



## **ESTUDIO DEL ENFRIAMIENTO DE BATERÍAS 21700 EN AUTOMÓVILES ELÉCTRICOS MEDIANTE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)**

Karina González Hernández<sup>a</sup>, Margarita Guadalupe Correa Ibarra<sup>a</sup>, Grecia Sánchez Montes<sup>a</sup>,  
Eduardo Méndez Sotelo<sup>a</sup>, José Antonio Llera Ledesma<sup>a</sup>, André López Rendón<sup>a</sup>, Jorge Arturo  
Alfaro Ayala<sup>a</sup>, Agustín Ramón Uribe Ramírez<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Col. Noria Alta S/N, C.P. 36050, Guanajuato, Gto., México. mg.correaibarra@ugto.mx

### **Resumen**

El presente estudio investiga la mejora de la eficiencia térmica en baterías de ion litio mediante un sistema de refrigeración optimizado que combina aletas de aluminio y un diseño avanzado de ventilación para maximizar la disipación de calor y reducir los gradientes térmicos. Utilizando simulaciones en Ansys Fluent, se evaluó el desempeño térmico de celdas formato 21700 en configuraciones con y sin aletas, observándose que la integración de estas estructuras permitió mantener un rango de temperatura más uniforme (300 K a 304.65 K) frente al sistema sin aletas (303.6 K a 307.7 K). Las aletas de aluminio, junto con recubrimientos de ABS, favorecieron un intercambio térmico más eficiente al limitar la transferencia directa de calor entre celdas y potenciar la convección hacia el fluido refrigerante. Estos resultados no solo destacan una mejora significativa en la uniformidad térmica y la vida útil de las baterías, sino que también incrementan su seguridad operativa en aplicaciones de alta densidad energética como los vehículos eléctricos. Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones enfocadas en configuraciones avanzadas de refrigeración y materiales innovadores, contribuyendo al desarrollo de sistemas de gestión térmica más eficientes, seguros y adaptados a las crecientes demandas tecnológicas.

*Palabras clave:* Baterías de iones de litio; CFD; aletas; arreglo geométrico; automóviles eléctricos.



## STUDY OF THE 21700 ELECTRIC CAR BATTERIES COOLING USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

### Abstract

This study investigates the enhancement of thermal efficiency in lithium-ion batteries through an optimized cooling system that combines aluminum fins with an advanced ventilation design to maximize heat dissipation and minimize thermal gradients. Using simulations conducted in Ansys Fluent, the thermal performance of 21700-format cells was evaluated in configurations with and without fins. Results demonstrated that the integration of these structures enabled a more uniform temperature range (300 K to 304.65 K) compared to the system without fins (303.6 K to 307.7 K). The aluminum fins, in conjunction with ABS coatings, facilitated more efficient heat exchange by limiting direct heat transfer between cells and enhancing convection with the cooling fluid. These findings not only highlight significant improvements in thermal uniformity and battery lifespan but also enhance operational safety in high-energy-density applications such as electric vehicles. This work lays the foundation for future research focused on advanced cooling configurations and innovative materials, contributing to the development of more efficient, safe, and technologically adaptable thermal management systems.

*Keywords:* Lithium-ion batteries; CFD; fins; geometric arrangement; electric vehicles.

### 1. Introducción

Las baterías de iones de litio (LIBs) se han convertido en una tecnología clave para el almacenamiento de energía en diversas aplicaciones, especialmente en vehículos eléctricos (EVs), debido a su alta densidad energética, larga vida útil y bajo impacto ambiental (Sun y col., 2020). Sin embargo, con el objetivo de extender la autonomía de los EVs y mejorar la experiencia del usuario al optimizar la gestión de la duración de la batería, se han adoptado formatos de mayor

capacidad, como el 21700, que ofrece mayor densidad energética en comparación con el formato 18650 (Steinhardt y col., 2021). El uso de materiales activos para mejorar el rendimiento electroquímico de las LIBs también ha incrementado el riesgo de fuga térmica (*thermal runaway*, TR), que puede derivar en incendios, lo que representa un desafío importante en términos de seguridad (Allen, 2020). Por otro lado, en el ámbito de la aviación, el uso de baterías de iones de litio



también ha ganado relevancia, pero en aplicaciones diferentes, como sistemas auxiliares de energía, baterías de respaldo y dispositivos electrónicos portátiles. Según la Administración Federal de Aviación (FAA) de los Estados Unidos, entre 2006 y 2021 se han reportado más de 300 accidentes relacionados con incendios de baterías en aeronaves (Jia y col., 2022). Estas diferencias en aplicaciones y contextos subrayan la necesidad de abordar la seguridad de las LIBs según su uso específico.

La fuga térmica es un problema de seguridad grave, ya que ocurre cuando la tasa de liberación de calor de las reacciones internas de la batería supera la capacidad de disipación del calor externo (Liu y col., 2021). Estudios previos han analizado este fenómeno en diversas condiciones, incluidas aquellas bajo presiones atmosféricas reducidas, como las encontradas en altitudes elevadas o en el espacio (Xie y col., 2019). Investigaciones recientes han demostrado que, a bajas presiones, la ignición se retrasa, la pérdida de masa es menor y la intensidad de la combustión disminuye, aunque los resultados son inconsistentes y dependen de las condiciones específicas de presión y temperatura (Fu y col., 2018). Esta variabilidad en los resultados subraya la

complejidad del fenómeno de TR en entornos de baja presión, especialmente en baterías de mayor densidad energética como las 21700 (Quinn y col., 2018).

Además de los desafíos de seguridad, las LIBs enfrentan dificultades relacionadas con el control térmico. Durante la carga y descarga, las LIBs generan calor que puede afectar su rendimiento, vida útil y seguridad. Un mal manejo térmico puede desencadenar reacciones químicas exotérmicas que elevan rápidamente la temperatura interna de la batería, exacerbando el riesgo de TR (Wike y col., 2017) Este problema es particularmente relevante en vehículos eléctricos, donde las baterías están conectadas en serie y en paralelo, lo que requiere un sistema de gestión térmica eficiente para mantener la uniformidad de temperatura y evitar diferencias mayores a 5°C entre las celdas (Öztop y col., 2022). Diversos enfoques han sido propuestos para la gestión térmica de las baterías, desde sistemas de refrigeración líquida hasta el uso de materiales de cambio de fase (PCM). Aunque estos sistemas han mostrado resultados prometedores, presentan limitaciones en cuanto a costos, complejidad estructural y regeneración de los materiales utilizados (Wang y col., 2020).



