



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

MODELADO DE SISTEMAS DE GESTIÓN TÉRMICA EN BATERÍAS PARA VEHÍCULOS HÍBRIDOS MEDIANTE EL USO DE NANOFLUIDOS

AUTOR: JULIA SÁNCHEZ PÉREZ

TUTOR: PABLO CÉSAR OLMEDA GONZÁLEZ

Selección ▼

Curso Académico: 2020-21

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría utilizar este espacio para agradecer a mi madre y a mi tía todo el esfuerzo que han realizado durante todos estos años.

A Pablo Olmeda y a Amin Dreif les quiero agradecer la oportunidad que me han dado para trabajar con ellos en este proyecto y la ayuda que me han proporcionado durante todos estos meses.

Por último, me gustaría darle las gracias a mi novio Alejandro quien me ha apoyado incondicionalmente durante estos años. Sin duda, nunca podré agradecerle todo su cariño y su paciencia. Y a mi perrita Nina, que siempre me ha sacado una sonrisa aún en los momentos más duros.

RESUMEN

La política actual internacional ha obligado a la industria automovilística a invertir en el desarrollo de vehículos electrificados. Dentro de los sistemas de propulsión eléctricos, la batería es un componente eléctrico crítico para el óptimo funcionamiento del sistema. El objetivo principal de este trabajo es estudiar nuevos sistemas de gestión térmica en baterías para vehículos híbridos. Persiguiendo la consecución de este objetivo se ha empezado por definir un sistema de gestión térmica base, para después implementarlo en un software de programación mediante modelos numéricos. Para representar el comportamiento eléctrico de la celda se optó por un modelo eléctrico equivalente, mientras que para el comportamiento térmico de la celda se optó por un modelo nodal. Asimismo, se implementó un modelo termohidráulico en el software Virtual Engine Model (VEMOD) para la simulación del circuito hidráulico de la refrigeración de la batería. Finalmente, se realizó un estudio paramétrico del impacto que tiene el uso de nanofluidos como refrigerante en el funcionamiento de la batería.

ABSTRACT

Current international policy has forced the automobile industry to invest in the development of electrified vehicles. Within electric propulsion systems, the battery is a critical electrical component for optimal system operation. The main objective of this work is to study new thermal management systems in batteries for hybrid vehicles. In order to achieve this objective, it has started by defining a base thermal management system, to later implement it in a programming software using numerical models. To represent the electrical behavior of the cell, an equivalent electrical model was chosen, while for the thermal behavior of the cell, a nodal model was chosen. Likewise, a thermohydraulic model was implemented in the Virtual Engine Model (VEMOD) software to simulate the hydraulic circuit of the battery cooling. Finally, a parametric study was carried out on the impact that the use of nanofluids as a refrigerant has on the operation of the battery.

RESUM

La política actual internacional ha obligat la indústria automobilística a invertir en el desenvolupament de vehicles electrificats. Dins dels sistemes de propulsió elèctrics, la bateria és un component elèctric crític per a l'òptim funcionament de sistema. L'objectiu principal d'aquest treball és estudiar nous sistemes de gestió tèrmica en bateries per a vehicles híbrids. Perseguint la consecució d'aquest objectiu s'ha començat per definir un sistema de gestió tèrmica base, per després implementar-ho en un software de programació mitjançant models numèrics. Per representar el comportament elèctric de la cel·la es va optar per un model elèctric equivalent, mentre que per al comportament tèrmic de la cel es va optar per un model nodal. Així mateix, es va implementar un model termohidràulic en el software Virtual de cerca Model (VEMOD) per a la simulació de l'circuit hidràulic de la refrigeració de la bateria. Finalment, es va realitzar un estudi paramètric de l'impacte que té l'ús de nanofluidos com a refrigerant en el funcionament de la bateria.

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Memoria
- Presupuesto

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN	8
2.	OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO	9
2.1.	Objetivos principales	9
2.2.	Objetivos específicos	9
2.3.	Planteamiento del trabajo	9
3.	GESTIÓN TÉRMICA EN BATERÍAS	9
3.1.	El vehículo híbrido	9
3.1.1.	Definición	10
3.1.2.	Tipos	10
3.1.3.	Elementos constructivos del sistema de propulsión híbrido eléctrico	12
3.2.	La batería	13
3.2.1.	Componentes	14
3.2.2.	Formas geométricas	15
3.2.3.	Tipos de baterías	15
3.2.4.	Principio de funcionamiento	16
3.3.	Sistemas de gestión térmica de la batería	17
3.3.1.	Funciones	18
3.3.2.	Clasificación de los SGTB	19
3.3.3.	Diseño del BTMS	23
4.	MODELADO DE LA BATERÍA	24
4.1.	Submodelo eléctrico	24
4.1.1.	Ajuste de las impedancias R_0 , R_1 y C_1	25
4.1.2.	Ajuste del voltaje en circuito abierto (OCV)	27
4.2.	Submodelo térmico	28
4.2.1.	Fundamentos teóricos	28
4.2.2.	Aplicación al modelo	31
4.3.	Submodelo termohidráulico	35

Modelado de sistemas de gestión térmica en baterías para
vehículos híbridos mediante el uso de nanofluidos

5.	RESULTADOS	42
6.	CONCLUSIONES	66
7.	REFERENCIAS	67



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Universitat Politècnica de València
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

DOCUMENTO 1: MEMORIA

Autor: Julia Sánchez Pérez

Tutor: Pablo César Olmeda González

Valencia, septiembre de 2021

1. INTRODUCCIÓN

Desde su invención en el siglo XIX, el motor de combustión interna se ha impuesto en el sector automovilístico frente a los otros conceptos de motor existentes, y, con él, el petróleo como principal carburante utilizado por los vehículos a motor.

El proceso de industrialización se muestra imparable desde ese momento, y sus consecuencias comienzan a repercutir gravemente en el medio ambiente. Es por lo que actualmente, en pleno siglo XXI, la humanidad se enfrenta a un reto global: reducir la contaminación del planeta con el fin de preservar el medio ambiente y la biodiversidad existente.

En la consecución de este objetivo, es de gran importancia que la electricidad producida provenga en su mayor parte de fuentes de energía renovables, pero el sector automovilístico también juega un papel muy importante. La razón es que un porcentaje no despreciable de las emisiones contaminantes generadas actualmente proviene de los vehículos (Ilustración 1), que a través del proceso de combustión emiten diversos contaminantes a la atmósfera, entre ellos el dióxido de carbono, principal causante del efecto invernadero.

La actual urgencia por reducir las emisiones a la atmósfera ha obligado al sector automovilístico a investigar en profundidad la electrificación de los vehículos y poner en funcionamiento el vehículo híbrido. Este tipo de automóviles combinan la energía química, proveniente del combustible fósil, y la energía eléctrica, que se almacena en la batería. Su principio de funcionamiento hace patente la importancia de alcanzar un sistema de almacenamiento con gran capacidad, gran autonomía y rapidez de recarga como características indispensables.

Así, se puede concluir que la batería es el elemento crítico en el funcionamiento de los motores híbridos eléctricos y que la gestión térmica de este elemento resulta esencial para el buen funcionamiento del sistema completo. El Centro de Motores Térmicos (CMT) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) afronta este tipo de desafíos mediante la investigación, a la vez que avanza en el desarrollo de sistemas de propulsión más eficientes mediante el uso de herramientas numéricas y la experimentación. Este Trabajo Final de Grado tiene el estudio de los sistemas de gestión térmica de la batería y el impacto de diferentes refrigerantes como principal línea de investigación.

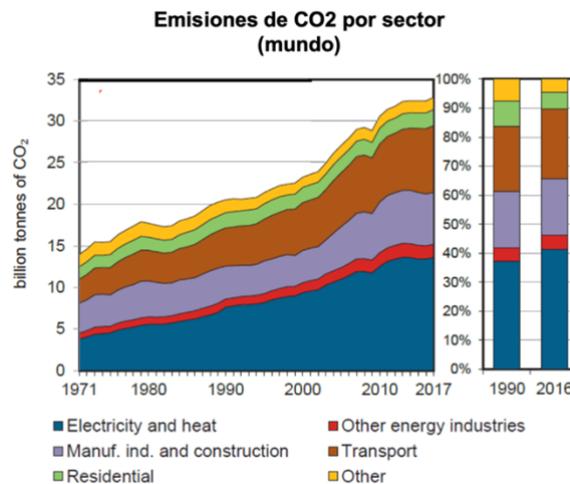


Ilustración 1. Porcentaje de emisiones de dióxido de carbono de cada sector industrial. Fuente: [14]

2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

2.1. Objetivos principales

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Grado es contribuir al desarrollo de nuevos sistemas de gestión térmica en baterías mediante el uso de herramientas numéricas.

2.2. Objetivos específicos

Este objetivo se subdivide en cuatro objetivos específicos.

- I. Adaptar el diseño del sistema de refrigeración de la batería utilizada en el estudio a los distintos escenarios.
- II. Implementar el modelo térmico y eléctrico de la celda que compone la batería objeto de estudio.
- III. Construir el modelo termohidráulico de la batería utilizando el software Virtual Engine Model (Vemod) para simular ciclos transitorios.
- IV. Desarrollar estudios de gestión térmica en baterías.

2.3. Planteamiento del trabajo

El presente trabajo está planteado de la siguiente forma: el capítulo 1 contiene una breve introducción con el fin de justificar la necesidad del proyecto; el capítulo 2 expone los objetivos del trabajo; a continuación, el capítulo 3 contiene el estado del Arte sobre los sistemas de gestión térmica en baterías; el capítulo 4 expone la adaptación de cada una de las partes del modelo de batería disponible en el CMT (eléctrica, térmica y termohidráulica) a la celda objeto de estudio, detalla los datos de bibliografía necesarios para ello e incluye la explicación acerca de la implementación en el modelo de las correlaciones necesarias para el cálculo del coeficiente de película para el uso de glicol y nanofluidos como refrigerante; el capítulo 5 muestra los resultados de los diferentes estudios paramétricos que se han llevado a cabo, así como los resultados de la simulación del ciclo transitorio Real Driving Emissions (RDE) realizada mediante el software VEMOD; por último, el capítulo 6 recoge las conclusiones extraídas en el trabajo y las futuras líneas de investigación que ofrece el proyecto.

3. GESTIÓN TÉRMICA EN BATERÍAS

3.1. El vehículo híbrido

Existen diferentes tipos de vehículos eléctricos que se pueden distinguir atendiendo a características como su grado de electrificación, la posibilidad de ser enchufados a la red eléctrica o la funcionalidad del motor eléctrico en cada caso.

Solo uno de los tipos de vehículos que se presentan a continuación es puramente eléctrico; todos los demás incorporan algún sistema de hibridación. Por ello, se precisa conocer la definición de vehículo híbrido para la correcta comprensión de la posterior descripción de los modelos.

3.1.1. Definición

El vehículo híbrido es aquel que emplea dos fuentes de energía independientes para su funcionamiento. El presente Trabajo Final de Grado se centra en el estudio del vehículo híbrido eléctrico, cuyo sistema de tracción combina un bloque térmico compuesto por un Motor de Combustión Interna Alternativo (MCIA) y un bloque eléctrico, que cuenta con un motor eléctrico, una batería y un inversor de corriente.

3.1.2. Tipos

Los principales vehículos eléctricos son:

- **Hybrid Electric Vehicle (HEV):** Es el vehículo híbrido convencional. Estos vehículos cuentan con un motor MCIA y un motor eléctrico. Su sistema de tracción se alimenta de energía mecánica proveniente bien del combustible que alimenta al motor MEP o MEC, bien de la transformación de la energía eléctrica almacenada en las baterías. El motor térmico puede cargar la batería de acuerdo a la arquitectura y las condiciones de funcionamiento. Con esta nomenclatura normalmente se hace referencia a los vehículos “no enchufables”. Esta clase de vehículos también puede incorporar la función de frenada regenerativa, que consiste en la recuperación de energía cinética durante el frenado. La energía recuperada se almacenará en la batería, que, por tanto, tendrá más autonomía.
- **Battery Electric Vehicle (BEV):** Es un vehículo puramente eléctrico. En este caso las únicas dos alternativas que existen para recargar las baterías son la frenada regenerativa y el punto de carga conectado a la red eléctrica.
- **Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV):** Son los vehículos híbridos “enchufables”. Las baterías de estos vehículos se recargan directamente de la red eléctrica, gracias a la frenada regenerativa o por medio del motor térmico, pudiendo este a su vez alimentar directamente a la tracción.
- **Extended Range Electric Vehicle o vehículos de autonomía extendida (EREV):** La única función del motor de combustión interna en este tipo de vehículos es recargar las baterías cuando estas se están agotando. Usualmente, el motor térmico se pone en funcionamiento cuando el estado de carga de la batería desciende por debajo de un valor prefijado.
- **Mild Hybrid Electric Vehicle o Vehículo microhíbrido (MHEV):** El motor eléctrico tiene una función limitada: sirve únicamente como apoyo en el arranque, la parada o en picos de demanda para conseguir un pequeño incremento del par o de la potencia según las necesidades del vehículo. Pueden incorporar el frenado regenerativo como los otros modelos citados.
- **Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV):** Son los vehículos que utilizan pilas de hidrógeno como fuente de energía.

Los vehículos híbridos también pueden ser clasificados según la arquitectura de su sistema de propulsión.

- **Arquitectura en paralelo:** Su sistema de tracción combina la actuación del motor eléctrico y la del motor térmico. Ambos motores tienen conexión mecánica con las ruedas. Ambos sistemas pueden funcionar individualmente o de forma conjunta. En la Ilustración 2 se muestra un esquema simplificado del referido funcionamiento en el que

por un lado el motor eléctrico puede actuar como motor (línea naranja) o como generador (línea azul) y por otro lado el MCIA, cuando se encuentra en funcionamiento, proporciona energía mecánica a las ruedas (línea verde).

