

Simulación térmica de un módulo de Li-Po con generación de calor transitoria utilizando ANSYS Fluent

Gabriela Y. Ortiz-Lagunas¹, Edgar E. Vera-Cárdenas¹, Francisco N. Demesa López¹, Juan Serrano-Arellano¹

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pachuca, Carretera México-Pachuca Km. 87.5, C. P. 42080, Col. Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

*Autor de correspondencia: juan.sa@pachuca.tecnm.mx

Fecha de Envío: 21, octubre, 2025

Fecha de Aceptación: 05, febrero, 2026

Resumen: Este trabajo, tiene como propósito investigar la respuesta térmica transitoria de un módulo de batería de polímero de litio (Li-Po) bajo condiciones de convección natural, con el fin de evaluar la acumulación y disipación de calor durante la operación. Se desarrolló un modelo numérico bidimensional en ANSYS Fluent utilizando una geometría cuadrada con espesor equivalente de 0.02 m. Se aplicaron condiciones de contorno de convección natural $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{amb}} = 300 \text{ K}$ y una fuente de calor volumétrica de $2.5 \times 10^5 \text{ W/m}^3$, representativa de una celda bajo descarga moderada. Se realizaron simulaciones transitorias hasta 5000 s. Los resultados muestran que la temperatura transitoria gradualmente se vuelve mucho más alta, alcanzando un pico de 349.98 K alrededor de los 1500 s. Mientras tanto, el gradiente térmico máximo en el sistema se mide entre 35 y 40 K entre la región central y las paredes del módulo, lo que indica una acumulación significativa de calor en el núcleo. Posteriormente, la temperatura disminuye gradualmente, acercándose a 318 K, durante los 5000 s, lo que lleva a un gradiente térmico general de 15 – 20 K, y un comportamiento cuasi-estacionario en condiciones de convección natural. Como contribución, el estudio cuantifica la evolución térmica transitoria del módulo y evidencia las limitaciones de la convección natural, aportando criterios para el diseño de sistemas de gestión térmica en aplicaciones de almacenamiento energético.

Palabras clave: Batería de iones de litio; simulación térmica; CFD; generación de calor; módulo de batería.

Abstract: This work aims to investigate the transient thermal response of a lithium-polymer (Li-Po) battery module under natural convection conditions, to evaluate heat accumulation and dissipation during operation. A two-dimensional numerical model was developed in ANSYS Fluent using a square geometry with an equivalent thickness of 0.02 m. Natural convection boundary conditions of $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{amb}} = 300 \text{ K}$, and a volumetric heat source of $2.5 \times 10^5 \text{ W/m}^3$, representative of a cell under moderate discharge, were applied. Transient simulations were performed for up to 5000 s. The results show that the transient temperature gradually becomes much higher, reaching a peak of 349.98 K around 1500 s. Meanwhile, the maximum thermal gradient in the system is measured to be between 35 and 40 K between the central region and the walls of the module, indicating a significant accumulation of heat in the core. Subsequently, the temperature gradually decreases, approaching 318 K over 5000 s, leading to an overall thermal gradient of 15 – 20 K and quasi-steady-state behavior under natural convection conditions. As a contribution, the study quantifies the transient thermal evolution of the module and highlights the limitations of natural convection, providing criteria for the design of thermal management systems in energy storage applications.

Keywords: Lithium-ion battery; thermal simulation; CFD; heat generation; battery module.

1. Introducción

El creciente uso de baterías de ion-litio (Li-ion) y polímero de litio (Li-Po) en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos han sido de

gran importancia para una gestión térmica adecuada y así garantizar su seguridad, desempeño y vida útil [1]. Durante los procesos de carga y descarga, estas baterías generan

calor debido a pérdidas resistivas internas y reacciones electroquímicas, lo que puede ocasionar incrementos de temperatura no uniformes dentro del módulo. Dichos gradientes térmicos promueven la degradación acelerada de materiales activos, disminución de la capacidad y fugas térmicas [2].