Las baterías de formato 21700, aunque más eficientes en términos de densidad energética, aún presentan problemas de rendimiento bajo condiciones extremas, como bajas temperaturas o presiones reducidas. A temperaturas bajo cero, por ejemplo, la capacidad de las LIBs puede reducirse hasta en un 5% en comparación con su capacidad a 20°C (Smart y col., 2010), lo que afecta su rendimiento y acelera el envejecimiento. La disminución en la tasa de transferencia de iones de litio (Li<sup>+</sup>) a bajas temperaturas, acompañada de un aumento en la viscosidad del electrolito y la impedancia interna, puede llevar a la deposición de litio metálico (Li-plating), lo que no solo reduce la capacidad de la batería, sino que también genera riesgos adicionales de seguridad, como la formación de dendritas de litio (Mathias y col., 2014).

Diseños innovadores como cortes oblicuos en aletas rectas tradicionales y estructuras de doble capa han demostrado mejorar la transferencia de calor y optimizar el rendimiento térmico general de las placas de enfriamiento (Li y col., 2020). La gestión térmica adecuada es crucial para mantener la temperatura de las baterías dentro de un rango óptimo de operación, lo que previene la degradación y mejora la vida útil de las celdas. El modelado CFD permite simular y

analizar el comportamiento térmico de las baterías bajo diferentes configuraciones y condiciones operativas. Por ejemplo, los estudios han demostrado que la disposición y el espaciamiento entre celdas, así como la ubicación de los ventiladores, pueden afectar significativamente la uniformidad de la temperatura y la eficacia del enfriamiento (Wilke y col., 2017). Los resultados obtenidos de estos estudios son esenciales para diseñar sistemas de gestión térmica eficientes que mantengan las baterías en un rango de temperatura seguro durante su operación. Es decir, el uso de CFD proporciona valiosos conocimientos que pueden ser aplicados para optimizar la gestión térmica, mejorando así la eficiencia y seguridad de los vehículos eléctricos (Sharma y col., 2021).

Tesla ha sido pionero en la adopción de baterías de iones de litio (LIBs) para sus vehículos eléctricos, empleando celdas cilíndricas de diferentes formatos y composiciones químicas. Los modelos más recientes, como el Model 3 y el Model Y, han incorporado celdas del tipo 21700 (21 mm de diámetro y 70 mm de altura), las cuales presentan ventajas significativas respecto a las celdas 18650 previamente utilizadas. Estas celdas más grandes ofrecen una mayor



densidad energética, lo que permite almacenar más energía en un menor número de celdas, reduciendo tanto los costos de producción como los sistemas auxiliares de control. En particular, las celdas 21700 permiten un ahorro en el sistema de baterías de aproximadamente un 9%, ya que su coste por kWh es más bajo en comparación con las celdas 18650. Mientras que en modelos como el Model S y Model X se continúa utilizando celdas 18650 con composición química de níquel, cobalto y aluminio (NCA), Tesla ha adoptado las celdas 21700 en sus variantes de doble motor del Model 3 y Model Y, con el fin de mejorar la eficiencia energética y reducir costos. Además, en el mercado chino, donde la reducción de costos es prioritaria, el Model 3 de Autonomía Estándar emplea celdas de fosfato de hierro y litio (LFP), lo que también contribuye a la diversificación de las tecnologías de almacenamiento energético utilizadas por el fabricante.

Debido a su gran importancia, los modelos térmicos y las estrategias de enfriamiento del paquete de baterías/módulo han sido ampliamente estudiados por Zolot y col., (2002). Ellos probaron el paquete de baterías para el vehículo eléctrico híbrido Toyota Prius y analizaron el rendimiento térmico junto con el flujo de aire a través del paquete.

Sabbah y col., (2010) compararon la efectividad del enfriamiento pasivo por materiales de cambio de fase (PCM) con el enfriamiento activo por aire forzado. Tanto las simulaciones como los experimentos se realizaron a diferentes tasas de descarga, temperaturas de funcionamiento y temperaturas ambiente para un paquete compacto de baterías de iones de litio. Xu y col., (2014) revisaron los métodos de enfriamiento por aire forzado y simularon el rendimiento de disipación de calor de diferentes modelos de conductos de flujo de aire del paquete de baterías de 55 Ah. Estos trabajos se centran más en la investigación de módulos de baterías comerciales y han contribuido a la gestión térmica de las baterías de iones de litio. Sin embargo, no se ha puesto suficiente énfasis en la disposición de los monómeros de la batería ni en las estrategias de refrigeración por aire. Al comparar el rendimiento térmico de las celdas bajo diferentes configuraciones de módulos de batería, estrategias de enfriamiento por aire y espacio entre celdas, el modelo es útil para el diseño práctico de módulos de batería. Un módulo de batería bien diseñado hace grandes contribuciones a la confiabilidad y durabilidad del paquete de baterías de iones de litio de alta potencia.



En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo principal mejorar la eficiencia térmica de las baterías eléctricas mediante la optimización de la distribución de temperatura en las celdas. Para ello, se propone la implementación de aletas de enfriamiento en las celdas de baterías, una estrategia que busca maximizar la disipación de calor y mejorar la uniformidad térmica. La integración de estas estructuras de enfriamiento no solo promete aumentar la eficiencia general del sistema de gestión

térmica, sino también contribuir a la seguridad y prolongación de la vida útil de las baterías en condiciones operativas exigentes.

## 2. Metodología

La presente investigación, se considera un complemento del artículo (Uribe y col., 2024). Para este estudio, se usó el software Ansys Fluent con las especificaciones termo físicas de las baterías de ion litio modelos 21700 [Tabla 1].

**Tabla 1.** Propiedades termo físicas de una batería de ion litio. Modelo: 21700.

Parámetros	Valor
Diámetro	21 mm
Altura	70 mm
Volumen	$2.42 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
Peso	66.67 g
Voltaje de descarga	2.5 V
Capacidad nominal	4.6 Ah
Voltaje nominal	3.6 V
Densidad	$2751 \text{ kg/m}^3$
Calor específico	$1070 \text{ J/(j kg}^{-1} \text{ k}^{-1})$

Se determina la potencia generada por cada celda para poder determinar la transferencia de calor cedida por el volumen total de las baterías al sistema de enfriamiento evaluado. La potencia de cada celda se calculó mediante

el producto de la capacidad y el voltaje nominales del modelo de la batería, dispersado entre el volumen total del arreglo de 5x5 celdas.



En el presente estudio se evalúan dos sistemas de enfriamiento previamente validado (Uribe y col., 2024). Aplicado al modelo de baterías Sanyo, específicamente del tipo 18650.