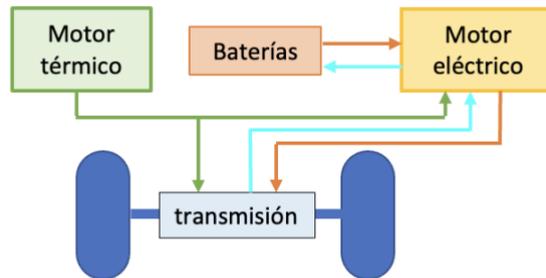


Ilustración 2. Representación esquemática de la arquitectura paralelo. Fuente: Elaboración propia

- **Arquitectura en serie:** Si bien esta configuración cuenta con los mismos elementos constructivos que la anterior, en este caso el motor térmico no puede propulsar el vehículo, ya que no tiene conexión con las ruedas. El único cometido del motor de combustión interna es generar electricidad para recargar las baterías, lo que provoca un ligero incremento en las pérdidas por las conversiones energéticas adicionales, pero permite que el MCIA trabaje en condiciones óptimas de operación. Solo la electricidad procedente de las baterías actúa sobre el eje de tracción del vehículo. Este es el caso de los vehículos híbridos de autonomía extendida. En la Ilustración 3 se representa un esquema de esta arquitectura. Al igual que en el caso anterior, el motor eléctrico puede actuar como motor (línea naranja) o como generador (línea azul), mientras que el motor térmico proporciona energía mecánica al generador para así convertir la energía mecánica en eléctrica (línea verde).

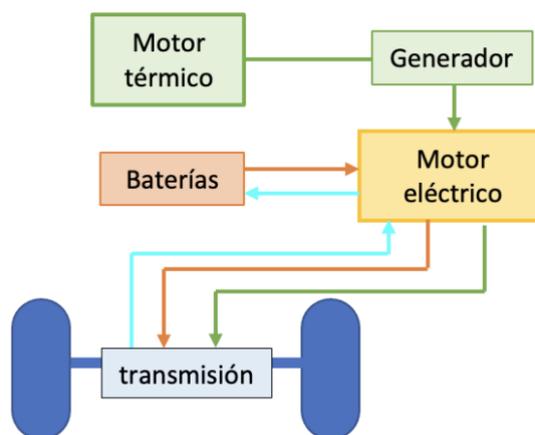


Ilustración 3. Representación esquemática de la arquitectura serie. Fuente: Elaboración propia

Existen muchos tipos de motores eléctricos, pero normalmente la industria automovilística elige el Motor Síncrono de Imanes Permanentes. Por definición, un motor síncrono es aquel cuyo rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético. El Motor Síncrono de Imanes Permanentes es un motor compacto, de poco peso y tamaño, capaz de proporcionar un par elevado incluso a regímenes de giro bajos.



Ilustración 5. Motor eléctrico. Fuente: [12]

Convertidor de potencia: es un elemento que agrupa dos sistemas: un inversor, capaz de transformar corriente continua en alterna, y un rectificador, que convierte la corriente alterna en continua.



Ilustración 6. Convertidor de potencia. Fuente: [13]

Batería: es el dispositivo encargado de almacenar la energía que posteriormente alimentará al motor eléctrico para generar energía mecánica.

3.2. La batería

Aunque el uso de los vehículos híbridos y eléctricos está cada vez más extendido, existen barreras tecnológicas que hasta ahora han impedido su comercialización masiva. El principal obstáculo es precisamente la batería, ya que se exige que este componente tenga poco peso, a la vez que una autonomía y unos tiempos de recarga que puedan competir con la autonomía y el tiempo de repostaje de los MCIAs. Por otra parte, el desafío tecnológico consiste en, además de solventar estas cuestiones, solucionar los problemas de seguridad de los diferentes tipos de batería.

Adicionalmente, la gestión térmica es crítica para mantener la batería en un rango de funcionamiento óptimo aumentando su vida útil, así como su protección frente al sobrecalentamiento o incendio.

Sentado lo anterior, se hace evidente que el papel de la batería es clave en los EV y BEV y que la solución del desafío planteado es imprescindible para que se extienda masivamente el uso de este tipo de vehículos.

3.2.1. Componentes

La batería tiene 3 niveles de agrupación:

- **Celda:** unidad más básica y elemental. Convierte la energía química en eléctrica mediante una serie de reacciones químicas que tienen lugar en su interior. Cada celda está compuesta por un ánodo o electrodo negativo, un cátodo o electrodo positivo y un electrolito.
- **Módulo:** estructura que contiene un número determinado de celdas, conectadas en serie y/o paralelo, que se insertan en ella con el fin de protegerlas de los agentes externos.
- **Pack:** es la combinación de varios módulos y constituye el artefacto final que se designa como batería. El paquete de baterías incluye además sistemas de protección, de control y de refrigeración. El funcionamiento de la batería se rige por el Battery Management System (BMS).

La Ilustración 7 representa un esquema del módulo y del paquete de baterías especificando sus componentes más comunes.

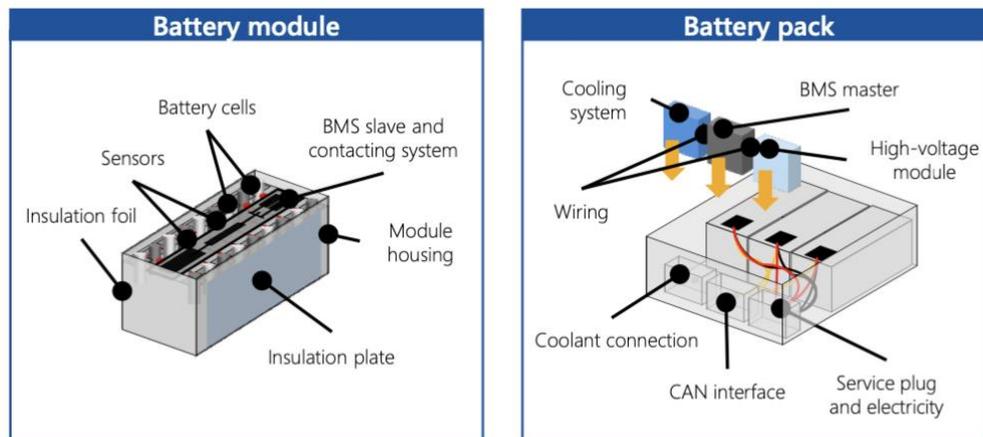


Ilustración 7. Componentes del módulo y del paquete de baterías. Fuente: [9]

3.2.2. Formas geométricas

Una celda se comercializa en tres formas geométricas: cilíndrica, prismática y *pouch*, representadas en la Ilustración 8.

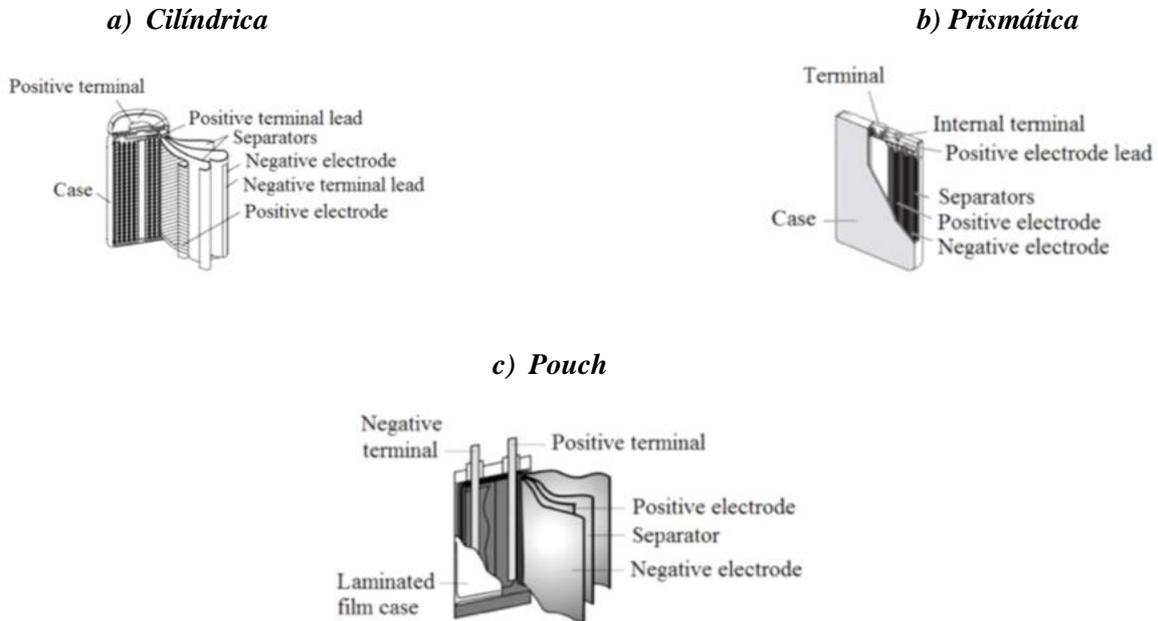


Ilustración 8. Configuraciones geométricas de una celda. a) Cilíndrica. b) Prismática. c) Pouch.
Fuente: [10]

En función del uso que se vaya a dar a la batería, resulta más apropiada una forma u otra. Según *Q. Wang et al [10]*, se encuentra que, si el objetivo es enfriar, el tipo de celda más adecuado es el prismática, pero existen factores como la disponibilidad, el ciclo de vida o el coste por los que se utilizan las celdas cilíndricas.

3.2.3. Tipos de baterías

Hay cuatro tipos de baterías que se usan más comúnmente en la fabricación de vehículos híbridos:

- **Plomo-ácido:** hasta la actualidad su uso ha sido muy común en la industria por su elevada fiabilidad y bajo coste. Por ello, estas baterías han alcanzado la madurez tecnológica y han predominado en el mercado automovilístico. Sin embargo, presentan inconvenientes como una baja densidad energética, un elevado peso o la necesidad de mantenimiento que las hace peores en cuanto a prestaciones que las de ion-litio.
- **Níquel-cadmio:** su principal ventaja es la durabilidad. Además, se pueden descargar por completo sin sufrir daño alguno y se pueden reciclar. Sin embargo, su uso en el sector transporte no resulta rentable.
- **Níquel-MH:** estas baterías son de uso muy común en vehículos híbridos y vehículos puramente eléctricos por sus múltiples ventajas: su densidad energética, aunque no tan elevada como la de las baterías ion-litio, tiene un valor aceptable; el número de ciclos de

carga y descarga que puede soportar es elevado, siempre que la tasa de descarga de la batería no sea muy alta; puede operar en un rango de temperatura bastante amplio y es inofensiva para el medio ambiente, además de reciclable.

- **Ion-litio:** recientemente, estas baterías se han convertido en las favoritas para los fabricantes de vehículos híbridos ya que, a pesar de su elevado precio, poseen una densidad de energía y potencia específicas y un voltaje de la celda superior al del resto de baterías. Asimismo, ofrecen un mayor ciclo de vida, posibilidad de reciclaje y no requieren demasiado mantenimiento; además, responde a las características fundamentales requeridas por las baterías actuales: su peso es muy ligero, la descarga es lenta y el tiempo de recarga es relativamente rápido, siendo de los mejores que actualmente hay tecnológicamente viables.

3.2.4. Principio de funcionamiento

Dado que este último tipo se considera actualmente como el modelo de batería más adecuado, se procede a explicar el principio de funcionamiento de la celda de ion-litio.

Anteriormente ya se mencionó que una celda consta de tres elementos: ánodo, cátodo y electrolito.

Haciendo referencia en concreto a la celda de ion litio, el material comúnmente utilizado para el electrodo negativo es el carbono en forma de grafito. Para el cátodo existen más posibilidades, como por ejemplo LiCoO_2 (óxido de litio-cobalto), LiMn_2O_4 (también conocido como espinela) o LiFePO_4 (fosfato de hierro y litio). Tal es el caso de la batería empleada para el estudio del presente TFG. En cuanto al electrolito, se trata de una solución de sal de litio en un disolvente orgánico, como puede ser el carbonato de etileno ($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$).

En el interior de la celda, ocurren básicamente dos reacciones químicas que invierten su sentido dependiendo de si la batería se está cargando o se está descargando. Durante la descarga, los iones de litio se desplazan del ánodo al cátodo, y en el proceso de carga realizan el camino opuesto. Este funcionamiento queda reflejado en las ecuaciones (1) y (2), así como en la Ilustración 9.

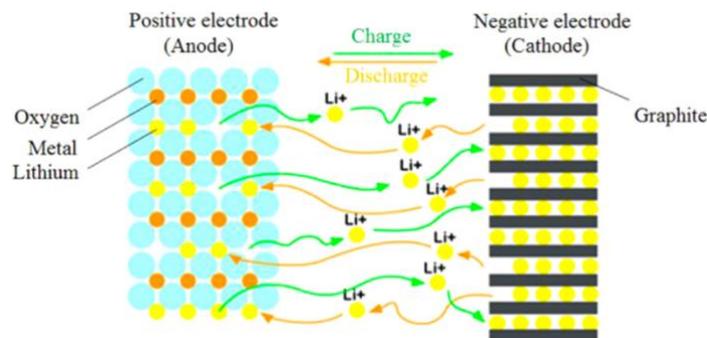
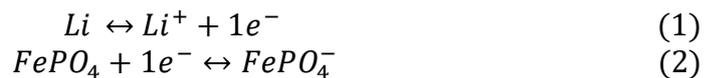


Ilustración 9. Procesos químicos durante la carga/descarga de la batería de ion-litio. Fuente: [10]

Las baterías de ion-litio generan calor por procesos reversibles e irreversibles que ocurren a causa de las reacciones químicas que tienen lugar en la celda. Diversos artículos [1] [2] [3] coinciden en expresar el calor generado por medio de la ecuación (3).

$$\dot{Q} = I(U - V) - I \left(T \frac{dU}{dT} \right) \quad (3)$$

Donde I representa la intensidad de corriente, U el voltaje en circuito abierto, V el voltaje de la celda y $\frac{dU}{dT}$ el coeficiente entrópico.

El primer término de la parte derecha de la igualdad de la ecuación (3) es el correspondiente al calor generado de manera irreversible, proveniente de las pérdidas resistivas por efecto Joule, también normalmente representadas por la ecuación:

$$Q = I^2 R \quad (4)$$

El segundo término de la parte derecha de la igualdad de la ecuación (3) se corresponde con el calor generado reversible debido a la variación de entropía que tiene lugar durante las reacciones electroquímicas.