En este contexto, la simulación numérica mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una herramienta efectiva para predecir la distribución de temperaturas y analizar estrategias de gestión térmica en baterías de Li-ion y Li-Po [3]. El uso de modelos transitorios resulta relevante, ya que permite representar de manera más realista el comportamiento térmico bajo diferentes perfiles de operación, capturando el efecto acumulativo de la generación de calor y las limitaciones de la disipación térmica [4].

Diversos estudios han reportado metodologías para optimizar la refrigeración de módulos de baterías mediante convección natural, convección forzada, integración de materiales de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés) o uso de aletas de disipación [5]. Sin embargo, aún se requiere mayor comprensión sobre la respuesta térmica transitoria de configuraciones simplificadas de módulos, que permitan establecer criterios de validación y lineamientos de diseño antes de implementar estrategias de gestión térmica complejas.

En este trabajo se presenta una simulación térmica transitoria de un módulo bidimensional de batería Li-Po, desarrollada en ANSYS Fluent. El modelo incorpora condiciones de convección natural y una fuente interna de calor volumétrica representativa del comportamiento de una celda en operación. El objetivo es cuantificar la evolución temporal de la temperatura máxima y los gradientes internos, aportando evidencia numérica sobre la magnitud de las diferencias térmicas y su relevancia en el diseño de sistemas de gestión térmica para baterías de próxima generación.

2. Modelo físico

El estudio corresponde a un módulo simplificado de batería Li-Po, representado mediante una geométrica bidimensional cuadrada de $0.1 \times 0.1\text{m}$ y un espesor equivalente de 0.02m , lo que permite reducir la complejidad computacional manteniendo un balance energético representativo. El dominio fue discretizado con condiciones de frontera convectivas en todas sus caras, considerando un coeficiente de transferencia de calor promedio de $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ y una temperatura ambiente de 300K . La generación de calor interna se modela como una fuente volumétrica uniforme, con una densidad de potencia aproximada de $2.5 \times 10^5 \text{ W/m}^3$, equivalente a la disipación típica de una celda bajo régimen de descarga.

La Figura 1 muestra el esquema del modelo bidimensional del módulo de batería Li-Po.

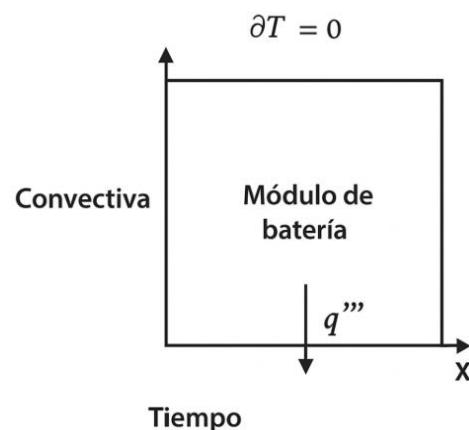


Figura 1. Modelo bidimensional.

La Tabla 1 presenta las especificaciones técnicas de la batería de polímero de litio (Li-Po).

Tabla 1. Datos técnicos de la batería Li-Po.

Modelo	Turnigy de alta descarga Li-Po
Capacidad	20000 mAh
Voltaje nominal	3.7 V
Voltaje máximo (carga completa)	4.2 V
Energía	≈ 296 Wh
Descarga	12 – 24 C

3. Modelo matemático

La evolución térmica del módulo se describe mediante la ecuación general de conducción de calor transitoria con generación interna como se muestra en la (1).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q''' \quad (1)$$

Donde T es la temperatura (K), ρ la densidad del material (kg/m^3), C_p el calor específico ($J/kg \cdot K$), k la conductividad térmica ($W/m \cdot K$) y q''' la tasa de generación de calor volumétrica (W/m^3).

En la frontera, el flujo de calor se representó mediante una condición convectiva definida en la (2).

$$-k \nabla T \cdot n = h(T - T_\infty) \quad (2)$$

Donde h es el coeficiente convectivo (W/m^2K), T_∞ la temperatura ambiente (K) y n el vector normal a la superficie. Se empleo sistema internacional de unidades (SI).

