así como el aire, pero ahora para los cuatro diferentes tiempos mencionados previamente.

Tabla 5. *T_{max}, V_{max} y ΔP obtenidos para diferentes pasos de tiempo.*

	Tiempo [s]	Tmax [°C]	Vmax [m/s]	ΔP [Pa]	%error Tmax	%error Vmax	%error ΔP
Caso 1	300	26.85	22.85	226.7	0.56	5.58	24.43
Caso 2	100	26.85	27.25	299.34	0.56	12.60	0.22
Caso 3	60	26.85	28.2	303.98	0.56	16.53	1.33
Caso 4	10	26.85	27.7	290.02	0.56	14.46	3.33

El caso 2 presenta valores razonables de error a cambio de tiempos no muy prolongados de simulación, por lo que resulta en un intervalo adecuado para nuestro caso de estudio, en la **Tabla 5** se observan los resultados obtenidos para cada caso. Un análisis riguroso del tamaño de malla y del tiempo, permite optimizar el coste computacional ya que un mallado fino es preciso pero lento, en cambio un mallado grueso es rápido pero impreciso. Asimismo, valores inadecuados de la malla pueden sobrestimar o subestimar tanto la transferencia de calor como la caída de presión, lo que resultaría en lecturas erróneas del comportamiento termo-hidráulico de la batería.

Ahora bien, en simulaciones numéricas en estado transitorio, como es el caso 2, el tamaño de paso de tiempo y el número total de pasos es fundamental para garantizar un equilibrio entre lo físico y el coste computacional.

Un paso de tiempo excesivamente grande ofrece resultados físicamente irreales, mientras que uno excesivamente pequeño conlleva un elevado coste computacional sin una mejora relevante en la precisión. Por ello, así como se realiza un análisis del mallado, es preciso llevar a cabo un estudio de independencia temporal para corroborar que las variables de interés no dependan de la discretización elegida.

Validación

Se logró validar la simulación considerando el mismo sistema y las mismas condiciones de operación [2] mediante el análisis de malla y tiempo, debido a que los porcentajes de error obtenidos con respecto al artículo de referencia son adecuados. Para T_{max} el error obtenido fue de 0.56%, para V_{max} el porcentaje de error fue de 12.60% y para la caída de presión del 0.22%.

Esta ratificación de los resultados numéricos del modelo de este trabajo permitió realizar modificaciones en el sistema, como el uso del fluido dieléctrico E5-TM410 y la implementación de promotores de turbulencia [6]. En la siguiente sección, se mostrarán los resultados térmicos e hidráulicos obtenidos tras realizar estas dos modificaciones.

Resultados de temperatura y caída de presión

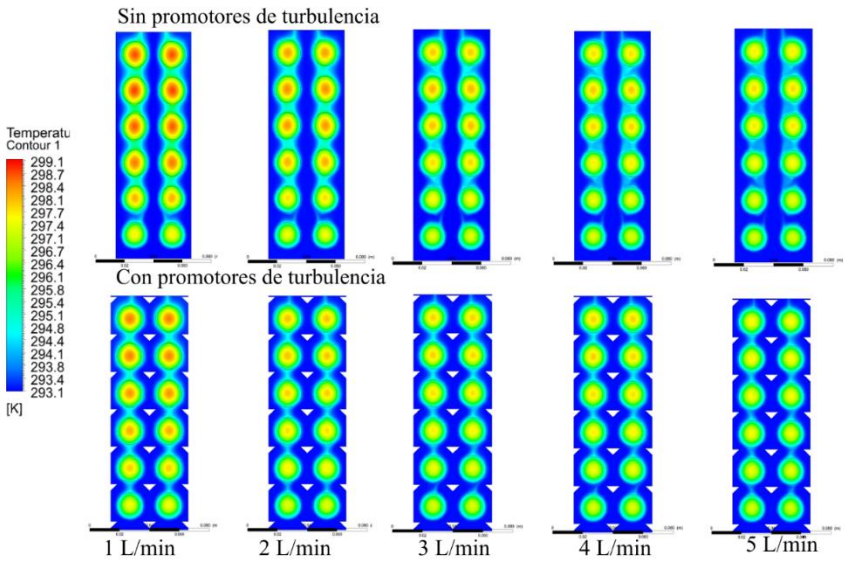

Figura 7. Esquema del paquete de baterías.