3.3. Sistemas de gestión térmica de la batería

Si, definitivamente, se escoge la batería de ion-litio como sistema de almacenamiento de la energía eléctrica del vehículo híbrido, es fundamental tener en cuenta las condiciones de operación en las que puede trabajar este tipo de batería. Diferentes estudios, como [4], sitúan el rango de temperaturas recomendable entre una temperatura mínima de 15 °C y 35 ó 40 °C como temperatura máxima admisible de trabajo. Temperaturas por encima o por debajo de este intervalo pueden disminuir la capacidad de las celdas, su rendimiento y su durabilidad y con ello provocar un envejecimiento prematuro de la batería. Además, temperaturas muy elevadas podrían tener consecuencias fatales para la batería, ya que, si el fenómeno de fuga térmica se produce, ello podría desencadenar la destrucción total de la batería.

Asimismo, se ha concluido que la uniformidad de temperatura en la celda y en el módulo es esencial para el buen funcionamiento de la batería, ya que, de lo contrario, podría producirse el deterioro de las celdas, lo que acarrearía las consecuencias que se han descrito anteriormente.

Por otro lado, el ratio de descarga de la batería es también una variable a controlar y viene determinado por las fichas técnicas que el fabricante proporciona.

Todas estas consideraciones quedan recogidas en la tabla resumen que se muestra en la Ilustración 10, realizada en base a los estudios publicados por *S. Arora* [4].

Como se puede apreciar, se necesita de algún sistema que permita controlar la temperatura de la batería y que asegure la correcta liberación de calor; esa herramienta es el Sistema de Gestión Térmica de la Batería (SGTB).

Temperatura de la celda	Provoca	Lleva a	Efecto
Por encima del rango adecuado	Descomposición del electrolito	Pérdida irreversible de litio	Pérdida de capacidad
	A C bajos, reacciones químicas adicionales	Aumento de la impedancia	Pérdida de potencia
	Decrecimiento de la capa del ánodo necesaria para la intercalación del ion-litio		
	Descomposición del aglomerante	Pérdida de estabilidad mecánica	Pérdida de capacidad
25 °C – 40 °C	Ciclo de vida se maximiza		
15 °C – 24 °C	Capacidad de almacenamiento de energía se maximiza		
Por debajo del rango adecuado	Revestimiento del litio	Pérdida irreversible de litio	Pérdida de capacidad y potencia
	Descomposición del electrolito		

Ilustración 10. Efecto de la temperatura en el comportamiento y el desempeño de la batería de ion-litio.
Fuente: [4]

3.3.1. Funciones

El SGTB, por tanto, debe cumplir al menos las siguientes funciones [5]:

- Conseguir que la batería trabaje en el rango de temperatura indicado como el óptimo, enfriando o calentando la misma según sea el caso.
- Minimizar el gradiente de temperatura entre celdas y módulos, consiguiendo regularidad y uniformidad.
- Eliminar mediante ventilación los gases peligrosos de la batería que puedan comprometer su seguridad.
- Además, como en cualquier elemento que se diseña en la industria automovilística, se busca que sea ligero, compacto, barato, fácil de mantener y seguro.

3.3.2. Clasificación de los SGTB

En cuanto al diseño de este sistema de gestión térmica, existen diversas variantes que pueden ser clasificadas según varios criterios.

En primer lugar, existe la posibilidad de utilizar una gran variedad de fluidos de trabajo, principalmente **aire**, **líquido**, **materiales de cambio de fase PCM** (Phase Change Material) o incluso una combinación de los anteriores.

En segundo lugar y atendiendo a la necesidad de uso de máquinas auxiliares, se denominan sistemas de gestión térmica activos aquellos que necesitan de cualquier tipo de componente que consume energía (ventiladores, bombas...) para conseguir la refrigeración; de lo contrario, se clasifican como sistemas pasivos.

En tercer y último lugar, los SGTB pueden contar con una refrigeración directa, en la que el fluido de trabajo entra en contacto directo con las celdas de la batería, o refrigeración indirecta, en la que no existe dicho contacto.

J. Kim et al. [11] propusieron en sus estudios una clasificación de los SGTB atendiendo a diversos criterios y una representación esquemática de cada una de las variantes, que se muestra en la Ilustración 11. Los sistemas de refrigeración de las figuras 11a a 11d incluyen un ciclo de compresión de vapor (VCC), mientras que los sistemas de refrigeración de las figuras 11e a 11g no incluyen dicho sistema. A continuación se detalla una breve explicación de cada uno de los sistemas: el sistema de la figura 11a utiliza aire proveniente del sistema de aire acondicionado del vehículo para la refrigeración de la batería; la figura 11b muestra un sistema de refrigeración por líquido mediante un circuito secundario; el sistema representado en la figura 11c no se aplica a EV; la figura 11d muestra un sistema de refrigeración directo de dos fases; el esquema de la figura 11e representa un sistema de refrigeración con PCM, explicado más adelante; la figura 11f muestra un SGTB mediante tubos de calor; por último, la figura 11g muestra un sistema de refrigeración de elemento termoeléctrico.

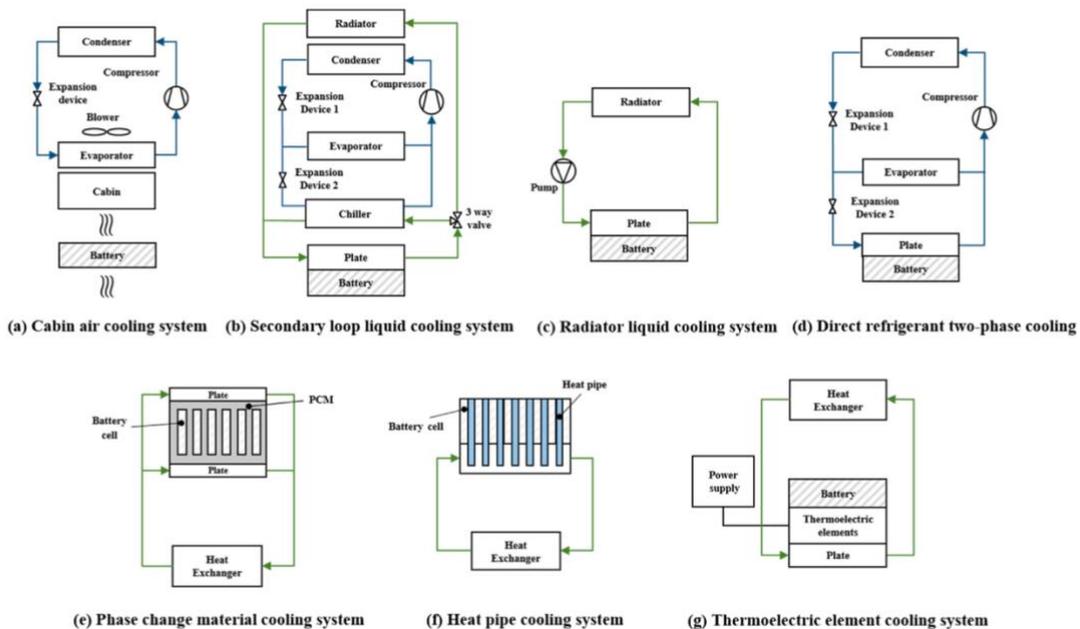


Ilustración 11. Esquemas de los diferentes BTMS. Fuente: [11]

Para explicar las diferentes posibilidades de diseño de los SGTB resulta más conveniente hacerlo atendiendo al fluido de trabajo.

Refrigeración por aire

Es el método más simple y barato para controlar la temperatura del paquete de baterías. El flujo de aire puede ser unidireccional o bidireccional. Se puede utilizar este sistema con celdas de cualquier forma geométrica. La convección puede ser natural (lo que correspondería a un sistema pasivo) o forzada (sistema activo). Cualquiera que sea la opción de diseño, las ventajas y los inconvenientes son muy parecidos.

- **Ventajas:** son sistemas directos, en los cuales la batería está en contacto directo con el aire. Estos sistemas son ligeros, tienen una configuración simple y no requieren mucho mantenimiento.
- **Desventajas:** todas estas ventajas se ven ensombrecidas por la insuficiente eficacia de este sistema para las exigencias requeridas, ya que debido a la baja conductividad térmica del aire y a su baja capacidad calorífica, este sistema no es capaz de mantener una distribución uniforme de la temperatura ni es capaz de reducir la temperatura media tan eficazmente como otros sistemas.

La Ilustración 12 muestra los esquemas típicos del SGTB en el caso de refrigeración con aire, propuestos en los estudios realizados por Z. Rao et al [5]. Los esquemas a y b representan un sistema de refrigeración pasivo, mientras que el esquema c representa un SGTB activo.

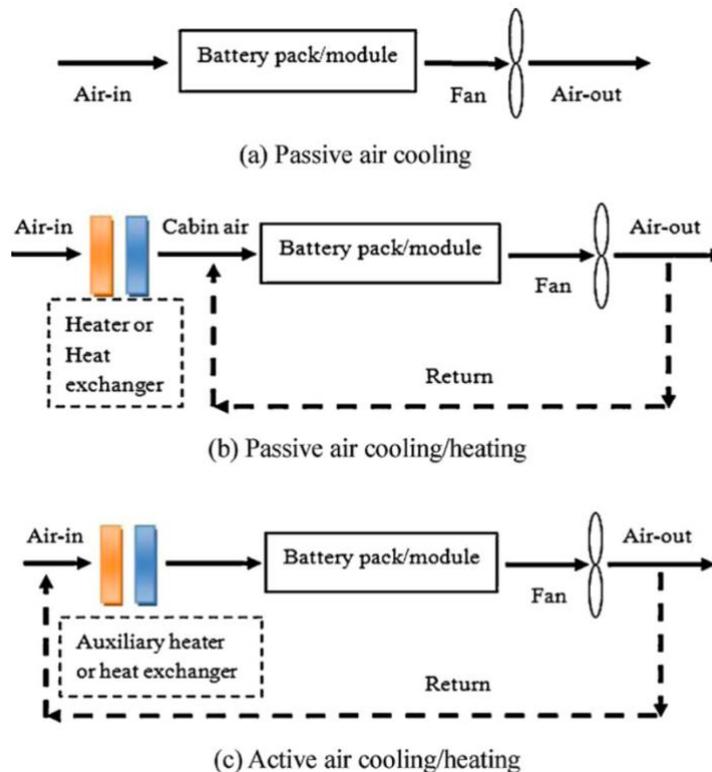


Ilustración 12. Posibles diseños del BTMS utilizando aire como fluido refrigerante. Fuente: [5]

Refrigeración por líquido

Principalmente existen tres diseños para este sistema: el primero consiste en utilizar una chaqueta, camisa o envoltorio alrededor de los módulos; el segundo, que solo puede ser utilizado con fluidos dieléctricos, consiste en sumergir los módulos en el fluido refrigerante, de forma que están en contacto directo; y el tercero consiste en colocar los módulos sobre placas que han sido enfriadas por el líquido refrigerante.

La principal desventaja de este sistema es la posibilidad de fuga de líquido que puede provocar un cortocircuito. Además, es un poco más complejo, más caro y pesado, sobre todo si es activo (incluye la bomba como elemento auxiliar). Por lo que respecta a su eficiencia, el líquido siempre proporciona mejores resultados debido a que el agua tiene una conductividad térmica y un calor específico mucho mayor que los del aire. Por otra parte, este sistema sí consigue mantener la uniformidad de la temperatura.

Como líquido refrigerante, es común utilizar agua (que puede contener aditivos de diversas clases tales como nanopartículas, los conocidos nanofluidos), glicol o aceite. A continuación, se detallan individualmente algunas de las propiedades más relevantes de estos fluidos.

Agua/glicol

El agua es un buen transmisor de calor gracias a su alta conductividad y calor específico, y además por su baja viscosidad, reduce al mínimo el trabajo de la bomba. No es posible utilizar un diseño de contacto directo con la batería por el peligro de cortocircuito. Normalmente se utiliza mezcla de agua con glicol para disminuir la temperatura de congelación por debajo de los 0 °C y evitar posibles daños a la batería por el cambio de fase a estado sólido que tendría lugar.

Aceite

El aceite, dado que es un fluido dieléctrico, se usa normalmente con el diseño de inmersión. Este fluido es más viscoso, por lo que consume más potencia de la bomba. El aceite presenta, por lo que respecta al agua, la ventaja de que puede usarse en contacto directo con la batería, y el inconveniente de tener un calor específico y una conductividad ligeramente menores.

Nanofluidos

Los nanofluidos son cualquier tipo de líquido (agua, aceite, glicol...) al que se añaden partículas sólidas de metal extremadamente pequeñas con el propósito de aumentar la conductividad térmica del fluido resultante, ya que la conductividad térmica del metal es mucho mayor que la del agua. Las investigaciones muestran que esta propiedad será mayor cuanto mayor sea la concentración de nanopartículas suspendidas en el fluido y cuanto menor sea el tamaño de dichas partículas. Entre las partículas metálicas más utilizadas para la producción de este fluido se encuentran Al, Cu, Ni, Ag, Al₂O₃, CuO, Fe₃O₄ y TiO₂. Este último compuesto es el que se ha considerado en las simulaciones con nanofluidos del presente TFG.

En la Ilustración 13 se encuentra una representación de los sistemas de refrigeración por líquido presentada en los estudios realizados por *Y. Deng et al [3]*. Se observa que, al igual que con los sistemas de refrigeración por aire, estos SGTB pueden clasificarse en pasivos (esquema a, el calor cedido al refrigerante es absorbido por el aire en un intercambiador y expulsado por el escape) o activos (esquemas b y c, utilizan un intercambiador líquido/líquido y una bomba adicional, son sistemas más complejos).

Refrigeración con PCM

Esta sustancia almacena el calor en forma de calor sensible (aumentando la temperatura) y calor latente (cambiando de fase). Para refrigerar los módulos, el PCM absorbe calor y se funde pasando de fase sólida a líquida. La peculiaridad de los PCM reside en que, cuando se trabaja en un rango de temperaturas alrededor de la temperatura de fusión del PCM, se puede conseguir absorber calor gracias al cambio de fase. Este sistema, además, consigue una distribución uniforme de la temperatura. Sin embargo, los inconvenientes que presenta el PCM son varios, siendo el más relevante de ellos la baja conductividad térmica.