4. Independencia de malla y paso de tiempo

El dominio se discretizo con una malla estructurada bidimensional, aplicando refinamiento uniforme en zona central para capturar con mayor precisión el gradiente térmico. Se evaluaron tres configuraciones de malla:

- Malla gruesa: 2.5×10^3 celdas.
- Malla intermedia: 1.0×10^4 celdas.
- Malla fina: 4.0×10^4 celdas.

La Figura 2 muestra la distribución de la malla computacional empleada en la simulación térmica del módulo de batería Li-Po.

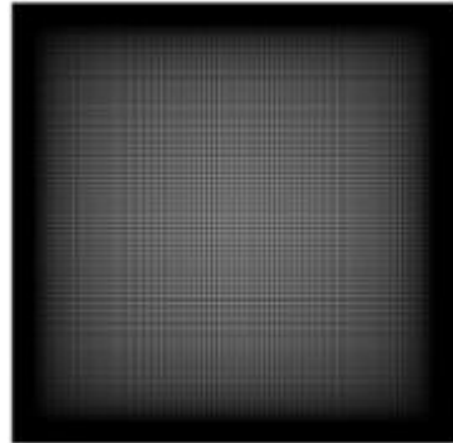


Figura 2. Distribución de malla computacional.

Los resultados mostraron que la diferencia en la temperatura máxima entre la malla intermedia y la fina fue inferior al 1.5 %, La malla intermedia fue la seleccionada para los cálculos por ofrecer un mejor balance en la precisión y un menor costo computacional. De forma análoga, se analizó la independencia respecto al paso de tiempo mediante tres configuraciones 5 s, 2 s y 0.5 s. La diferencia en la temperatura máxima registrada al final de la simulación 5000 s entre los dos pasos más finos fue menor al 2 % por lo que se seleccionó un paso de tiempo de 2 s. Lo cual garantiza la estabilidad numérica y la confiabilidad de los resultados transitorios reportados.

5. Resultados

La simulación transitoria permitió observar el desarrollo del campo térmico dentro del módulo de batería de polímero de litio a lo largo del tiempo. Como se puede observar en la Figura 3 A) al inicio de la simulación la temperatura del dominio se mantuvo cercana a 300 K, sin gradientes significativos, debido a que el sistema aún no había acumulado el calor generado por la reacción electroquímica y la resistencia interna.

A medida que el tiempo de simulación avanza 500 s – 1500 s se observa un incremento progresivo de temperatura en la región central del módulo (Figura 3 B), C) y D). En particular, a los 1500 s se alcanza la temperatura máxima del estudio 349.98 K, evidenciando una acumulación significativa de calor en el núcleo

del dominio. El patrón térmico presenta distribución aproximadamente radial, indicando que la disipación hacia las paredes es el principal mecanismo de transferencia de calor.

Posteriormente, entre 2000 s – 3000 s, Figura 3 E) y F), se observa una disminución gradual de

318 K aproximadamente Figura 3 H), mientras que las zonas cercanas a los bordes la temperatura permanece entre 300 – 305 K. En esta etapa, el gradiente térmico se reduce a aproximadamente 15 – 20 K, lo cual evidencia

temperatura máxima, alcanzando valores de 334 K a los 3000 s. Esto indica que el sistema comienza a disipar el calor generado y tiende hacia un régimen cuasi-estacionario.

Finalmente, el tiempo máximo de simulación 5000 s la temperatura central disminuye hasta

que el sistema alcanza condiciones más estables con menor acumulación térmica respecto al máximo transitorio observado a 1500 s.