### Método de simulación

Cada celda se considera un cilindro que posee propiedades homogéneas con una fuente de calor interna. Aunque los componentes internos tienen teóricamente propiedades termo-físicas particulares, se considera cada celda como un cuerpo simple y con valores precisos. Durante los procesos de descarga, las ecuaciones de gobierno del módulo de la batería se expresan a continuación (Wang y col., 2014).

Ecuación de continuidad

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

Ecuación de conservación del momento

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

Ecuación de conservación de energía

$$\rho C_p \left( \frac{\partial E}{\partial t} + v_x \frac{\partial E}{\partial x} + v_y \frac{\partial E}{\partial y} + v_z \frac{\partial E}{\partial z} \right) = kt \left( \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

### Nomenclatura

$\vec{v}$  Vector de velocidad del fluido

$t$	Tiempo
$p$	Presión
$\rho$	Densidad del fluido
$\mu$	Viscosidad dinámica
$C_p$	Calor específico a presión constante
$E$	Energía específica del fluido
$kt$	Conductividad térmica
$v_x$	Velocidad del fluido en la dirección x
$v_y$	Velocidad del fluido en la dirección y
$v_z$	Velocidad del fluido en la dirección z

### 2.1 Condiciones de frontera.

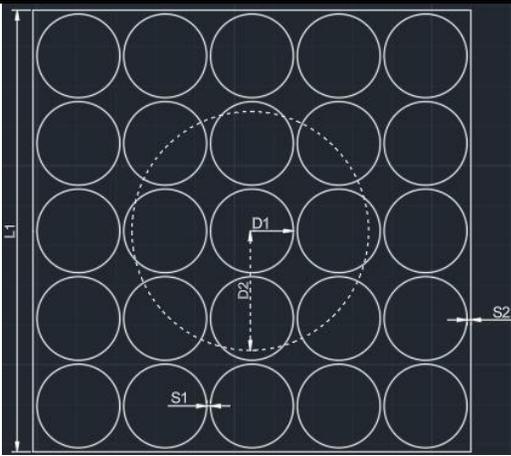
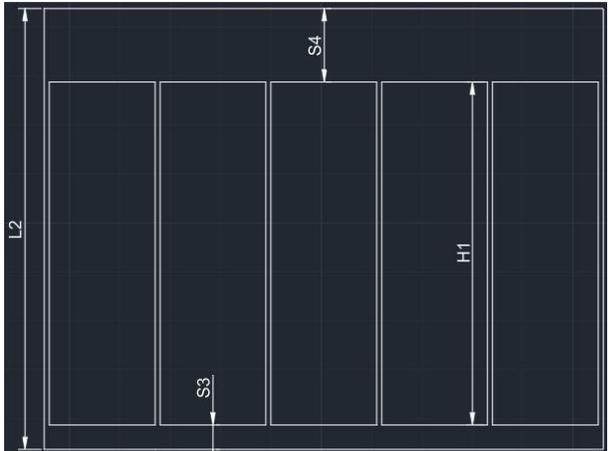
El primer diseño geométrico corresponde a una configuración basada en el trabajo de Wang y col. (2014), y la segunda configuración basadas propuestas de (Uribe y col., 2024); ambas propuestas se adaptaron al modelo 21700 con la finalidad de hacer un análisis de la eficiencia de los sistemas de enfriamiento.



El primer diseño presenta una entrada de aire en la parte central superior del compartimento

de la batería, mientras que la salida de aire se encuentra en la parte inferior. Tabla 2

**Tabla 2.** Datos generales de la primera geometría usada por Wang y col. (2014) para baterías modelo 21700.

Datos Generales	Valor	Geometría
Diámetro de celda ( <b>D1</b> )	21 mm	
Altura de celda ( <b>H1</b> )	70 mm	
Separación de celdas ( <b>S1</b> )	1 mm	
Diámetro de aire ( <b>D2</b> )	60 mm	
Separación lateral ( <b>S2</b> )	1 mm	
Separación inferior ( <b>S3</b> )	5 mm	
Separación superior ( <b>S4</b> )	15 mm	
Altura del volumen de aire ( <b>L1</b> )	111 mm	
Ancho del volumen de aire ( <b>L2</b> )	90 mm	
Régimen	Turbulento	
Velocidad del aire	1 m/s	
Temperatura de entrada	298.15K	

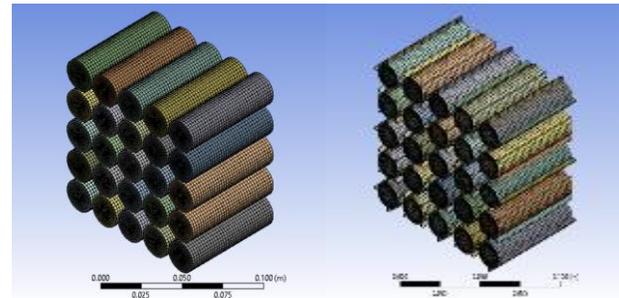


El segundo modelo, se simula utilizando un revestimiento de 2.3 mm de plástico ABS, propiedades en [Tabla 3](#).

**Tabla 3.** Propiedades del material ABS

<b>Nombre</b>	Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).
<b>Composición química</b>	$(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$
<b>Densidad</b>	1010 – 1210 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Temperatura de transición vítrea</b>	87.9 – 118 °C
<b>Temperatura de fusión</b>	200 – 245 °C
<b>Conductividad térmica</b>	0.188 – 0.335 W/m·K
<b>Densidad</b>	2751 kg/m <sup>3</sup>
<b>Capacidad calorífica específica</b>	$1.39 \times 10^3$ – $1.92 \times 10^3$ J/m·K

La malla óptima reportada en el análisis de sensibilidad fue de 2 mm (Uribe y col., 2024), por lo que se toma como base para el mallado de los dos modelos [Figura 1].