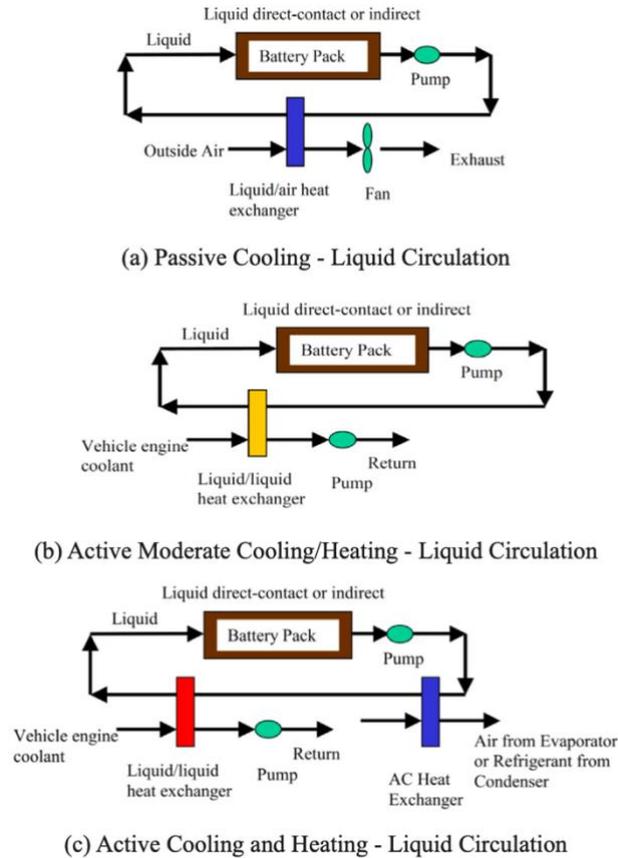


Ilustración 13. Representación esquemática de las variantes de BTMS de refrigeración por líquido. Fuente: [3]

Para intentar aglutinar las ventajas de los diferentes fluidos mencionados y cubrir las deficiencias de cada uno de ellos, se han llevado a cabo múltiples investigaciones con diferentes combinaciones como, por ejemplo, nanofluidos con PCM. En el presente trabajo se ha seleccionado un sistema de gestión térmica activo utilizando agua/glicol y nanofluidos como refrigerante.

3.3.3. Diseño del BTMS

La batería utilizada para los estudios está formada por un total de 144 celdas repartidas en 12 módulos tal y como se muestra en la figura izquierda de la Ilustración 14. A la derecha de esta imagen se observa como cada módulo, representado por un cuadro verde, se compone de 12 celdas.

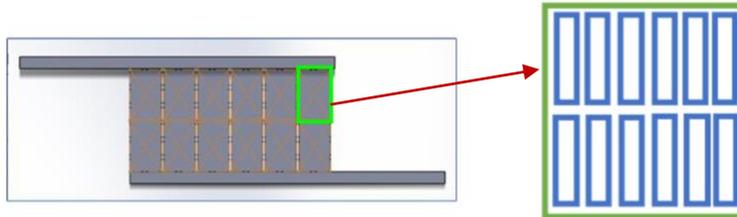


Ilustración 14. Distribución de módulos (izquierda) y de celdas (derecha) en el interior del paquete de baterías.

Cada módulo del sistema de refrigeración del paquete de baterías consta de varios canales cerrados por los que se distribuye el fluido refrigerante. En el presente trabajo se han considerado estudios de refrigeración por distintas caras de las celdas. En la Ilustración 15 es la base la que está en contacto con los canales.

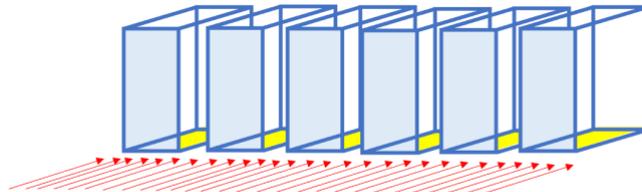


Ilustración 15. Canales del refrigerante por la base. Fuente: Elaboración propia

La otra situación estudiada ha sido la refrigeración por las caras laterales. En ese caso, representado en la Ilustración 16, el refrigerante fluye en el mismo sentido, pero el diseño se ha modificado de tal forma que sean dichas caras las que estén en contacto con los canales que transportan el fluido.

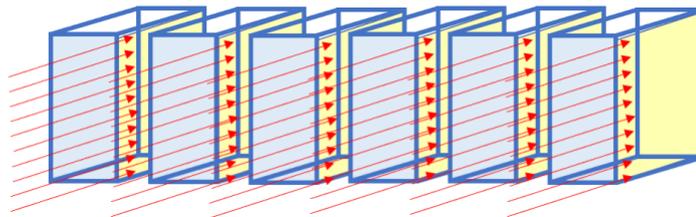


Ilustración 16. Canales del refrigerante por las caras laterales. Fuente: Elaboración propia

4. MODELADO DE LA BATERÍA

En este punto se explicará la calibración del modelo de batería disponible en el Centro de Motores Térmicos para la realización de los estudios. Dicho modelo está implementado en el software VISUAL STUDIO y se divide en tres partes diferenciadas: eléctrica, térmica y termohidráulica. Se expondrá la misión de cada una de ellas, los fundamentos teóricos y fórmulas necesarios para el entendimiento de cómo se ha llevado a cabo la adaptación del modelo y el resultado de las ampliaciones realizadas en el código del modelo.

Gracias a la participación del CMT en diversos proyectos relacionados con el transporte electrificado se dispone de una base de datos experimental y numérica que servirá para calibrar los modelos.

4.1. Submodelo eléctrico

En este apartado se procederá a explicar cómo se ha adaptado la parte eléctrica del modelo de la batería para la realización de los estudios que se presentan en el punto posterior.

Las celdas que componen la batería utilizada en el presente Trabajo Final de Grado poseen las características detalladas en la Tabla 1.

Datos	
FORMA	Prismática
Voltaje nominal OCV (V)	2.3
Capacidad (Ah)	23
Energía específica (Wh/kg)	96
Densidad energética (Wh/L)	202
Peso (kg)	0.55
Volumen (L)	0.26
Dimensiones (mm)	115x103x22

Tabla 1. Características principales de la celda. Fuente: Ficha técnica del fabricante.

En la actualidad, existen dos modelos consolidados que simulan el comportamiento eléctrico de una celda del paquete de baterías: son el modelo electroquímico y el modelo eléctrico equivalente.

- **Modelo electroquímico:** tal y como puede deducirse de su nombre, se basa en las ecuaciones capaces de representar los fenómenos que ocurren en las reacciones químicas que tienen lugar en el ánodo y el cátodo, el movimiento de los iones de litio, etc.
- **Modelo eléctrico equivalente:** se basa en asemejar el comportamiento eléctrico de la celda al que tendría un circuito eléctrico, llamado circuito eléctrico equivalente, formado por impedancias que varían según el modelo utilizado, cuyos componentes serán resistencias, condensadores y pilas de voltaje.

De estas dos posibilidades, esta última es la que en este trabajo se ha desarrollado e implementado. En la Ilustración 17 se representa el esquema correspondiente al circuito eléctrico equivalente que se consideró para el desarrollo del modelo.

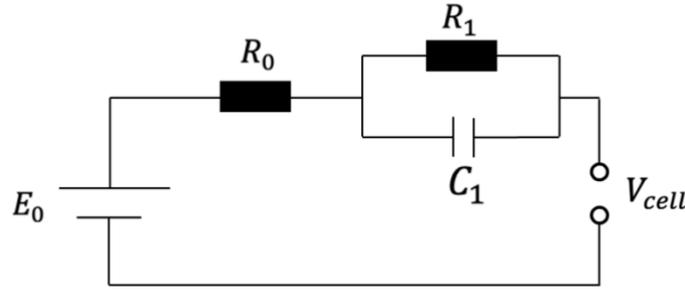


Ilustración 17. Circuito eléctrico equivalente de una celda. Fuente: Elaboración propia

El submodelo eléctrico se encarga de proporcionar el calor generado por la celda, calculado mediante la expresión (5), proveniente de la ecuación (3), con la salvedad de eliminar el término entrópico y tener en cuenta que las celdas están en serie. Dicha ecuación, explícita o implícitamente, necesita de la resolución previa del circuito equivalente y por tanto, necesita conocer el valor del voltaje en circuito abierto (OCV) y de las impedancias R_0 , R_1 y C_1 . Es por ello que se ha procedido a implementar las correlaciones de las impedancias propias de la celda objeto de estudio.

$$Q_{generado} = (E_0 * N_{series} - V_{batt}) * I_{batt} \quad (5)$$

Estas impedancias son dependientes del estado de carga (SOC) de la batería y de la temperatura, además de que su evolución difiere en los procesos de carga y descarga. El voltaje en circuito abierto, por el contrario, se calcula únicamente en función del SOC.

4.1.1. Ajuste de las impedancias R_0 , R_1 y C_1

La bibliografía del proyecto cuenta con datos experimentales de estas variables. Para su parametrización se ha utilizado la herramienta online WebPlotDigitalizer que, seleccionando el tipo de gráfico y dos puntos conocidos de ambos ejes, permite extraer tantos datos numéricos como se deseen de un gráfico o mapa con una alta precisión y trasladar esos datos con gran facilidad a una hoja de cálculo Excel para su posterior tratamiento.

Una vez realizado este paso, se ha recurrido al uso de la aplicación *CurveFitting*, del software MATLAB. Esta aplicación tiene múltiples utilidades, tales como el ajuste de curvas y superficies a los datos introducidos, el cálculo de interpolaciones y suavizados o el postprocesamiento de datos. Su utilización ha sido necesaria para ajustar las curvas de cada una de las impedancias a una superficie polinomial de tercer grado, cuya función matemática es la expresada por la ecuación (6). Se ha seleccionado esta superficie ya que un ajuste de tercer grado como el propuesto sí presenta grandes mejoras en comparación con uno de primer o segundo grado. Sin embargo, superficies de mayor grado no proporcionan ajustes de mayor bondad o el coste computacional excedería el pequeño beneficio obtenido en el ajuste.

$$\begin{aligned} Variable = & p_{00} + p_{10} * x + p_{01} * y + p_{20} * x^2 + p_{11} * x * y + \\ & p_{02} * y^2 + p_{30} * x^3 + p_{21} * x^2 * y + p_{12} * x * y^2 + p_{03} * y^3 \end{aligned} \quad (6)$$

Donde X representa el SOC en tanto por 1 e Y representa la temperatura de la batería en K.

Su interfaz de trabajo puede observarse en la Ilustración 18.

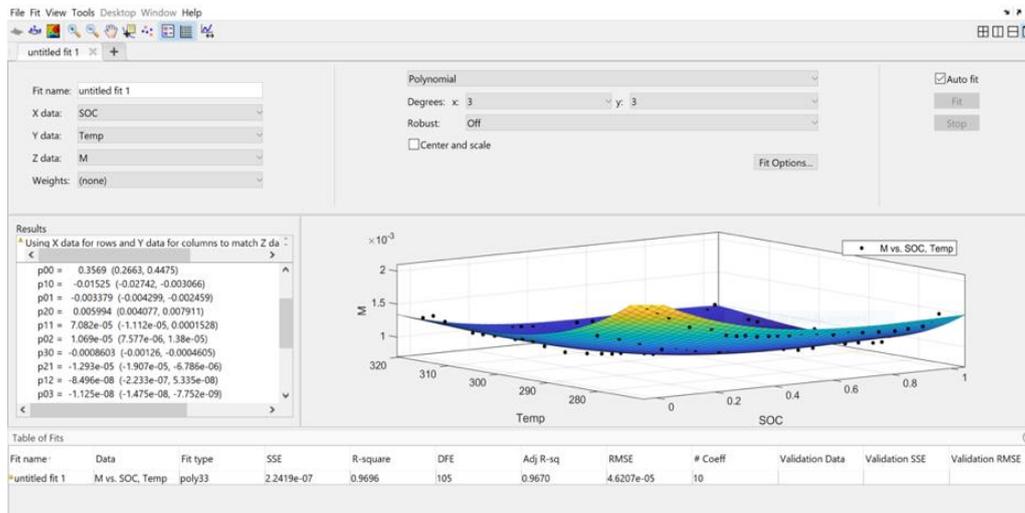


Ilustración 18. Interfaz de la aplicación CurveFitting de MATLAB. Fuente: Elaboración propia

La ventana *Results*, situada en la parte inferior e izquierda de la interfaz, muestra los coeficientes polinómicos obtenidos para el ajuste de la superficie, el intervalo de confianza de cada uno de ellos y el coeficiente de determinación R-cuadrado, que permite evaluar la bondad del ajuste. *CurveFitting* representa dicha superficie y los datos de entrada en el gráfico adyacente. En la Tabla 2 se encuentran los resultados obtenidos para los coeficientes del polinomio de cada una de las variables.

Variable	R ₀ , descarga	R ₀ , carga	R ₁ , descarga	R ₁ , carga	C ₁ , descarga	C ₁ , carga
p00	0.35663	0.36618	1.1554	-1.2285	-1.3163e+06	-4.154e+06
p10	-0.01525	-0.01938	0.1023	0.1197	8.345e+05	1.88e+05
p01	-0.003379	-0.003487	-0.01145	0.01275	1.349e+04	4.291e+04
p20	0.005994	0.008416	0.04946	-0.05233	1.157e+05	1.762e+05
p11	7.082e-05	9.063e-05	-0.0009005	-0.0006724	-6131	-1852
p02	1.069e-05	1.11e-05	3.821e-05	-4.384e-05	-45.5	-147.2
p30	-8.603e-04	-0.000913	-0.01388	0.001592	3.153e+04	4.729e+04
p21	1.293e-05	-2.082e-05	-6.968e-05	0.0002091	-637.9	-950
p12	-8.496e-08	-1.051e-07	1.668e-06	7.828e-07	11.66	4.777
p03	-1.125e-08	-1.177e-08	-4.277e-08	5.012e-08	0.05082	0.1681

Tabla 2. Valor de los coeficientes que definen el ajuste de las variables R₀, R₁ y C₁. Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Ajuste del voltaje en circuito abierto (OCV)

El voltaje en circuito abierto se calcula en el modelo mediante la ecuación (7).

$$E_0 = v_0 + \alpha_0 * (1 - e^{-\beta * SOC}) + \gamma * SOC + \zeta * \left(1 - e^{\frac{-\epsilon}{(1-SOC)}}\right) \quad (7)$$

En la ecuación aparecen seis coeficientes cuyo valor se ha ajustado hasta que los datos teóricos calculados mediante la fórmula expresada han conseguido replicar los datos experimentales de referencia, representada por la línea naranja en la Ilustración 19. La evolución del voltaje en circuito abierto queda representada por la línea azul de la Ilustración 19 y el valor final de los parámetros puede consultarse en la Tabla 3.