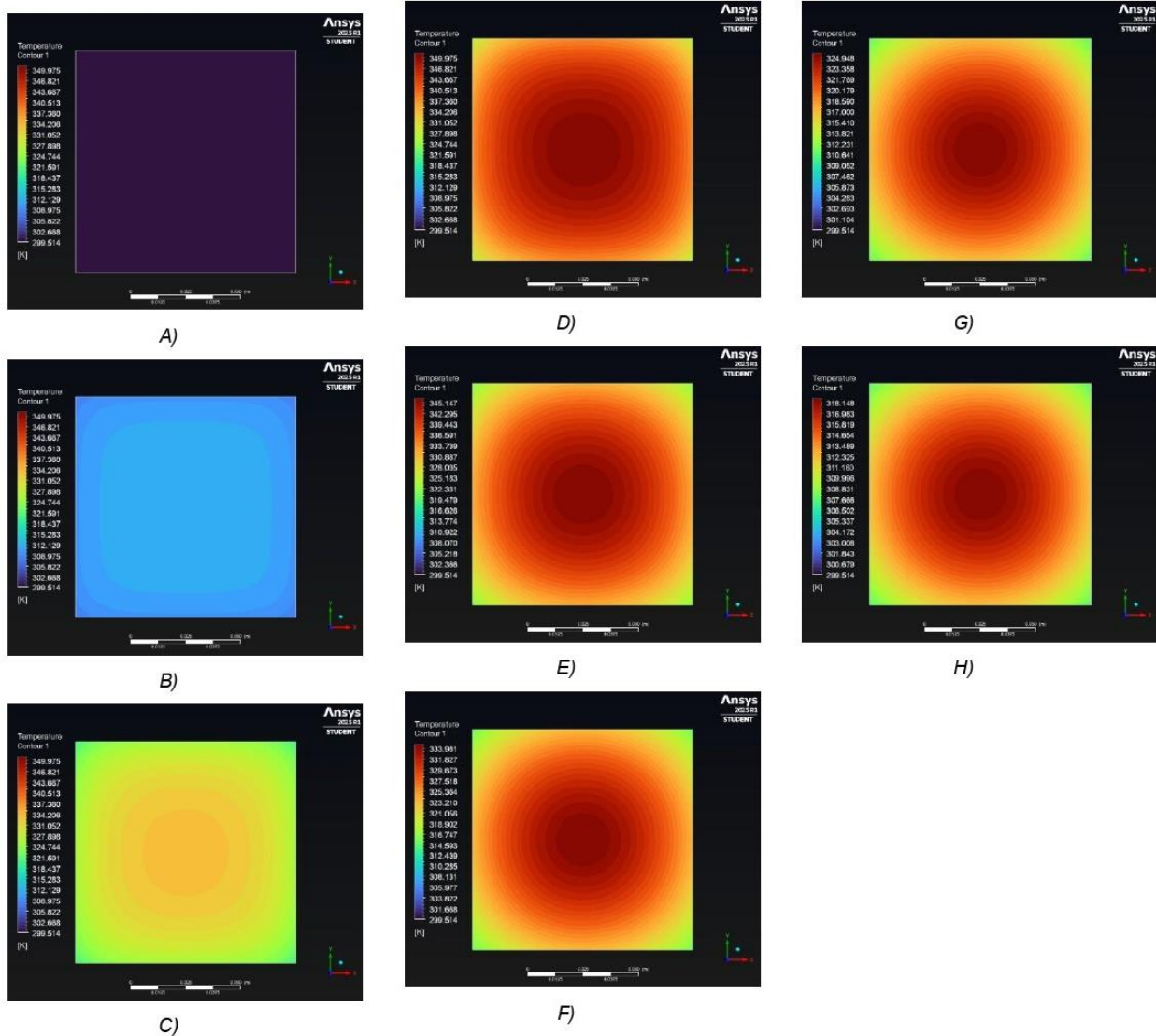


Figura 3. Contornos de temperatura. A) 100 s, B) 500 s, C) 1000 s, D) 1500 s, E) 2000 s, F) 3000 s, G) 4000 s y H) 5000 s.

Para complementar el análisis de los contornos de temperatura descritos en la Figura 3, se crearon las curvas de tiempo que representan la temperatura promedio y máxima de dominio las cuales se muestran en la Figura 4 y Figura 5.

Los gráficos permiten un análisis de la evolución general del sistema térmico, y los contornos muestran la distribución espacial instantánea en puntos específicos. También es importante señalar que los contornos de temperatura describen como se comporta el campo térmico con el entorno local en donde el calor se concentró en el núcleo del módulo, así como el gradiente radial el cual se forma desde el centro hacia las paredes.