En la **Figura 7** se muestra una vista desde un corte a la mitad del banco de baterías a diferentes caudales, sin promotores de turbulencia (primer fila) y con promotores de turbulencia (segunda fila).

Se muestran los perfiles de temperaturas y en ambos casos podemos observar que los sistemas entran dentro del rango de temperaturas (20°C-45°C) o (293.15K – 318.15K) [3,5,6] para ambos con/sin promotores de turbulencia observamos que el Caso 5 (5L/min) mantiene una temperatura homogenea a lo largo de las baterías, sin embargo la incorporación de promotores de turbulencia produce un perfil casi completamente homogeneo a diferencia del sistema sin promotores donde aún se pueden observar regiones de temperaturas alrededor de (298.1K) en el centro de las baterías cercanas a la salida del banco.

En la **Figura 8** se bserva que a medida que aumentamos el caudal disminuímos la temperatura máxima del sistema siendo el último caso (Caso 5) el de menor temperatura máxima, además observamos nuevamente

que al añadir promotores de turbulencia favorecemos el enfriamiento del sistema y mantenemos las baterías a una temperatura adecuada de operación

A medida que aumentamos el flujo volumétrico podemos observar un aumento en la caída de presión, observamos también que la adición de promotores de turbulencia resulta en un aumento significativo de la misma, sin embargo 30 Pa (la presión máxima alcanzada por cualquier sistema) como se puede observar en la **Figura 9.**

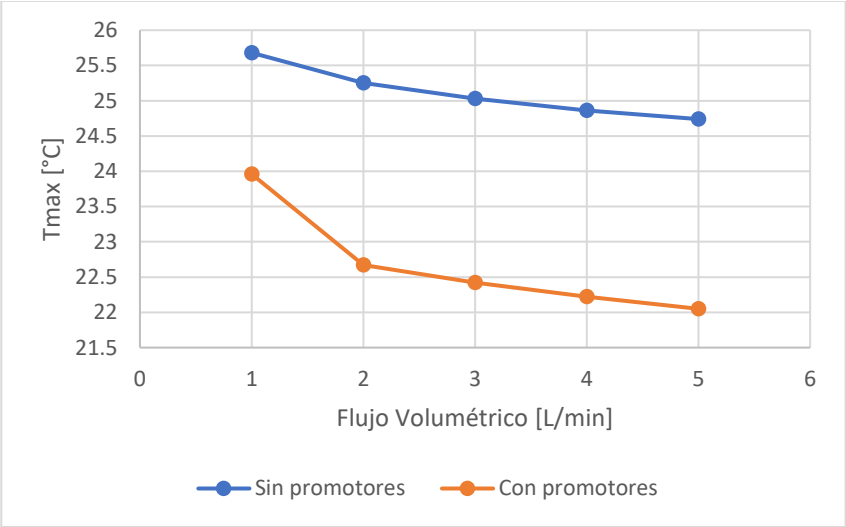

Figura 8. Gráfica de Flujo Volumétrico [L/min] (eje x) y Tmax [°C] eje (y).