Parámetros	
v_0	2.02
α_0	0.55222025
β	1
γ	0.047702409
ζ	0.15989652
ϵ	0.0098106041

Tabla 3. Valor de los parámetros que definen el comportamiento de la variable E_0 . Fuente: Elaboración propia

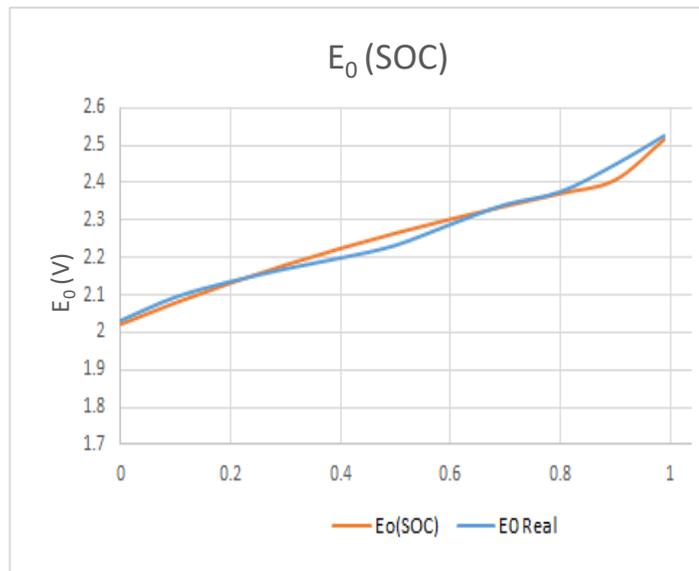


Ilustración 19. Evolución del voltaje en circuito abierto (OCV) en función del SOC. Fuente: Elaboración propia

4.2. Submodelo térmico

4.2.1. Fundamentos teóricos

El submodelo térmico que se implementa es un modelo nodal, el cual se fundamenta en la división de un objeto (en este caso, una celda del paquete de baterías) en múltiples nodos de los que se conocen características térmicas, físicas y geométricas.

El modelo nodal se basa en la analogía eléctrica, consistente en considerar las temperaturas como voltajes y el calor como la corriente.

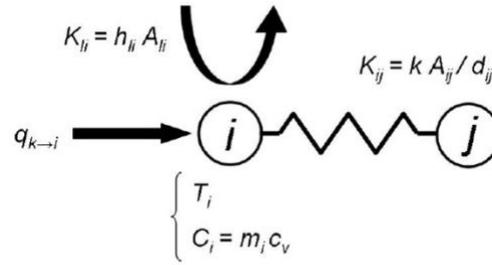


Ilustración 20. Transmisión de calor en los nodos.
Analogía eléctrica. Fuente: Centro de Motores Térmicos

Reordenando los términos de la ecuación genérica del balance térmico para todos los nodos (8) se obtiene la ecuación matricial (9), con la que se resuelve el modelo nodal. El tamaño de estos vectores y matrices cuadradas viene dado por el número de nodos del sistema.

$$[K][T^t] - [C][T^t] = [T^{bc}] - [C][T^{t-\Delta t}] \quad (8)$$

$$[T^t] = ([K] - [C])^{-1} ([T^{bc}] - [C][T^{t-\Delta t}]) \quad (9)$$

$[T^t]$ es el vector que recoge la solución de distribución de temperaturas de los nodos

$[K]$ es la matriz de conductancias cuyos coeficientes expresan la transmisión de calor entre los respectivos nodos.

$[C]$ es la matriz de capacitancias, que representa la capacidad de almacenamiento de energía térmica que posee cada nodo.

$[T^{bc}]$ es el vector de condiciones de contorno.

$[T^{t-\Delta t}]$ es el vector de temperaturas del tiempo anterior.

Es sabido que existen tres modos de transmisión de calor: conducción, convección y radiación. Aplicado al contexto de la celda, los nodos pueden intercambiar calor por convección con el fluido refrigerante, por radiación o por conducción con otros nodos. En los estudios realizados se ha considerado despreciable el intercambio de calor por radiación debido al rango de temperatura de trabajo de las celdas.

Debido a que en este trabajo se estudió un sistema de gestión térmica activo utilizando como fluido refrigerante agua, glicol y nanopartículas es importante entender los fenómenos de

transmisión de calor por convección, lo que facilitará la comprensión de las ecuaciones y correlaciones que se describirán posteriormente.

La convección se define como la transferencia de calor generada por el movimiento de un fluido que provoca un transporte de energía, generalmente, entre un sólido y las partículas de fluido en movimiento a su alrededor. Está regida por la ley de enfriamiento de Newton (9), la cual permite unir todos los conceptos que rigen la transmisión de calor por convección en un parámetro llamado coeficiente de película, h , cuyas unidades son $W/(m^2K)$. Los otros términos de la ecuación (10) son el calor transmitido por unidad de tiempo, \dot{Q} , medido en W; el área del objeto en cuestión, A , medida en m^2 ; y la diferencia de temperatura de las paredes del cuerpo, T_{pared} , con el fluido en contacto con este, T_{fluido} , cuya unidad en el Sistema Internacional son los grados Kelvin.

$$\dot{Q} = hA(T_{pared} - T_{fluido}) \quad (10)$$

Existen dos tipos de transmisión de calor por convección atendiendo a la causa del movimiento del fluido:

- **Convección natural** (libre): el movimiento del fluido se origina de forma natural debido a las fuerzas provocadas por variaciones de la densidad y la temperatura de este, que inducen el flujo de calor entre el sólido y el fluido en cuestión.
- **Convección forzada**: el movimiento del fluido es provocado por una fuente externa, como pueden ser un ventilador o una bomba.

Con el objetivo de determinar ese coeficiente de convección o de película, existen diferentes correlaciones semiempíricas para el cálculo del número de Nusselt que se pueden clasificar atendiendo a diferentes particularidades del flujo: interno o externo, laminar o turbulento, desarrollado o no desarrollado. Para poder comprender las ecuaciones posteriores correctamente se deben definir algunos términos teóricos y parámetros adimensionales relevantes.

Número de Reynolds: número adimensional que representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad. Su utilidad reside en determinar si se trata de un flujo laminar (número de Reynolds bajo) o turbulento (número de Reynolds elevado). El número de Reynolds viene dado por la ecuación (11), donde ρ representa la densidad en kg/m^3 ; u es la velocidad en m/s ; L se refiere a la longitud característica o diámetro hidráulico, en m ; y μ es la viscosidad dinámica del fluido, en $Pa \cdot s$.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (11)$$

Número de Prandtl: parámetro adimensional que relaciona la transmisión de cantidad de movimiento y la transmisión de calor a través de la difusividad o del espesor de las capas límite. El número de Prandtl se calcula por medio de la ecuación (12), en la que μ representa la viscosidad dinámica; C_p el calor específico a presión constante en $J/(kgK)$; y k la conductividad térmica en $W/(mK)$.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (12)$$

Número de Nusselt: cociente adimensional entre el calor transmitido por convección y el calor por conducción. Viene dado por la ecuación (13) donde h es el coeficiente de película, L la longitud característica y k la conductividad térmica.

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (13)$$

Flujo laminar: se dice del flujo ordenado, en el que las líneas de corriente son paralelas entre sí. La Ilustración 21 es de gran utilidad para visualizar este concepto.

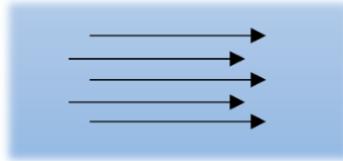


Ilustración 21. Flujo laminar.
Fuente: Elaboración propia

Flujo turbulento: se dice del flujo caracterizado por una mayor agitación y con una trayectoria irregular que no se puede predecir. Se muestra un esquema representativo en la Ilustración 22.

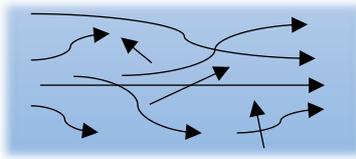


Ilustración 22. Flujo turbulento. Fuente:
Elaboración propia

Flujo desarrollado y no desarrollado: cuando el flujo alcanza un perfil de velocidad regular, se dice que el flujo es desarrollado.

De acuerdo al sistema de gestión térmica planteado, se ha considerado flujo interno y convección forzada. A continuación se nombran las correlaciones más comunes para el caso de un flujo con estas características.

Para flujo laminar desarrollado se proponen las ecuaciones (14) y (15).

$$Nu = 3.66 \text{ para } T \text{ cte} \quad (14) \quad Nu = 4.36 \text{ para } \dot{q} \text{ cte} \quad (15)$$

Si el flujo por el contrario es no desarrollado, una posibilidad es la ecuación (16).

$$Nu = 1.86 \left[\left(\frac{D}{L} \right) RePr \right]^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (16)$$

En el caso de flujo turbulento desarrollado, ambas ecuaciones (17) y (18) son de uso generalizado.

$$\text{Correlación de Dittus-Bolter} \quad Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n \quad (17)$$

$$\text{Correlación de Sieder-Tate} \quad Nu = 0.027Re^{0.8}Pr^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \quad (18)$$

Para el caso de flujo turbulento no desarrollado se utiliza la ecuación (19).

$$Nu = 0.036Re^{0.8}Pr^{0.33} \left(\frac{D}{L}\right)^{0.055} \quad (19)$$

4.2.2. Aplicación al modelo

El modelo de batería disponible ha sido modificado de tal forma que el sistema esté compuesto por los 12 nodos enumerados a continuación, 9 de ellos situados en la celda en las posiciones marcadas en la Ilustración 23. Los 3 nodos restantes son externos a la celda y corresponden con los fluidos aire y refrigerante. Asimismo, los nodos 0 y 11 son condiciones de contorno e impuestos externamente.

- Nodo 0: Aire (Air)
- Nodo 1: Polo negativo (Negative Tab)
- Nodo 2: Polo Positivo (Positive Tab)
- Nodo 3: Base inferior (Base)
- Nodo 4: Cara trasera (Back side)
- Nodo 5: Zona Activa (Active Zone)
- Nodo 6: Cara frontal (Front Side)
- Nodo 7: Cara izquierda (Left Side)
- Nodo 8: Cara derecha (Right Side)
- Nodo 9: Base superior (Upper Side)
- Nodo 10: Refrigerante a la entrada
- Nodo 11: Refrigerante a la salida

El objetivo del submodelo térmico es hallar la distribución de temperaturas de cada uno de los nodos para cada instante de tiempo durante el proceso de carga o descarga de la batería. Para ello es necesario conocer todos los términos que forman parte de la ecuación matricial.

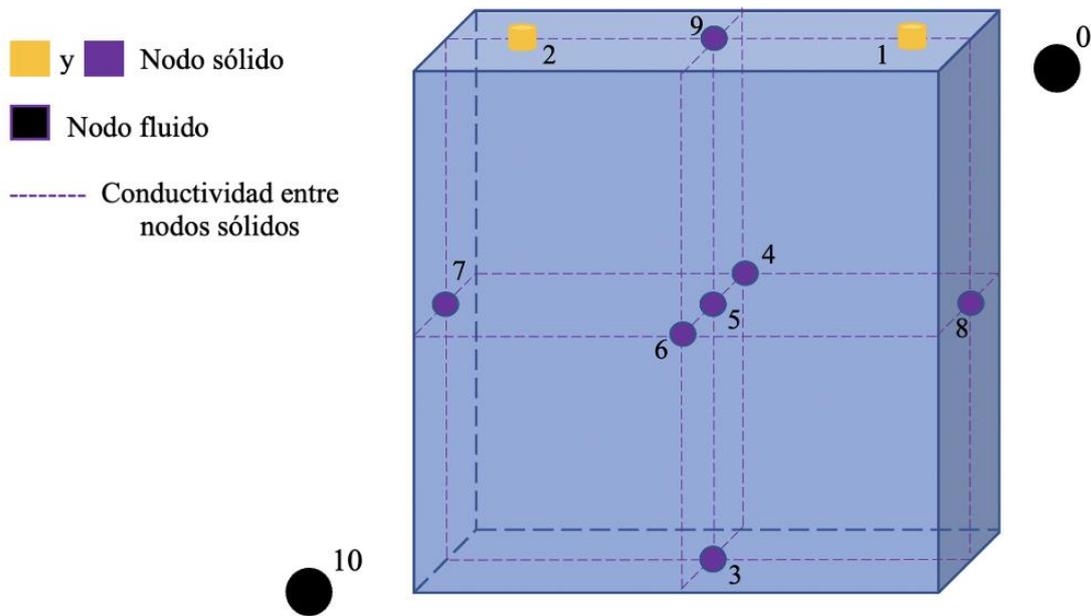


Ilustración 23. Modelo de una celda prismática. Fuente: Elaboración propia

Respecto a la matriz de conductancias $[K]$, será necesario calcular los coeficientes de la matriz de los nodos que interaccionan con el refrigerante. Existen dos fórmulas para calcular estos coeficientes. En concreto, la ecuación utilizada para el cálculo de la conductancia entre el nodo sólido de la base y los de los laterales con el refrigerante es la ecuación (20), en la que h es el coeficiente de convección y A es la superficie de la celda en contacto con el fluido. Por otro lado, siguiendo la ecuación (21), la capacitancia vendría dada por el flujo volumétrico \dot{V} , la densidad ρ y el calor específico c_p .

$$K_{ij} = hA \quad (20)$$

$$C_{ij} = \dot{V}\rho c_p \quad (21)$$

Respecto a la matriz de capacitancias $[C]$, en el modelo considerado únicamente el nodo central de la celda (nodo 5) y el nodo que representa el refrigerante a la salida de la celda (nodo 11) poseen dicha capacidad de almacenamiento de energía, que se calcula de acuerdo con la ecuación (20).

En el vector $[T^{bc}]$ se especifica el valor inicial de la temperatura ambiente y la del refrigerante, correspondientes al nodo 0 y 11 respectivamente, así como el calor generado.

En la ecuación (20) aparece el coeficiente de convección h , cuyo valor se obtendrá a partir del número de Nusselt, calculado mediante una de las ecuaciones (14) a (19). El coeficiente de película depende de las propiedades térmicas del fluido refrigerante utilizado. En los estudios realizados se han tenido en cuenta dos posibilidades: agua con etilenglicol y nanofluidos.