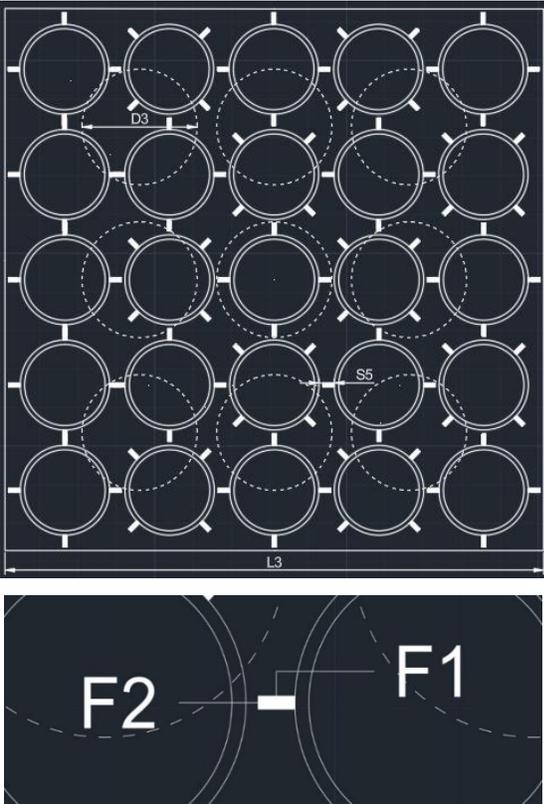


**Figura 1.** Mallado implementado para los modelos.

Así mismo, se implementa el modelo de propuesta de mejora del trabajo reportado por Uribe y col. (2024). La descripción general se encuentra en la [Tabla 4](#)



**Tabla 4.** Datos generales de la primera geometría basada de (Uribe y col., 2024) para baterías modelo 21700.

Datos Generales	Valor	Geometría
Separación de celdas ( <b>S5</b> )	4 mm	
Longitud del volumen de aire ( <b>L3</b> )	111 mm	
Diámetros de aire ( <b>D3</b> )	30 mm	
Espesor del ABS	2.3 mm	
Espesor de las aletas ( <b>F2</b> )	1 mm	
Ancho de las aletas ( <b>F1</b> )	3 mm	
Material de las aletas	Aluminio	
No. de entradas de aire	9	
Régimen	Turbulento	
Velocidad del aire	1 m/s	
Temperatura de entrada	298.15K	

## 2.2 Análisis de sensibilidad de malla

Se propusieron múltiples mallas para estudiar el cambio en una variable, en este caso se seleccionó la variable de temperatura máxima alcanzada como variable a estudiar en esta etapa. El análisis de malla nos indica a partir

de cuál mallado ya no se tiene un cambio considerable en el valor de la variable. Cada una de las mallas estudiadas tiene una cantidad de nodos y elementos, que aumentan conforme se hace más pequeño el tamaño del mallado con los que el programa resuelve el modelo utilizado. Las mallas estudiadas

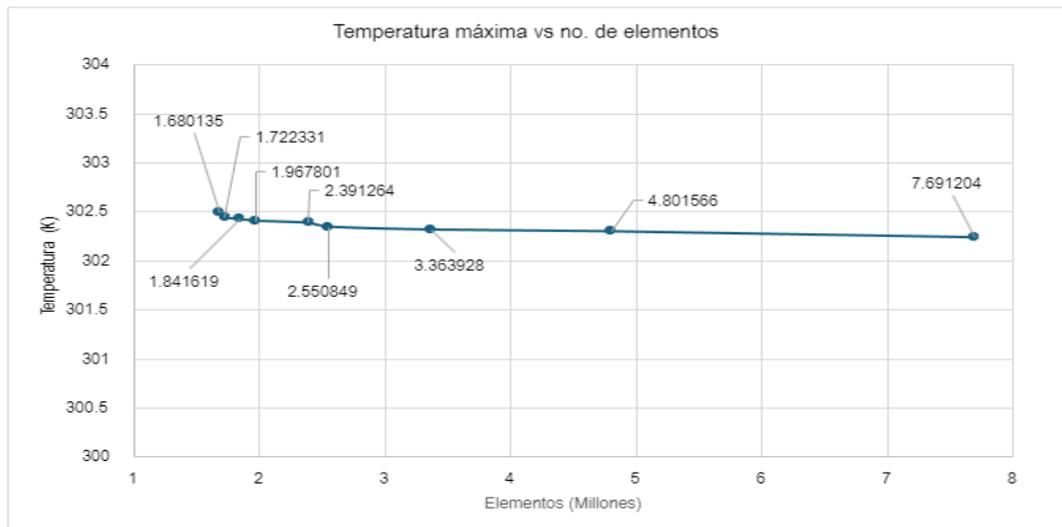


tenían tamaños de 3mm, 2.75mm, 2.5mm, 2.25mm, 2mm, 1.75mm, 1.5mm, 1.25mm y 1mm. La cantidad de elementos correspondientes a cada malla son de 1.680 millones, 1.722 millones, 1.842 millones, 1.968 millones, 2.390 millones, 2.551 millones, 3.364 millones, 4.801 millones y 7.691 millones. Cuando se reduce el tamaño de la malla, aumenta el número de elementos.

En la Figura 2 se presenta una gráfica que ilustra la variación de la temperatura máxima

en el arreglo con aletas, como ejemplo representativo del análisis realizado.

En la gráfica se observan los valores de temperatura máxima en el arreglo con aletas contra el número de elementos que tiene cada malla estudiada. A partir de la malla de 2.25mm, con 1.968 millones de elementos, el cambio en el valor de la temperatura máxima es despreciable, la gráfica comienza a acercarse a una asíntota. El valor de malla utilizado fue de 2mm con un número de 2.391 millones de elementos.



**Figura 2.** Representación gráfica de la variación de la temperatura en función del incremento en el número de elementos de las mallas evaluadas

### 3. Resultados

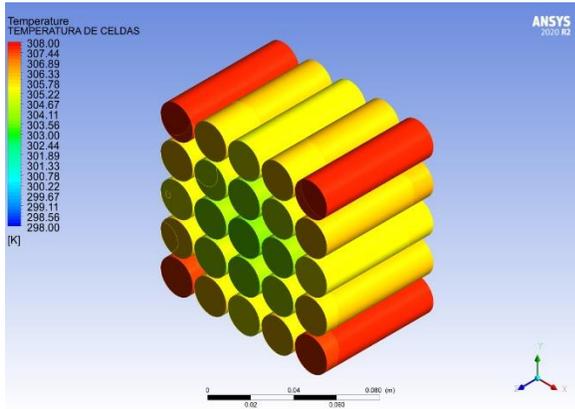
#### 3.1 Celdas sin aletas

La Figura 3 muestra la distribución de las temperaturas en las celdas sin aletas de forma

isométrica, donde la temperatura mínima en las baterías es de 303.6 K y en su valor máximo de 307.7 K. Esta distribución de temperaturas nos indica cuales celdas tienen mayor enfriamiento, siendo estas las que se

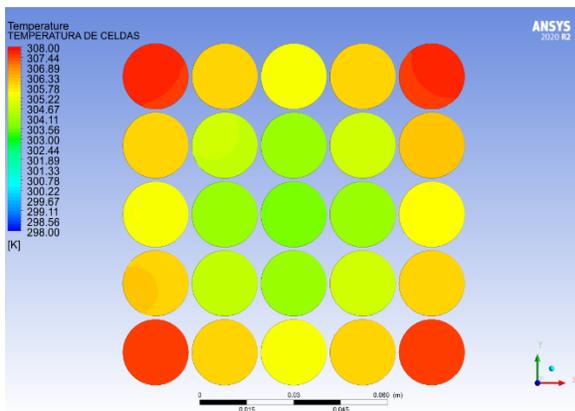


encuentran en el centro de la geometría. En las esquinas se observan colores rojos en los contornos debido a que los máximos de temperatura los tenemos en esas celdas.