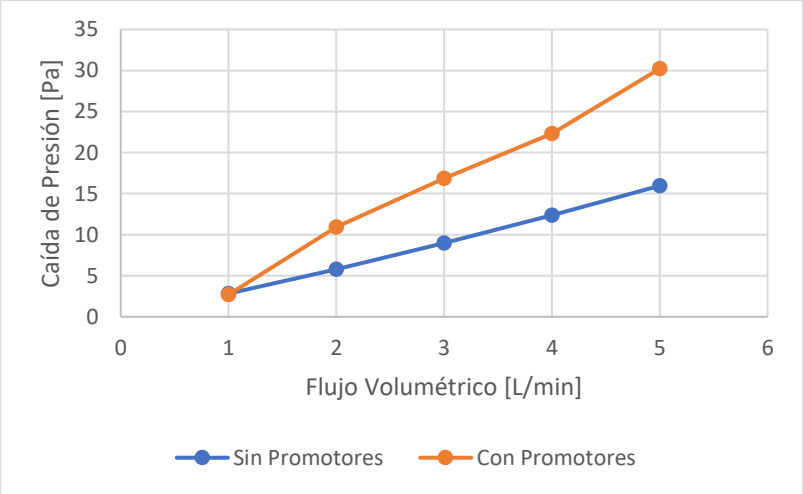

Figura 9. Gráfica de Flujo Volumétrico [L/min] (eje x) y Caída de Presión [Pa] (eje y)

Conclusión

El estudio numérico desarrollado demuestra de forma contundente la viabilidad y superioridad técnica de implementar sistemas de enfriamiento por inmersión en líquido dieléctrico (E5-TM410) integrados con promotores de turbulencia triangulares para el manejo térmico de baterías de iones de litio bajo condiciones severas de carga [1, 2, 6]. De acuerdo con los análisis realizados, se concluye lo siguiente: el estudio de

sensibilidad de malla y paso de tiempo permitió validar el modelo con un margen de error sumamente bajo (*0.56 %* en $T_{máx}$ y *0.22 %* en ΔP) respecto a la literatura de referencia [2], garantizando un equilibrio idóneo entre el costo computacional y la precisión física de las variables termohidráulicas [2]. La inclusión de promotores de turbulencia triangulares colocados estratégicamente en la línea media axial y las paredes del canal favorecen el mezclado [6]. Esto permite mantener el paquete de baterías dentro del rango óptimo de operación (*20* °C a *45* °C) [3, 5, 6] y lograr un perfil de temperatura homogéneo, reduciendo de manera efectiva el riesgo de degradación acelerada y embalamiento térmico [3, 4]. Aunque el incremento del caudal volumétrico (hasta 5 L/min) y la adición de deflectores incrementan la caída de presión [6], el impacto hidráulico máximo registrado (~ *30* Pa) resulta insignificante para la integridad de los materiales y la operación del sistema.

Bibliografía/Referencias

[1] Salehzadeh, F. J., & Heyhat, M. M. (2025). Direct and indirect cooling of Lithium-ion batteries with New manifold designs. Thermal Science and Engineering Progress, 68, 104325. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104325

[2] Jahromi, H. B., Mehmandoosti, M. M., & Kowsary, F. (2026). Multi-Objective optimization of a novel swinging inlet strategy for Air-Cooled battery thermal management systems under Fast-Charging conditions in electrical vehicles. Thermal Science and Engineering Progress, 73, 104672. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2026.104672

[3] Wankhede, S., Pingale, A. D., & Kale, A. (2025). Experimental investigation on thermal management of lithium-ion battery pack for formula student electric vehicle using air-cooling system. Energy Storage and Saving, 4, 38-47. https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.11.008

[4] Li, Y., Ding, T., Cui, W., & Xu, X. (2026). Design of air cooled lithium battery thermal management system with Z-step type flow pattern based on electrochemical-thermal coupled model. Future Batteries, 9, 100142. https://doi.org/10.1016/j.fub.2026.100142

[5] Oyewola, O. M., Idowu, E. T., & Drabo, M. L. (2024). Influence of straight and inclined baffles on enhancement of battery thermal management system performance. Heliyon, 10(20), e38585. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38585

[6] Han, D., Zhao, R., & Wang, Y. (2023). Numerical study on heat transfer characteristics of dielectric fluid immersion cooling with fin structures for LIBs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 215, 124490. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124490

[7] Younoussi, S., & Ettaouil, A. (2024). Calibration method of the k-ω SST turbulence model for wind turbine performance prediction near stall condition. *Heliyon*, *10*(1), e24048. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24048