El crecimiento temporal en la temperatura máxima y la temperatura promedio para el módulo de batería en convección natural, como se observa en la Figura 4 y 5, estas curvas permiten la interpretación de los efectos de temperatura a lo largo del comportamiento térmico general del sistema, junto con la información espacial ya representada mediante los contornos de temperatura.

En la Figura 4 y 5 se observa un aumento de temperatura durante los primeros 1500s, de simulación, con una temperatura máxima de 349.98 K. Esto resulta de una acumulación de temperatura, donde el calor volumétrico es inicialmente mayor de lo que puede disipar al aire circundante.

A partir del resultado presente se muestra que la temperatura máxima y promedio disminuye lentamente alrededor de los 1500s. Esta pérdida corresponde al hecho de que el sistema comienza a disipar el calor acumulado y casi se mantiene estable. La meseta de temperatura máxima 318 K es alrededor de 5000 s y la temperatura promedio hace casi lo mismo.

La diferencia entre las curvas de temperatura máxima y promedio indica que el campo térmico se está extendiendo o retrayendo hacia una distribución más uniforme a medida que pasa el tiempo, esta tendencia es consistente en

modelar el campo cuando enfrenta un rango de temperatura estable y rápido.

Esto se ajusta a los contornos de temperatura, en los cuales se presenta un gradiente decreciente en las últimas etapas de la simulación. Físicamente, el pico termodinámico a 1500 s es el aspecto más importante de los sistemas, lo cual la segunda etapa demuestra la capacidad del módulo para disipar el calor generado durante la convección natural. Pero, mientras la temperatura disminuirá lentamente en comparación con la última vez, cuando hay un aumento inicial bastante grande, se demuestra que la disipación pasiva será insuficiente para condiciones de operación continua.

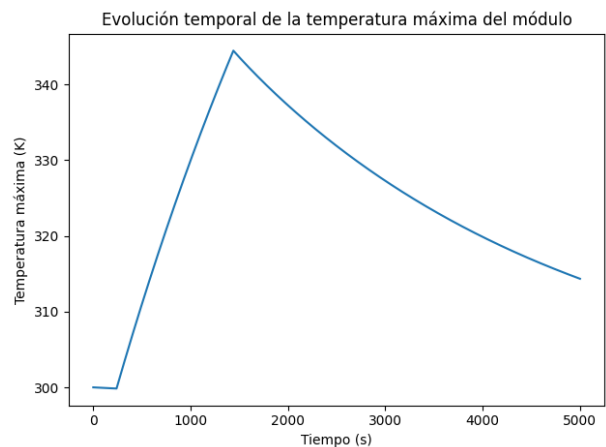


Figura 4. Evolución temporal de la temperatura máxima del módulo de batería.

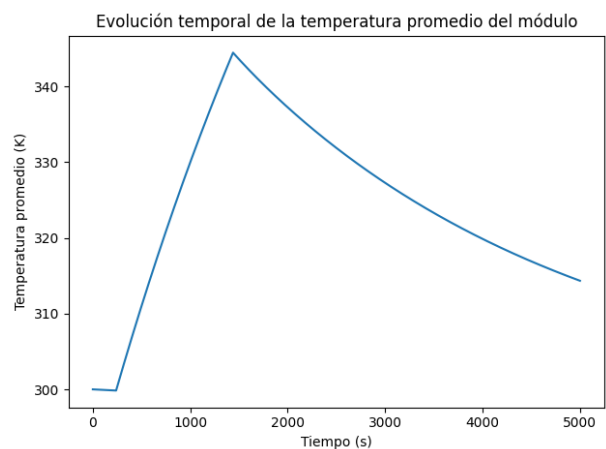


Figura 5. Evolución temporal de la temperatura promedio del módulo de batería.