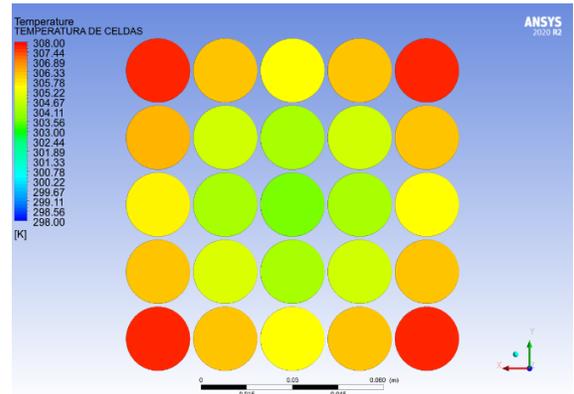
**Figura 3.** Vista isométrica del contorno de temperatura en las celdas sin aletas.

En la Figura 4 se observa la temperatura de las celdas sin aletas en la entrada de aire, esta parte de las celdas tiene el primer contacto con el fluido de enfriamiento. En la Figura 3 se ven las celdas del centro con temperaturas menores que en las esquinas.



**Figura 4.** Contorno de temperaturas de las celdas sin aletas visto desde la entrada del aire.

La Figura 5 pertenece a la parte inferior de las celdas sin aletas, en esta zona el aire de enfriamiento sale del sistema. A diferencia de la figura anterior, se observa que tiene zonas más calientes debido a que el aire en ese punto está caliente por el calor que adquiere en su recorrido por las celdas.

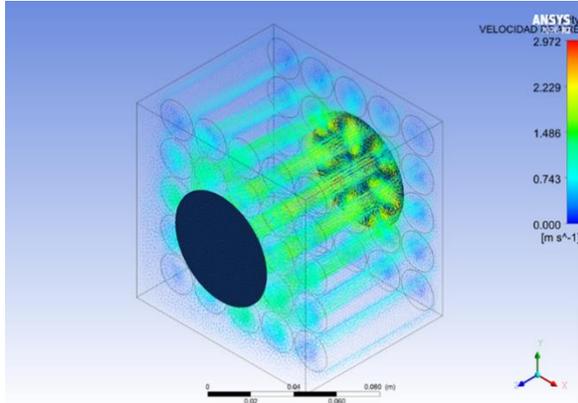


**Figura 5.** Contorno de temperaturas de las celdas sin aletas visto desde la salida del aire.

En la Figura 6, se observa una vista de los vectores de velocidad del aire y la distribución de este dentro del volumen de control. En ella, se señala con un círculo azul la entrada de aire al sistema, mientras que los vértices negros indican los puntos de

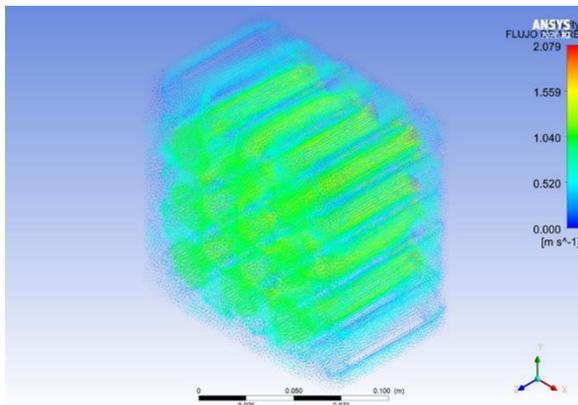


intersección entre la geometría del sistema y las celdas correspondientes a las aletas.



**Figura 6.** Vectores de velocidad y distribución del aire dentro del volumen de control vistos de una manera isométrica.

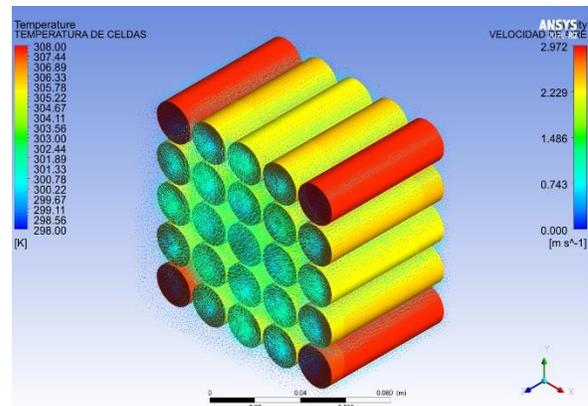
La Figura 7 muestra los vectores de velocidad del aire en el sistema. Se observa que las áreas de color verde, que representan mayores velocidades, corresponden a las zonas de contacto con las baterías.



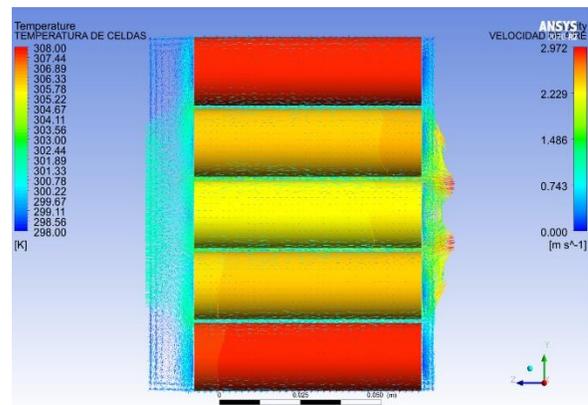
**Figura 7.** Vista isométrica de los vectores de velocidad del aire dentro del volumen de control.

Las Figuras 8 y 9 muestran una combinación del contorno de temperatura de las celdas y

los vectores de velocidad del aire. En estas figuras ya se puede apreciar el cambio de la temperatura y el flujo del aire entre las celdas sin aletas. En la Figura 9 se observan los vectores de velocidad en la salida del sistema, los cuales se representan en colores amarillo y rojo, indicando que han alcanzado la velocidad máxima registrada.