Modelado de sistemas de gestión térmica en baterías para vehículos híbridos mediante el uso de nanofluidos

Las gráficas que conforman la Ilustración 24 representan la densidad, el calor específico y la conductividad térmica de la disolución de agua y etilenglicol en función de la temperatura y del porcentaje de glicol diluido en la mezcla.

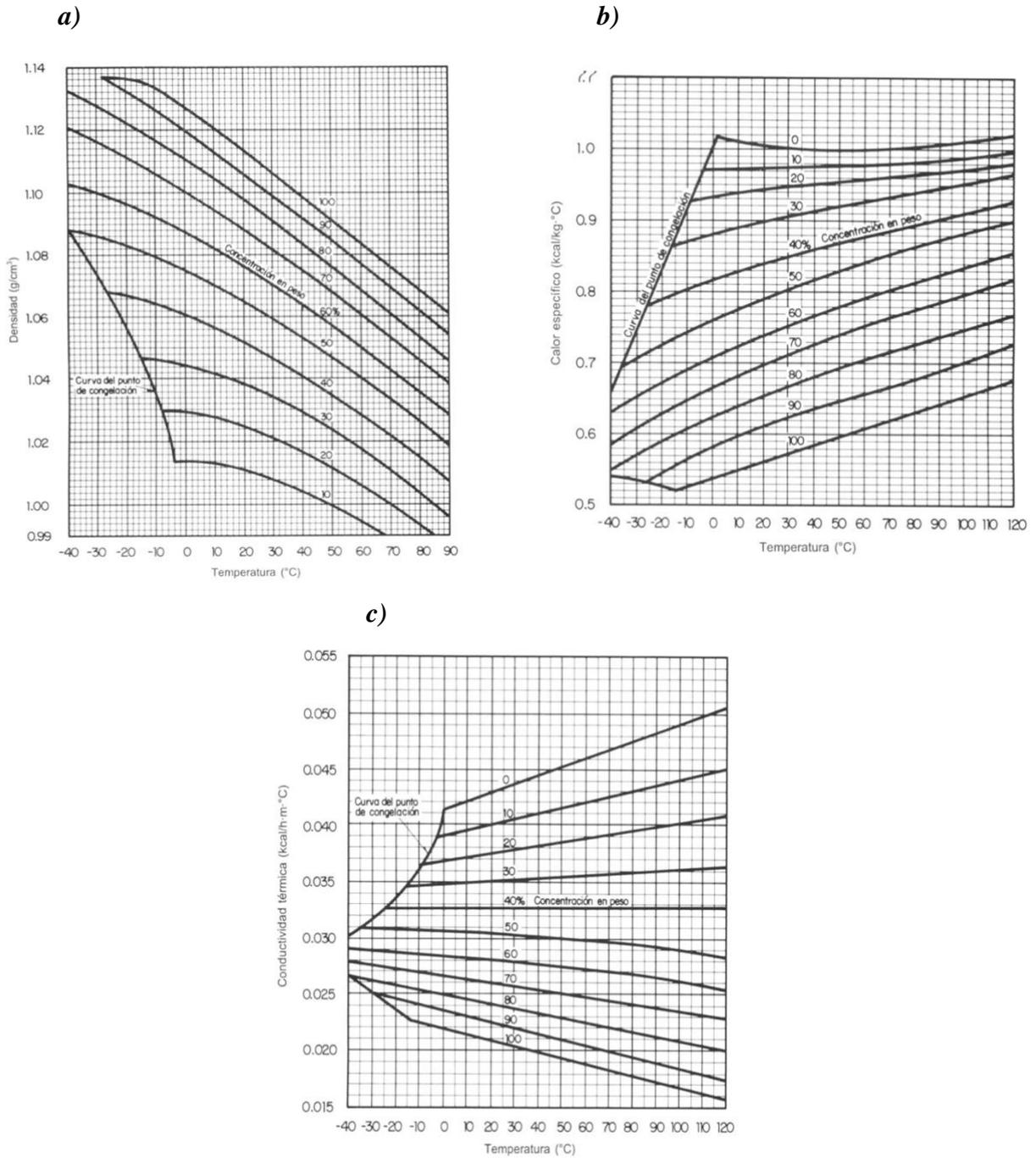


Ilustración 24. Propiedades de la mezcla agua-etilenglicol en función de la temperatura y del porcentaje de concentración. a) Densidad. b) Calor específico. c) Conductividad térmica. Fuente: UPV

Para los nanofluidos se ha considerado el uso de agua con una concentración de hasta el 5% de nanopartículas de TiO₂. En la tabla 4 se detallan las propiedades térmicas de este compuesto y las del agua, ya que a partir de ellas se obtendrán las propiedades de la mezcla por medio de las fórmulas siguientes [6].

Densidad: se calcula con la ecuación (22) estudiada por *Yu et al* [7]. En ella, ϕ representa la proporción de nanopartículas en el fluido, ρ_b es la densidad del fluido base y ρ_p representa la densidad de la nanopartícula, en este caso TiO₂.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_b + \phi\rho_p \quad (22)$$

Calor específico: se calcula utilizando la regla de las mezclas (23). Además de los parámetros descritos en la anterior ecuación, aparecen también el calor específico del fluido base c_b y el de la nanopartícula c_p . El denominador puede escribirse directamente como ρ_{nf} , sustituyendo la ecuación (22).

$$c_{nf} = \frac{(1 - \phi)\rho_b c_b + \phi\rho_p c_p}{(1 - \phi)\rho_b + \phi\rho_p} \quad (23)$$

Conductividad térmica: se utiliza la correlación (24) de *Yu Choi et al* [8]. La conductividad del fluido resultante es función de la conductividad del fluido base k_b y la conductividad de las nanopartículas k_p , además de la proporción ϕ y del ratio del espesor de la capa de nanofluido y el radio de la nanopartícula, representado por el parámetro adimensional β .

$$k_{nf} = \frac{k_{pe} + 2k_b + 2(k_{pe} - k_b)(1 + \beta)^3 \phi}{k_{pe} + 2k_b - (k_{pe} - k_b)(1 + \beta)^3 \phi} k_b \quad (24)$$

Donde la conductividad de las nanopartículas equivalentes k_{pe} se calcula como:

$$k_{pe} = \frac{[2(1 - \gamma) + (1 + \beta)^3(1 + 2\gamma)]\gamma}{-(1 - \gamma) + (1 + \beta)^3(1 + 2\gamma)} k_p \quad (25)$$

Viscosidad: se utiliza una expresión en función de la viscosidad del fluido base μ_b y la concentración de nanopartículas ϕ .

$$\mu_{nf} = \mu_b(1 + 2.5\phi) \quad (26)$$

Asimismo, la Tabla 4 especifica los valores de los parámetros que aparecen en las ecuaciones.

Propiedades y valor de los parámetros	
ρ_{H_2O} (kg/m ³)	1000
c_{H_2O} (J/kgK)	4180
k_{H_2O} (W/mK)	0.53363643
μ_{H_2O} (kg/ms)	0.000891
ρ_{TiO_2} (kg/m ³)	4200
c_{TiO_2} (J/kgK)	520
k_{TiO_2} (W/mK)	4.25039456
γ (-)	0.02436696
β (-)	0.1
k_p	21.9

Tabla 4. Propiedades térmicas y valor de los parámetros supuestos en el modelo. Fuente: Elaboración propia

El trabajo de la bomba también se ve afectado por el uso de nanopartículas. Se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$\dot{W}_b = \Delta P \dot{V} \quad (27)$$

Donde la caída de presión se calcula como:

$$\Delta P = f \frac{\rho u^2}{2D} L \quad (28)$$

Y donde el coeficiente de fricción f se calcula como:

$$f = \begin{cases} 0.316 Re^{-1/4} & \text{si } Re \leq 2 \times 10^4 \\ 0.184 Re^{-1/4} & \text{si } Re > 2 \times 10^4 \end{cases} \quad (29)$$

4.3. Submodelo termohidráulico

En este punto se explicará el funcionamiento del software Virtual Engine Model (VEMOD), se describirá el diseño del circuito de refrigeración de la batería y se detallarán las hipótesis asumidas.

Funcionamiento de VEMOD

El software VEMOD permite modelar el sistema de gestión térmica de la batería gracias a su código termohidráulico abierto. Para conseguir dicha implementación, dos pestañas son necesarias: en la pestaña *BatteryTMS* se define la configuración del circuito hidráulico y en la pestaña *ControlCircuit* se define el control de este.

Esta última presenta los elementos que figuran en la Ilustración 25.

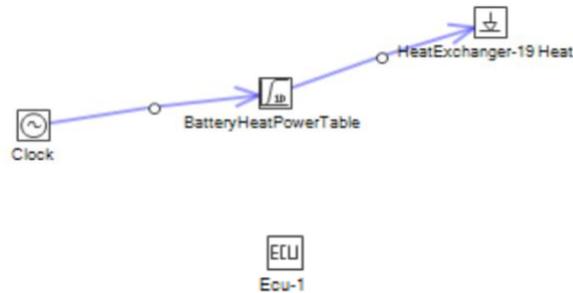


Ilustración 25. Pestaña ControlCircuit del software VEMOD. Fuente: Elaboración propia

El elemento central, *BatteryHeatPowerTable* es de una especial importancia para el usuario, ya que en su ventana de opciones, mostrada en la Ilustración 26, se especifican los datos de entrada para la simulación y el nombre de dichas variables. Aplicado al contexto de este trabajo, este elemento permite introducir la tabla de calor liberado por la batería, cuyo valor ha sido calculado previamente por medio de los submodelos descritos en los apartados anteriores.

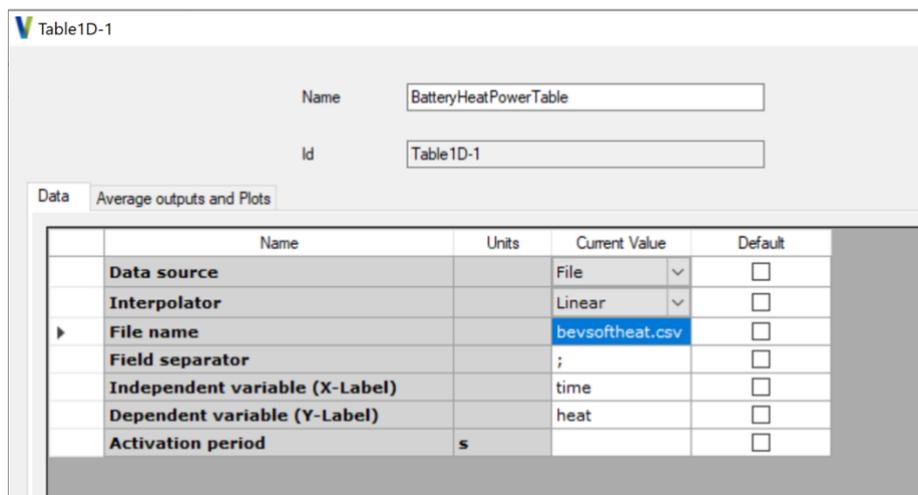
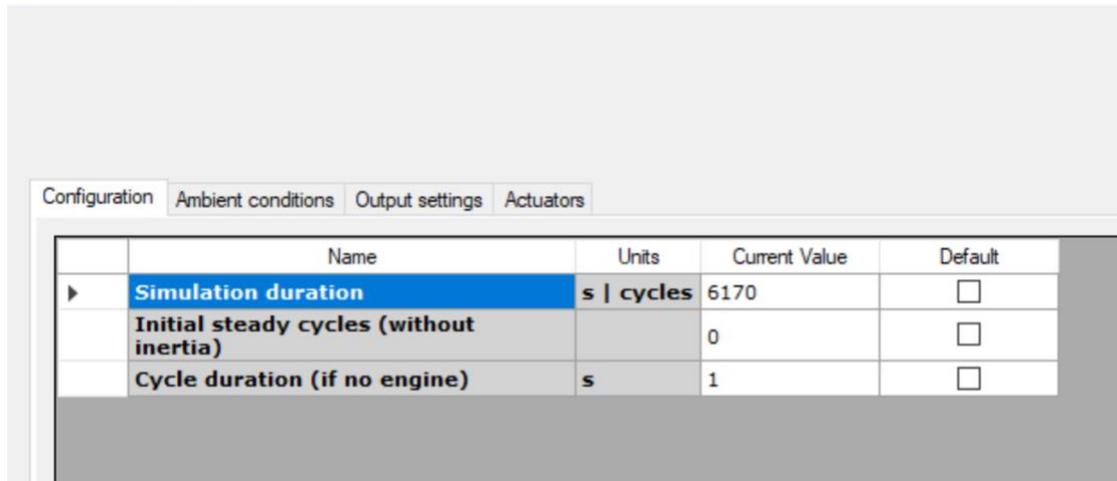


Ilustración 26. Ventana de opciones del elemento *BatteryHeatPowerTable*. Fuente: Elaboración propia

En la casilla de File Name se especifica el nombre del fichero de datos de entrada. Para los ciclos RDE simulados, los datos de entrada del software VEMOD han sido el tiempo de duración del ciclo y el calor cedido al refrigerante para cada instante de tiempo.

Este tiempo de simulación, así como el intervalo de tiempo entre ciclos, deben especificarse en la pestaña *General Settings* (Ilustración 27), disponible en la barra superior. Se indican en las casillas *Simulation Duration* y *Cycle duration* respectivamente.

General Settings



Name	Units	Current Value	Default
Simulation duration	s cycles	6170	<input type="checkbox"/>
Initial steady cycles (without inertia)		0	<input type="checkbox"/>
Cycle duration (if no engine)	s	1	<input type="checkbox"/>

Ilustración 27. Opciones de la pestaña General Settings. Fuente: Elaboración propia

Por lo que respecta a la pestaña *BatteryTMS*, en ella se encuentra representado el sistema de refrigeración de la batería. Su esquema se puede observar en la Ilustración 28.