La Figura 6 muestra la evolución temporal del parámetro monitoreado durante la simulación transitoria. Se observa un comportamiento lineal creciente a lo largo del intervalo de 0 a 5000 s, lo que indica una variación uniforme del valor registrado con cada paso de tiempo, cabe mencionar que esta curva no representa la distribución espacial de temperatura dentro del módulo, sino un parámetro global registrado durante la simulación con fines de seguimiento numerico. Su comportamiento lineal sugiere una progresión controlada del proceso transitorio bajo las condiciones establecidas.

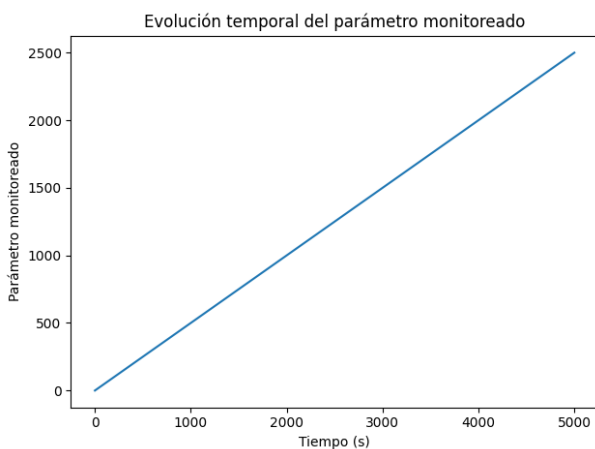


Figura 6. Evolución temporal del parámetro monitoreado durante la simulación.

Estos resultados validan el comportamiento térmico transitorio que se esperaría cuando un módulo de batería genera calor volumétrico bajo convección natural. Se identifica un paso inicial de acumulación térmica, con un aumento gradual de la temperatura y un máximo alrededor de los 1500 s. Luego, el sistema reduce gradualmente la temperatura, indicando que la disipación hacia el ambiente comienza a equilibrar la generación interna de calor.

De manera similar, la evolución temporal de las temperaturas máxima y promedio indica que hay un estado cuasi-estacionario en el sistema, con una reducción gradual del gradiente térmico. Los resultados también muestran que, aunque el módulo es capaz de disipar el calor generado, la convección natural por sí sola puede no ser adecuada para prevenir un aumento significativo de la temperatura durante la fase transitoria.

6. Discusión

Los resultados presentados en este trabajo muestran sobre la evolución térmica transitoria típica de módulos de baterías de polímero de litio en una descarga moderada que presenta un aumento inicial de temperatura con una disminución gradual hacia un estado cuasi-estacionario. Este comportamiento corresponde cualitativamente con los hallazgos en la literatura sobre modelado térmico de baterías de iones de litio recientes, en el cual también se reconoce que la generación interna de calor y la disipación al entorno externo controlan el comportamiento térmico del sistema [6].

Como ejemplo, Madani et al. (2023) señalan que el desarrollo de modelos térmicos precisos requiere la integración de ecuaciones de generación de calor y transporte de energía y condiciones de contorno realistas. Eso es esencial para predecir la evolución de la temperatura en diferentes niveles (de celda, módulo y paquete) [7].

Los gradientes térmicos constituyen un elemento fundamental de los sistemas de gestión térmica de baterías, como también señala la literatura. En trabajos recientes, se ha concluido que la acumulación de calor en la cavidad interna y la disipación a la superficie externa causan variación en la temperatura, sin tomar medidas adecuadas para controlar, lo que puede afectar negativamente la seguridad y la longevidad de las baterías [8]. En este sentido, los gradientes térmicos en los perfiles de temperatura de la literatura actual coinciden con los de este trabajo donde la mayor acumulación de calor ocurre en la parte central del módulo al inicio de la descarga.

Para minimizar estos impactos, los sistemas de gestión térmica activos e híbridos que emplean estrategias de enfriamiento líquido, PCM y mecanismos mejorados de intercambio térmico se han reportado extensamente recientemente. Por ejemplo, Hasani et al. (2025) argumentan que la generación total de calor en las baterías de litio proviene de muchas fuentes internas y que la eficiencia de disipación térmica también

está directamente relacionada con la capacidad de operación del BTMS [9]. Por lo tanto, la conclusión de la temperatura máxima y el gradiente térmico de esta investigación aporta nueva evidencia para la implementación de técnicas de gestión térmica más sofisticadas, particularmente en el punto de operación continua.