**Figura 8.** Contorno de temperatura y vectores de velocidad en las celdas sin aletas vistos isométricamente.



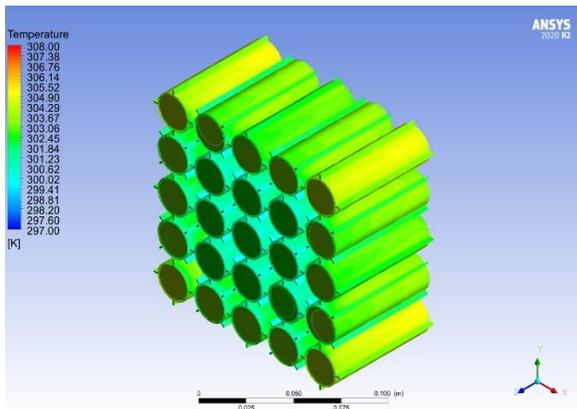
**Figura 9.** Contorno de temperatura y vectores de



velocidad en las celdas sin aletas, por un lado del volumen de control.

### 3.2 Celdas con aletas

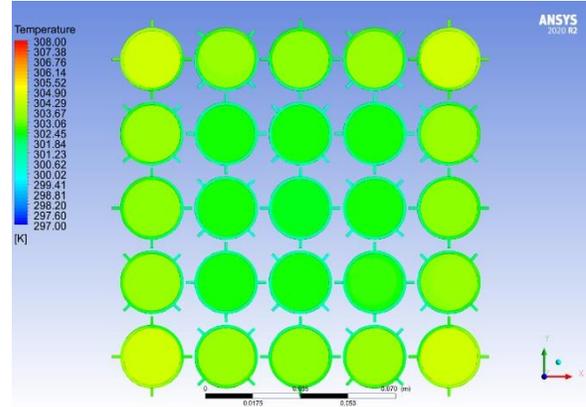
La Figura 10 presenta la distribución isométrica de las temperaturas en las celdas con aletas. Se observa que la temperatura mínima en las baterías es de 300 K, mientras que la máxima es de 304.65 K. Esta distribución indica que las celdas con mayor enfriamiento se localizan en el centro de la geometría. En las esquinas, los contornos presentan tonos más amarillos, lo que refleja que en estas celdas se registran los valores más altos de temperatura.



**Figura 10.** Vista isométrica del contorno de temperatura en las celdas con aletas.

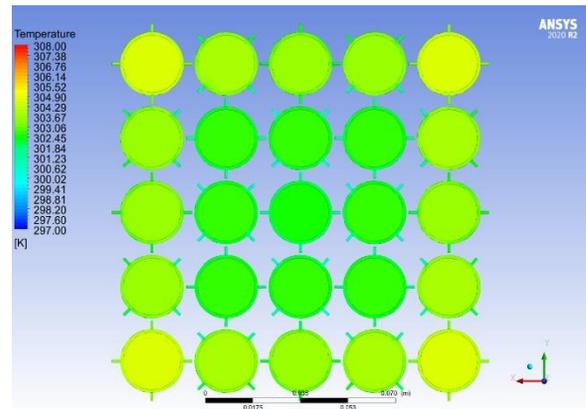
En la Figura 11 se observa la temperatura en las celdas con aletas en la entrada de aire. Esta parte de las celdas tiene el primer contacto con el fluido de enfriamiento. En la Figura 12

se ven las celdas del centro con temperaturas menores que en las esquinas.



**Figura 11.** Contorno de temperaturas de las celdas con aletas visto desde la entrada del aire.

La Figura 12 pertenece a la parte inferior de las baterías, en esta zona el aire de enfriamiento sale del sistema. A diferencia de la figura anterior, se observan zonas más calientes debido a que el aire en ese punto está caliente por el calor que adquiere en su recorrido por las celdas.

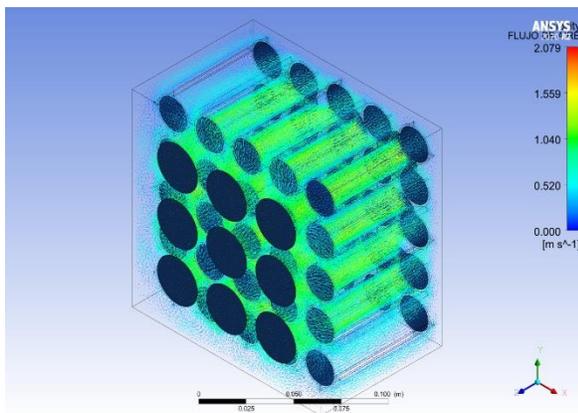


**Figura 12.** Contorno de temperaturas de las celdas con aletas visto desde la salida del aire.



En la Figura 13, se observa una vista de los vectores de velocidad del aire y la distribución de este dentro del volumen de control.

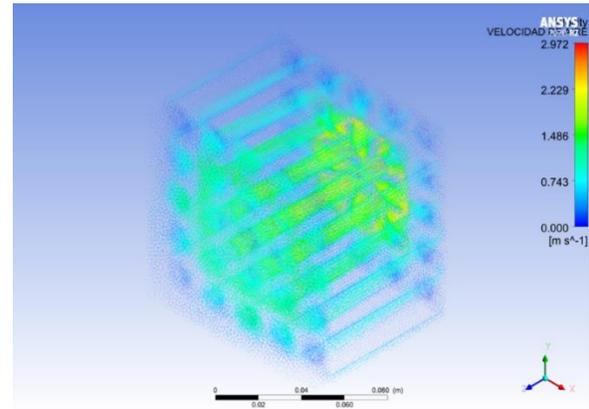
En la figura, se indican con círculos azules las nueve entradas de aire al sistema, en contraste con el arreglo sin aletas, que posee solo una entrada. Los vértices negros representan los puntos de intersección entre los límites de la geometría y las celdas con aletas.



**Figura 13.** Vectores de velocidad y distribución del aire dentro del volumen de control vistos de una manera isométrica.

La Figura 14 corresponde a los vectores de velocidad del aire en el sistema, se observa como las zonas de color verde, donde la velocidad es mayor, corresponde a la zona de

contacto con las baterías.