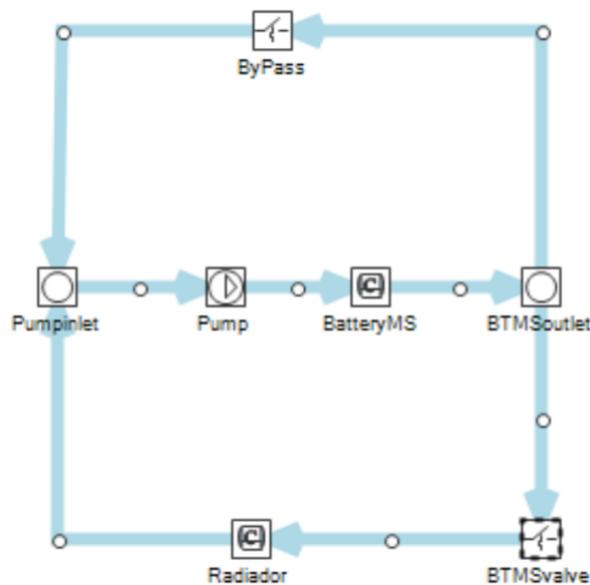


Ilustración 28. Esquema del circuito de refrigeración de la batería, modelado en VEMOD. Fuente: Centro de Motores Térmicos (CMT)

Cada elemento del sistema ha sido adaptado a las condiciones de simulación del estudio. Antes de indicar las modificaciones realizadas se explicará el funcionamiento del circuito y la manera de modificar los parámetros de los diferentes elementos.

El paquete de baterías se representa en el software VEMOD como un intercambiador de calor. Es el elemento con nombre *BatteryMS*. El flujo de refrigerante circula continuamente por la malla superior, pasando por la válvula *ByPass*, siempre abierta, y siendo impulsado por la bomba para volver a la batería. En cada uno de estos ciclos el refrigerante aumenta su temperatura.

Puede ocurrir que su temperatura sobrepase el límite deseado. En ese caso, la malla inferior del circuito entra en funcionamiento: la válvula *BTMSValve*, hasta ahora cerrada, empieza a dejar pasar el caudal de refrigerante para que este pueda enfriarse en el *Radiador*, un intercambiador de calor con el exterior.

La temperatura del refrigerante que marca el comienzo de apertura de esta válvula es un valor fijado por el usuario en la casilla *Opening Curve: closing temperature*, que se puede ver en la Ilustración 29. Esta válvula modifica su grado de apertura en función de la temperatura del refrigerante hasta alcanzar la apertura máxima para la temperatura que el usuario especifica en la casilla *Opening curve: wide-opening temperature*.

Cabe mencionar que la temperatura del refrigerante se mide con un sensor posicionado a la salida del paquete de baterías.

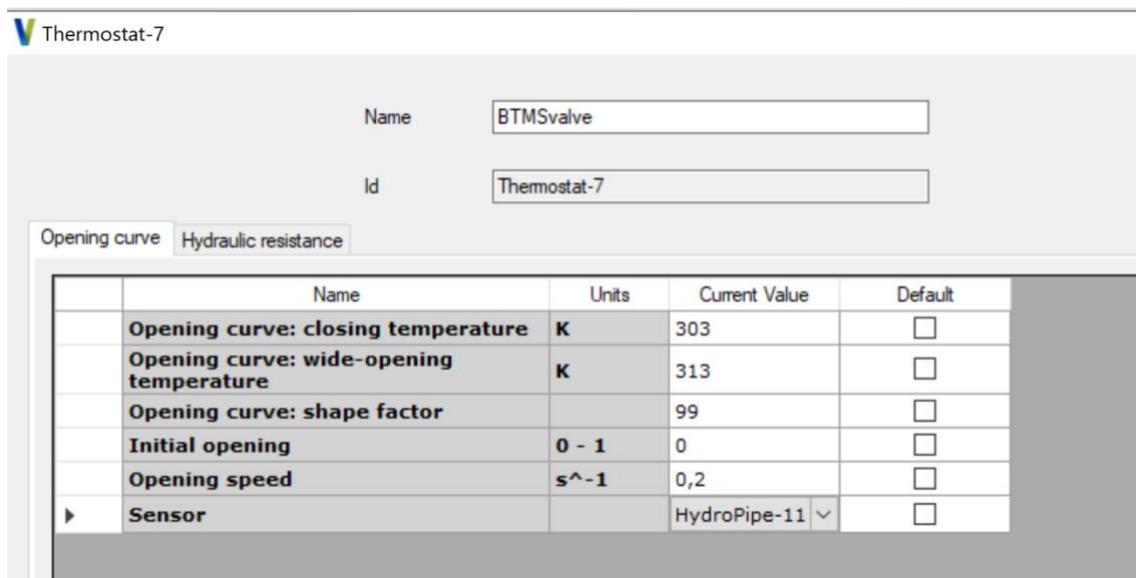


Ilustración 29. Ventana de opciones del elemento *BTMSValve*. Fuente: Elaboración propia

La función de la bomba es impulsar el flujo de refrigerante a través del paquete de baterías. El caudal que trasiega se ajusta indirectamente por medio de las revoluciones de giro de la bomba, indicadas en la casilla *Speed* de su ventana de opciones, mostrada en la Ilustración 30.

TurboPump-3

Name	Units	Current Value	Default
Pump speed / Engine speed		1,1	<input type="checkbox"/>
Internal volume	m ³	0,001	<input type="checkbox"/>
Speed	rpm	1570	<input type="checkbox"/>

Ilustración 30. Ventana de opciones del elemento Pump. Fuente: Elaboración propia

Las tuberías que conectan unos elementos con otros se caracterizan por su longitud, su coeficiente de fricción y su diámetro, que pueden especificarse tal y como muestra la Ilustración 31.

HydroPipe-113

Name	Units	Current Value	Default
Length	m	1	<input type="checkbox"/>
Internal diameter	m	0,02	<input type="checkbox"/>
Friction coefficient		0,002	<input type="checkbox"/>

Ilustración 31. Ventana de opciones del elemento tubería. Fuente: Elaboración propia

El fichero de VEMOD utilizado está programado para ofrecer la posibilidad de utilizar los siguientes fluidos como refrigerantes: aire, aceite, agua y *coolant*, siendo este último agua con el porcentaje de glicol que se especifique. El fluido a utilizar en los cálculos se selecciona en la pestaña que muestra la Ilustración 32.

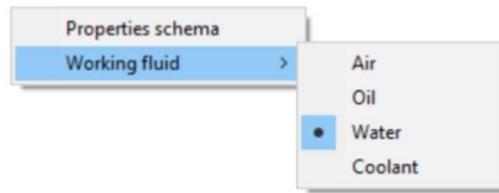


Ilustración 32. Tipos de fluido refrigerante que permite utilizar Vemod. Fuente: Elaboración propia

Algunas de las hipótesis asumidas para la caracterización de los elementos del circuito se explican a continuación.

El coeficiente de pérdidas del intercambiador de calor que representa la batería, especificado en la ventana de *Hydraulic Properties* de este elemento (Ilustración 33), tiene un valor estimado de $300000 \text{ mcf s}^2/\text{m}^6$.

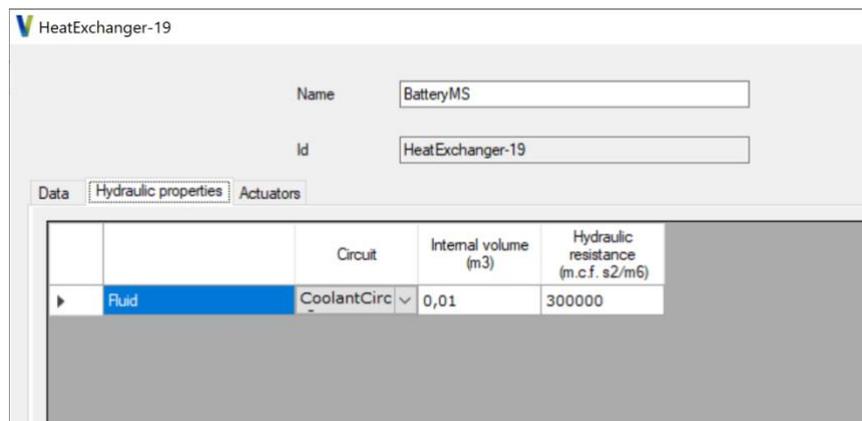


Ilustración 33. Ventana *Hydraulic Properties* del elemento *BatteryTMS*. Fuente: Elaboración propia

Este número resulta de calcular el promedio del coeficiente de pérdidas para 3 caudales diferentes, obtenidos mediante el uso de herramientas de cálculo computacional de fluidos (CFD) cuyos resultados se pueden visualizar en el gráfico de la Ilustración 34.

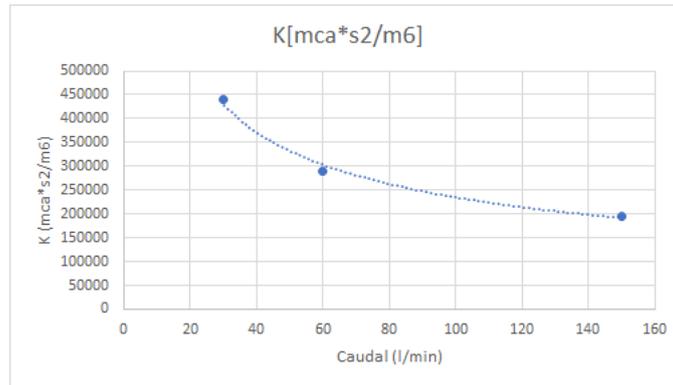


Ilustración 34. Resultados del estudio de pérdidas hidráulicas de la batería. Fuente: Centro de Motores Térmicos

Por último, solo queda explicar la metodología que se ha seguido para la simulación de los ciclos RDE, representada en el esquema de la Ilustración 35. A continuación, se muestra un esquema que representa dicha metodología especificando las variables de entrada requeridas por cada uno de los submodelos (rectángulos verdes) y las variables de salida de interés para el proceso iterativo, que consiste en lo siguiente. En primer lugar, el submodelo eléctrico calcula el calor generado por la celda tomando como dato de entrada la potencia requerida por la batería durante el ciclo RDE. Posteriormente, el submodelo térmico calcula la distribución de temperaturas y el intercambio de calor entre los diferentes nodos. Finalmente, el calor cedido al refrigerante se usa como dato de entrada para calcular el caudal y la temperatura del fluido, necesarios para llevar a cabo la nueva iteración. Este proceso se repite hasta conseguir la convergencia.

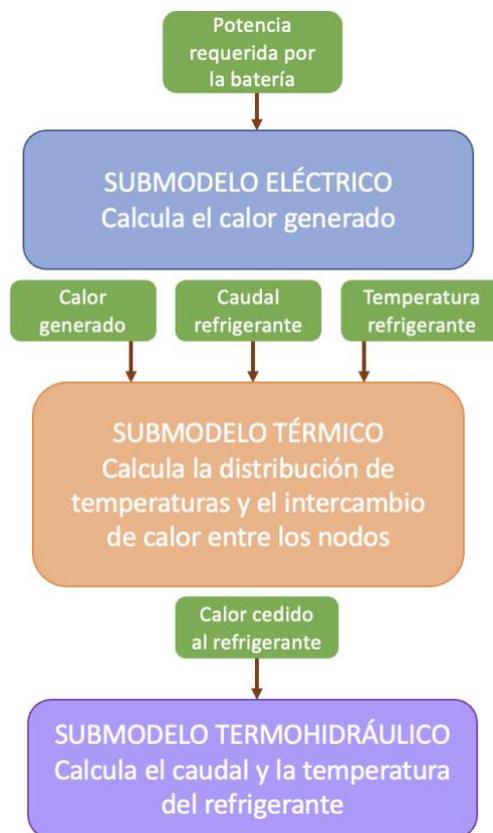


Ilustración 35. Representación esquemática del proceso de cálculo del modelo de batería. Fuente: Elaboración propia

El modelo programado genera dos ficheros, el de Resultados Globales y el de Evolución de temperaturas, que recogen los distintos datos de salida del modelo. Estos datos se especifican en la Tabla 5.

SUBMODELO ELÉCTRICO	Calor generado
	Estado de carga (SOC)
	Potencia suministrada
	Voltaje de la celda
	Parámetros R_0 , R_1 y C_1
SUBMODELO TÉRMICO	Números de Reynolds, Prandtl y Nusselt
	Coefficiente de película
	Conductancia entre nodos sólidos y refrigerante
	Propiedades térmicas del nanofluido
	Distribución de temperaturas de los nodos
	Trabajo de la bomba
SUBMODELO TERMOHIDRÁULICO	Caídas de presión
	Flujos de calor
	Caudal trasegado por la bomba
	Grado de apertura de las válvulas
	Temperaturas del refrigerante a la salida del pack de baterías y en otros puntos del circuito

Tabla 5. Salidas de los submodelos eléctrico, térmico y termohidráulico. Fuente: Elaboración propia

5. RESULTADOS

En este apartado se mostrarán los resultados de mayor relevancia extraídos de los diversos estudios que se han realizado. Dichos estudios han servido para valorar el impacto que provoca la modificación de diferentes variables, tales como el caudal, el porcentaje de nanopartículas o las temperaturas cuyo valor es condición de contorno, en las temperaturas de los nodos y el intercambio de calor de estos con el entorno. A continuación se definen de forma explícita las diferentes posibilidades que se han considerado para la realización de los estudios.

- Respecto al caudal se han tenido en cuenta tres posibilidades distintas: 0'5 l/s, 1 l/s y 2'5 l/s.
- Para la temperatura del refrigerante se ha estudiado el impacto de dos temperaturas diferentes, 283 K o 293 K.

- Por lo que respecta a la interacción con el ambiente, se ha comparado un sistema adiabático con un sistema no aislado del entorno con temperaturas ambiente de 278 K, asemejado a un clima frío; 293 K, correspondiente a una temperatura estándar; o 308 K, simulando un clima caluroso.
- Respecto al uso de nanofluidos se han considerado concentraciones de partículas en el fluido refrigerante de 2% y 5%, y se han realizado simulaciones para una concentración nula de nanopartículas para que sirvan como referencia.
- En relación con las caras de la celda que interaccionan con el refrigerante, se ha comparado el caso de refrigeración por la base con el caso de refrigeración por las caras laterales.

Estos estudios se han realizado a 3 ratios de descarga constantes distintos: 1C, 3C y 6C, correspondientes a capacidades de 23Ah, 69 Ah y 138 Ah respectivamente.

A continuación, se muestra la evolución que siguen los parámetros eléctricos a lo largo del proceso de descarga. Únicamente se mostrarán los resultados obtenidos para las condiciones que se describen posteriormente, ya que su tendencia es muy similar en el resto de los estudios.