Como resultado, la literatura más reciente presentada destaca la necesidad urgente de comprender la respuesta térmica de los módulos de batería y ofrece una buena base para explicar los resultados de las simulaciones. No solo las observaciones muestran algunas tendencias como se indica en la literatura, sino que también muestran la aplicabilidad de usar el modelado térmico numérico desde una perspectiva más científica para validar y mejorar las estrategias de control térmico en entornos aplicados.

7. Conclusión

La simulación del módulo de batería de polímero de litio permitió el análisis de manera detallada la distribución y evolución de la temperatura en función del tiempo bajo condiciones de operación transitoria. Los resultados sugieren que la temperatura aumenta progresivamente desde el exterior de las paredes alcanzando una temperatura máxima de 349.98 K en las regiones centrales, una vez que el ciclo de descarga continúa durante aproximadamente 1500 s. Este fenómeno está de acuerdo con la acumulación temporal de calor en regiones con baja capacidad de disipación térmica.

Posteriormente, se observa una disminución gradual de la temperatura máxima de 318 K al final del periodo de simulación 5000 s, indicando que el sistema tiende hacia un régimen cuasi-estacionario bajo condiciones de convección natural. El gradiente térmico máximo observado durante el pico transitorio fue del orden de 35 – 40 K entre el centro y las paredes, reduciéndose a aproximadamente 15 – 20 K en la etapa final.

Estos resultados confirman que, aunque el módulo es capaz de disipar parcialmente el calor generado, la convección natural por si sola

puede resultar limitada ente condiciones de generación térmica sostenida. En términos generales, el estudio valida la utilidad de los modelos CFD junto con la implementación de una Función Definida por el Usuario (UDF), permitiendo representar adecuadamente la generación volumétrica de calor en ANSYS Fluent. La metodología empleada constituye una herramienta eficaz para predecir el comportamiento térmico del módulo y apoyar el diseño de sistemas de gestión térmica que garanticen seguridad, desempeño y vida útil en aplicaciones de vehículos eléctricos y almacenamiento energético.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Instituto Tecnológico de Pachuca, por el apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- [1] T. M. Bandhauer, S. Garimella and T. F. Fuller, «A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries,» *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 158, nº 3, pp. R1-R25, (2011).
- [2] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia and X. He «Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review,» *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 246-267, 2018.
- [3] Y. Ye, L. H. Saw, Y. Shi and A. A. O. Tay «Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 86, pp. 281-291, 2015.
- [4] L. H. Saw, Y. Ye and A. A. O. Tay, «Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 113, pp. 1032-1045, 2016.
- [5] Z. Rao, Z. Qian, Y. Kuang and Y. Li, «Thermal performance of liquid cooling

- based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface.,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 123, pp. 1514-1522, 2017.
- [6] L. Mattia, H. Beiranvand, W. Zamboni and M. Liserre, «Lithium-ion battery thermal modelling and characterisation: A comprehensive review,» *Journal of Energy Storage*, vol. 129, 2025.
- [7] S. S. Madani, C. Ziebert and M. Marzband, «Thermal Behavior Modeling of Lithium-Ion Batteries: A Comprehensive Review,» *Symmetry*, vol. 15, pp. 1-37, 2023.
- [8] Z. Qianqian, Z. Wei, W. Siyang, Y. Xufei, L. Guanglin, S. Dongliang and Y. Bo, «Thermal management of lithium-ion batteries: from single cooling to hybrid cooling,» *RSC Advances*, vol. 16, n^o 3, pp. 2555-2584, 2026.
- [9] E. Hasani, N. Razzaghi and F. Torabi, «Design and simulation of thermal management system for lithium-ion batteries of hybrid and electric vehicles,» *Energy Equipment and Systems*, vol. 13, pp. 115-129, 2025.