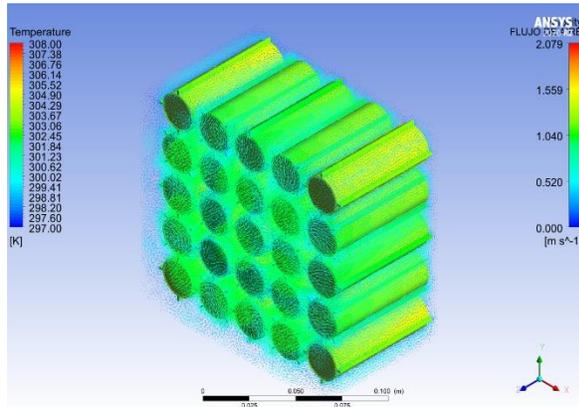


**Figura 14.** Vista isométrica de los vectores de velocidad del aire dentro del volumen de control.

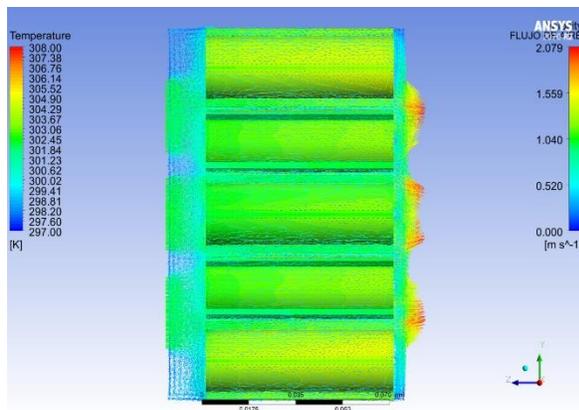
Las Figuras 15 y 16 muestran una combinación del contorno de temperatura de las celdas y los vectores de velocidad del aire. En las figuras ya se refleja el cambio de la temperatura en las celdas con aletas y el flujo del aire entre las celdas con aletas. En la Figura 16 se observan los vectores en la salida del sistema, se notan de colores amarillo y rojo debido a que su velocidad es la máxima



alcanzada.



**Figura 15.** Contorno de temperatura de las celdas con aletas y vectores de velocidad vistos isométricamente.



**Figura 16.** Contorno de temperatura de las celdas con aletas y vectores de velocidad por un lado del volumen de control.

## 4. Discusión de resultados

### 4.1 Celdas sin aletas

El sistema presentó una distribución deficiente de temperatura dentro del paquete de celdas analizadas, con una temperatura mínima de 303.6 K y una máxima de 307.7 K. Según el análisis de la simulación, este

comportamiento podría estar relacionado con la entrada de aire al sistema. La ventilación, al estar localizada en la parte superior de la caja, limita la distribución uniforme del fluido de enfriamiento. Además, la velocidad del aire a su ingreso impide una convección adecuada entre el fluido y las baterías, reduciendo el contacto y, por ende, el intercambio térmico.

Asimismo, la concentración de temperaturas más altas en las esquinas se atribuye a la menor presencia de fluido de enfriamiento en estas zonas. Esto ocurre porque la entrada de aire está posicionada directamente sobre las baterías centrales del arreglo, lo que favorece que estas presenten temperaturas más bajas. Adicionalmente, la posición de la entrada de aire, junto con la velocidad del flujo y la distancia entre la caja y las celdas, generan un aumento de presión en el fluido de enfriamiento, lo que a su vez incrementa la velocidad de salida a 2.972 m/s.

Al hacer un análisis por celda, se puede observar que este aumento de velocidad se ve relacionado con la distribución de temperatura en cada batería, puesto que la temperatura de las celdas a la entrada es diferente que, en la parte inferior, esto se piensa que es por la menor convección dado



el aumento de velocidad y por el aumento de la temperatura del fluido al tener intercambio de energía con la parte superior de la celda.

#### 4.2 Celdas con aletas

El sistema analizado presentó una temperatura mínima de 300 K y una máxima de 304.65 K. El enfriamiento se atribuye a la presencia de nueve entradas de aire, las cuales facilitan el intercambio térmico, y a la integración de aletas de aluminio en el diseño. Este comportamiento sugiere que la propuesta de ventilación favorece una mejor distribución del fluido de enfriamiento en todo el sistema. Aunque las temperaturas más uniformes se observaron en las celdas centrales, las celdas en las esquinas también mantuvieron temperaturas relativamente bajas. Esto se debe, probablemente, a la posición céntrica de las entradas de aire en la parte superior de la caja, lo que evita que estén directamente alineadas con las celdas de las esquinas.

Además, la distribución uniforme del fluido de enfriamiento permitió una reducción en la presión del sistema, lo que resultó en una menor velocidad del flujo de salida en comparación con el sistema anterior. Este fenómeno mejora el rendimiento térmico al

reducir gradientes significativos de temperatura.

La implementación de aletas de aluminio también contribuyó significativamente al desempeño térmico del sistema. Dado el alto potencial calorífico del aluminio, estas aletas favorecen una mayor convección térmica. El recubrimiento de las celdas de litio con material ABS, un termoplástico, junto con las aletas de aluminio, juega un papel crucial en la dinámica térmica del sistema. Mientras que el material ABS inhibe parcialmente la transferencia de calor por convección directa entre celdas, las aletas de aluminio actúan como almacenamiento temporal de la energía térmica liberada por las celdas. Posteriormente, al estar en contacto con el fluido de enfriamiento, estas aletas facilitan el intercambio térmico por convección, ayudando a disipar eficientemente el calor y reduciendo la temperatura de las celdas.

#### 5. Conclusiones

En el presente estudio se ha demostrado que la implementación de sistemas de refrigeración con aletas en las baterías de iones de litio, específicamente en los formatos 18650 y 21700, mejora significativamente la distribución térmica y la eficiencia del sistema de enfriamiento. Las



celdas de formato 21700, que presentan una mayor densidad energética, mostraron mejores resultados en términos de la uniformidad de la temperatura en comparación con las celdas de formato 18650. Asimismo, las configuraciones propuestas permiten mantener las baterías dentro de un rango térmico óptimo (300 K a 304.6 K), lo que no solo mejora la seguridad operativa, sino que también prolonga la vida útil de las baterías.

La decisión de optar por las celdas 21700 en lugar de las 18650 se basa en el hecho de que las celdas más nuevas ofrecen un mejor rendimiento, lo que se traduce en una mayor potencia y eficiencia del motor. Aunque la temperatura máxima alcanzada por el modelo 21700 es un grado mayor que la del modelo 18650, este incremento se mantiene dentro del rango permitido para garantizar la seguridad y eficiencia del sistema. Además, este ligero aumento de temperatura se ve compensado por la capacidad de las celdas 21700 para proporcionar una mayor potencia al motor, mejorando su desempeño general.

Para las simulaciones de los sistemas analizados, la eficiencia del procesador utilizado desempeña un papel crucial en la obtención de resultados confiables. En este

estudio, se realizaron análisis de malla con tamaños que variaron entre 3 mm y 1 mm, determinándose que el tamaño óptimo era de 2 mm. Sin embargo, al emplear un mallado más fino, se incrementan tanto el tiempo de simulación como los requisitos de hardware. Por lo tanto, para estudios más rigurosos, es fundamental disponer de un equipo de cómputo adecuado que garantice la convergencia de los cálculos y permita manejar un mallado más preciso, dado que este factor influye directamente en el rendimiento y la duración de las simulaciones.

Los hallazgos de este estudio son relevantes no solo para la industria de los vehículos eléctricos, sino también para el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía de alta densidad en general. La capacidad de mantener las celdas dentro de un rango de temperatura seguro tiene el potencial de mejorar la confiabilidad y seguridad de una amplia gama de aplicaciones que dependen de baterías de iones de litio.

Este trabajo abre nuevas oportunidades para investigaciones futuras centradas en la optimización de baterías, no solo en términos de capacidad energética, sino también considerando modificaciones en el tamaño y



la disposición de las celdas dentro de los módulos de batería. La flexibilidad en el diseño geométrico y los sistemas de refrigeración puede desempeñar un papel clave en el aumento de la eficiencia térmica, reduciendo así los riesgos asociados al sobrecalentamiento y mejorando la vida útil de las baterías. Estas optimizaciones son especialmente relevantes en un contexto donde las demandas de rendimiento y seguridad en las baterías de vehículos eléctricos continúan en aumento.

A largo plazo, futuras investigaciones podrían explorar configuraciones adicionales de enfriamiento pasivo y activo, así como nuevos materiales para la construcción de aletas y recubrimientos, lo que permitirá seguir perfeccionando los sistemas de gestión térmica de baterías. De esta manera, los avances logrados en este estudio sentarán las bases para el diseño de baterías más eficientes, seguras y adaptadas a las necesidades de la industria de la movilidad eléctrica y otras aplicaciones tecnológicas que demandan soluciones de almacenamiento de energía.

### Referencias bibliográficas

Allen, J. (2020). Review of polymers in the prevention of thermal runaway in lithium-ion

batteries. *Energy Reports*, 6, 217–224.  
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.03.027>

Fu, Y., Lu, S., Shi, L., Cheng, X., & Zhang, H. (2018). Ignition and combustion characteristics of lithium-ion batteries under low atmospheric pressure. *Energy*, 161, 38–45.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.129>

Jia, Z., Huang, Z., Zhai, H., Qin, P., Zhang, Y., Li, Y., & Wang, Q. (2022). Experimental investigation on thermal runaway propagation of 18,650 lithium-ion battery modules with two cathode materials at low pressure. *Energy*, 251, 123925–123925.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123925>

Li, W., A.K. Jishnu, Garg, A., Xiao, M., Peng, X., & Gao, L. (2020). Heat Transfer Efficiency Enhancement of Lithium-Ion Battery Packs by Using Novel Design of Herringbone Fins. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 17(2).  
<https://doi.org/10.1115/1.4046160>

Li, W., Jishnu, A. K., Garg, A., Xiao, M., Peng, X., & Gao, L. (2020). Heat Transfer Efficiency Enhancement of Lithium-Ion Battery Packs by Using Novel Design of Herringbone Fins. *Journal*



*of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 17(2).

<https://doi.org/10.1115/1.4046160>

Liu, Y., Niu, H., Li, Z., Liu, J., Xu, C., & Huang, X. (2021). Thermal runaway characteristics and failure criticality of massive ternary Li-ion battery piles in low-pressure storage and transport. *Process Safety and Environmental Protection*, 155, 486–497.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.031>

Mathias Petzl, Kasper, M., & Danzer, M. A. (2014). Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study. *Journal of Power Sources*, 275, 799–807.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.065>

Mesut Öztop, & Apdulmutalip Şahinaslan. (2022). Control of temperature distribution for Li-ion battery modules via longitudinal fins. *Journal of Energy Storage*, 52, 104760–104760.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104760>

Quinn, J. B., Waldmann, T., Richter, K., Kasper, M., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2018). Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells: A Comparison of Commercial 18650 to the 21700 Cells. *Journal of the Electrochemical*

*Society*, 165(14),

A3284–A3291.

<https://doi.org/10.1149/2.0281814jes>

Sharma, A. R., Sai, C. S., Kumar, A., et al. (2021). Three-dimensional CFD study on heat dissipation in cylindrical lithium-ion battery module. *Materials Today: Proceedings*.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.000>

Smart, M. C., Ratnakumar, B. V., Chin, K. B., & Whitcanack, L. D. (2010). Performance of lithium-ion cells at low temperatures. *Journal of the Electrochemical Society*, 157(10), A1361–A1374. <https://doi.org/10.1149/1.3501236>

Steinhardt, M., Elisabeth Irene Gillich, Rheinfeld, A., Kraft, L., Spielbauer, M., Bohlen, O., & Jossen, A. (2021). Low-effort determination of heat capacity and thermal conductivity for cylindrical 18650 and 21700 lithium-ion cells. *Journal of Energy Storage*, 42, 103065–103065.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103065>

Sun, P., Roeland Bisschop, Niu, H., & Huang, X. (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire Technology*, 56(4), 1361–1410.

<https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>



Uribe Ramírez, A. R., Alfaro Ayala, J. A., González Hernández, K., Correa Ibarra, M. G., Sánchez Montes, G., Méndez Sotelo, E., Llera Ledesma, J. A., & López Rendón, A. (2024). Estudio del enfriamiento de baterías de automóviles eléctricos mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD). *Verano de la Ciencia*, 29, 1-13. ISSN 2395-9797. [https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/#8203::contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/#8203::contentReference[oaicite:0]{index=0}).

Wang, G., Gao, Q., Yan, Y., & Wang, Y. (2020). Thermal Management Optimization of a Lithium-Ion Battery Module with Graphite Sheet Fins and Liquid Cold Plates. *Automotive Innovation*, 3(4), 336–346. <https://doi.org/10.1007/s42154-020-00121-1>

Xie, S., Ren, L., Yang, X., Wang, H., Sun, Q., Chen, X., & He, Y. (2019). Influence of cycling aging and ambient pressure on the thermal safety features of lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 448, 227425–227425. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227425>