- Caudal 0'5 l/s constante.
- Temperatura del refrigerante 293 K constante.
- Temperatura ambiente 293 K constante.
- Porcentaje de nanopartículas en el fluido refrigerante: 0% constante.
- Refrigeración por la base de las celdas.

En la Ilustración 36 se representan el voltaje de la celda y el voltaje en circuito abierto. Su evolución es lógica para el proceso de descarga de la batería, ya que su valor es siempre descendente, y concuerda con lo visto en el gráfico de la Ilustración 19.

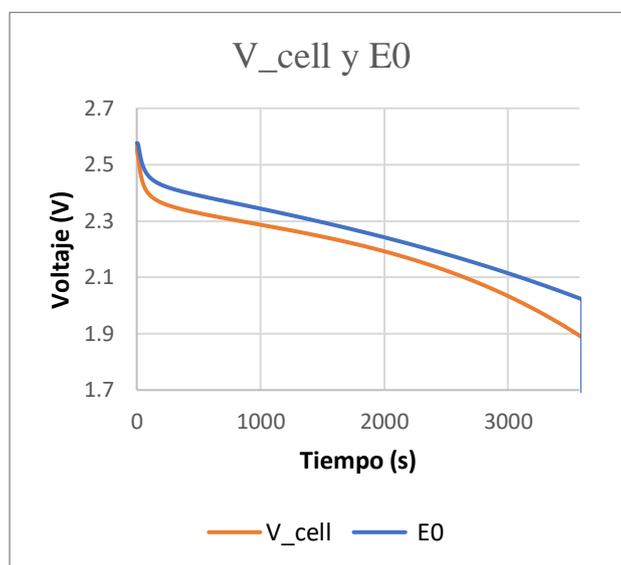


Ilustración 36. Voltaje de la celda y voltaje en circuito abierto.
Fuente: Elaboración propia

El estado de carga (SOC) se puede visualizar en el siguiente gráfico: se representa en tanto por 1, y su gráfica es siempre una recta de pendiente negativa de valor igual a la inversa del tiempo de descarga de la batería. En la Ilustración 37 se presenta a la izquierda la evolución del SOC y a la derecha la intensidad de la celda que corresponde a cada ratio de descarga.

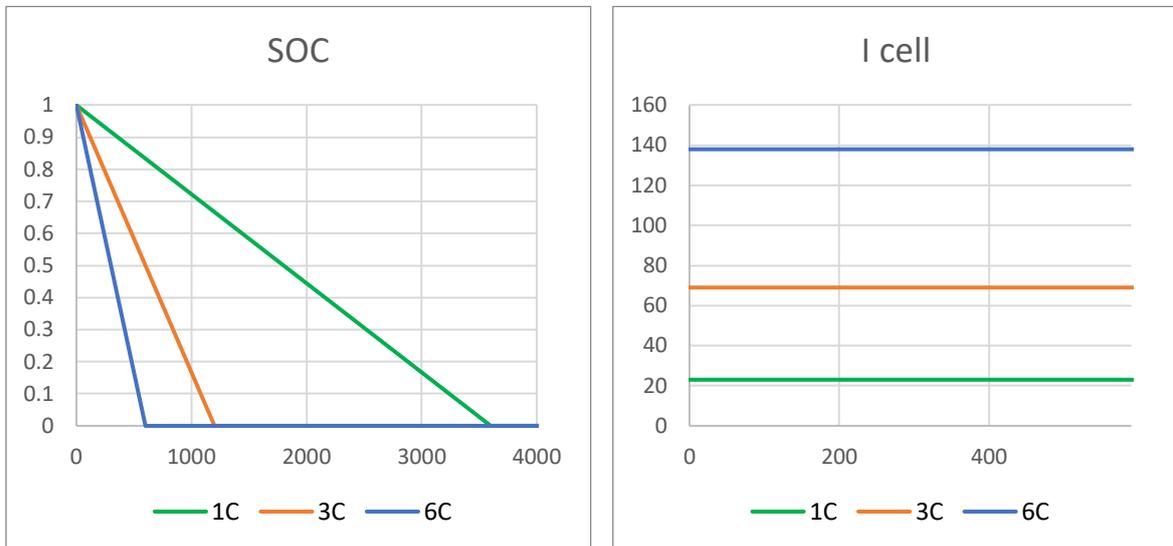


Ilustración 37. Evolución del SOC para ratios de descarga 1C, 3C y 6C e Intensidad de la celda correspondiente. Fuente: Elaboración propia

La evolución que siguen las impedancias R_0 , R_1 y C_1 del circuito equivalente durante la descarga es la que se muestra a continuación en la Ilustración 38, Ilustración 39 e Ilustración 40 respectivamente.

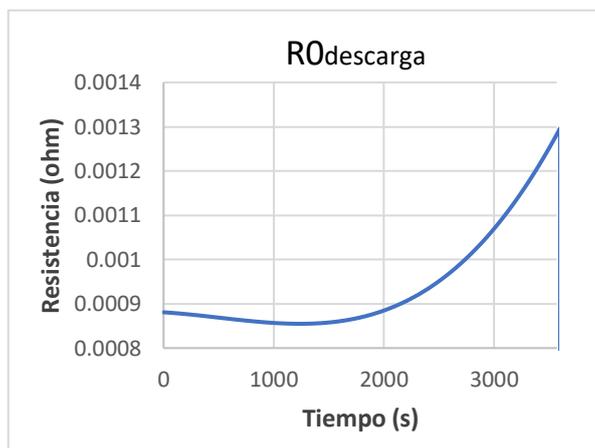


Ilustración 38. Evolución de la resistencia R_0 durante el proceso de descarga a 1C. Fuente: Elaboración propia

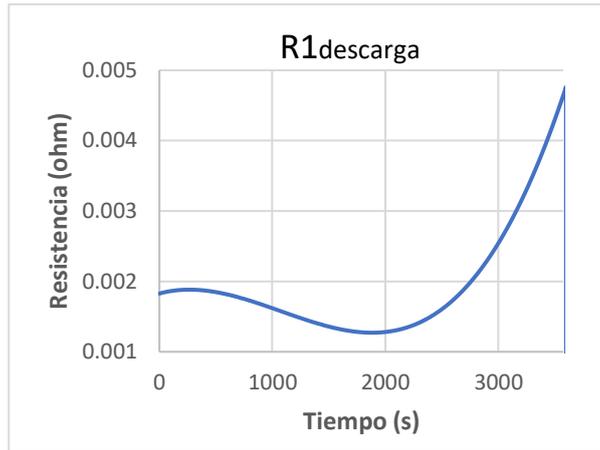


Ilustración 39. Evolución de la resistencia $R1$ durante el proceso de descarga a 1C. Fuente: Elaboración propia

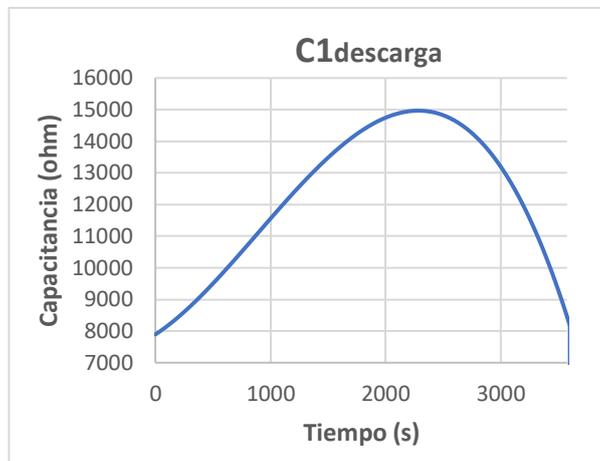


Ilustración 40. Evolución de la capacitancia $C1$ durante el proceso de descarga a 1C. Fuente: Elaboración propia

En los resultados que proporciona el submodelo térmico los efectos causados por la variación de los parámetros son más visibles. Por ello, se dividirá la presentación de los resultados en diferentes apartados para su mejor análisis y comprensión.

REFRIGERACIÓN BASE/ LATERAL

Este estudio realiza, para el proceso de descarga a 1C, una comparativa entre los casos de refrigeración por la base de la celda y refrigeración por las caras laterales de esta, en condiciones de descarga a 1C, temperatura ambiente 293 K, temperatura del refrigerante 293 K, 0'5 l/s y concentración nula de nanopartículas. Los siguientes gráficos muestran, para dichas condiciones, el impacto de la variación de la cara de la celda que se refrigera en las temperaturas de los nodos que resultan más relevantes en este estudio: el nodo de Zona Activa (Ilustración 41), el nodo de la cara Base (Ilustración 42) y el nodo de una cualquiera de las caras laterales (Ilustración 43), ya que ambas se comportan de la misma forma.

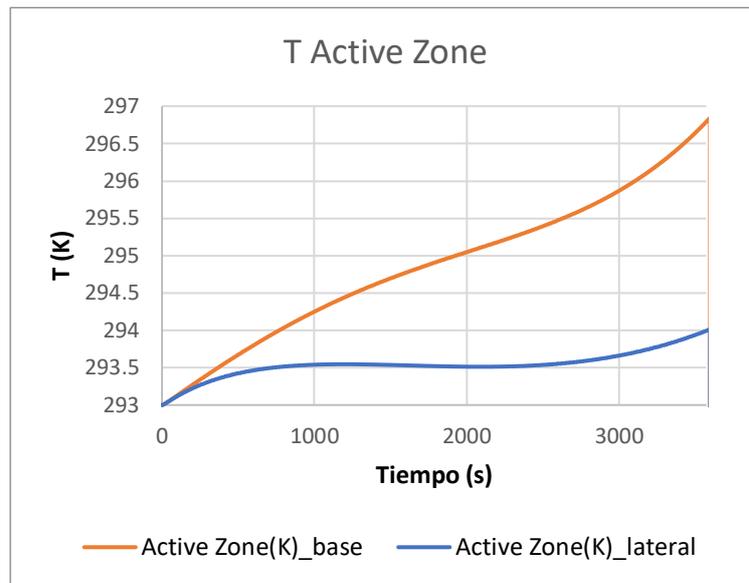


Ilustración 41. Temperatura de la Zona Activa. Descarga a 1C. Refrigeración por base vs Refrigeración lateral. Fuente: Elaboración propia

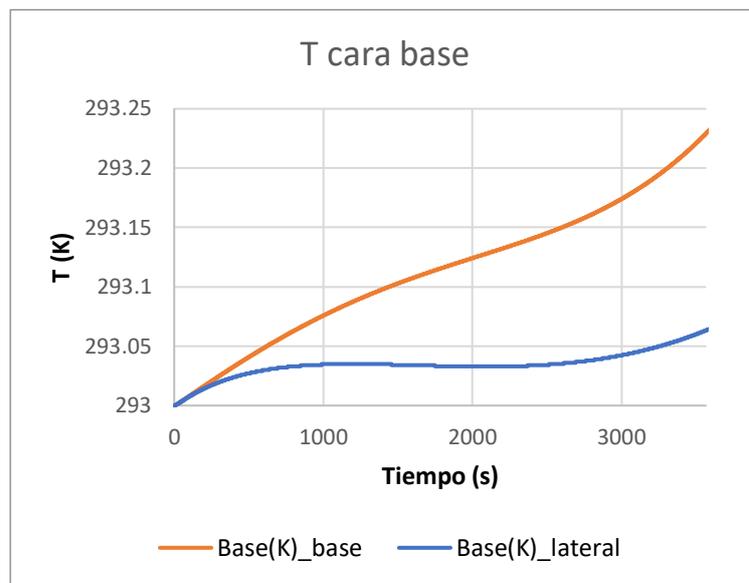


Ilustración 42. Temperatura del nodo Base. Descarga a 1C. Refrigeración por base vs Refrigeración lateral. Fuente: Elaboración propia

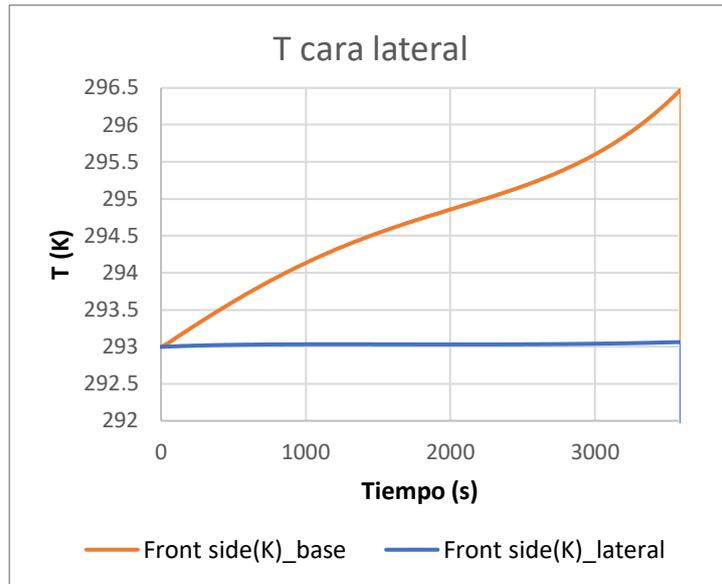


Ilustración 43. Temperatura del nodo Front Side. Descarga a 1C. Refrigeración por base vs Refrigeración lateral. Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse, la temperatura de los nodos de la celda no experimenta variaciones mayores del 15'2 % para el caso de la Zona Activa y las caras laterales y del 0'085 % para la base a este ratio de descarga. Aun así, el impacto de la refrigeración por las caras laterales respecto a la refrigeración únicamente por la base es apreciable, consiguiéndose una diferencia de prácticamente 3 °C en el nodo central donde se origina el calor (Ilustración 41). Incluso la temperatura del nodo correspondiente a la base experimenta un ligero descenso en la simulación de la refrigeración lateral (Ilustración 42). Asimismo, las caras laterales, en otro caso refrigeradas por aire, descienden su temperatura hasta 2'5 °C al estar en contacto con el refrigerante (Ilustración 43).

El calor cedido al refrigerante aumenta considerablemente para el caso de la refrigeración por caras laterales; en la Ilustración 44 se observa como prácticamente triplica su valor. Esto se debe a diversas razones. La primera de ellas y más evidente es que el número de caras de la celda en contacto con el fluido refrigerante se duplica.

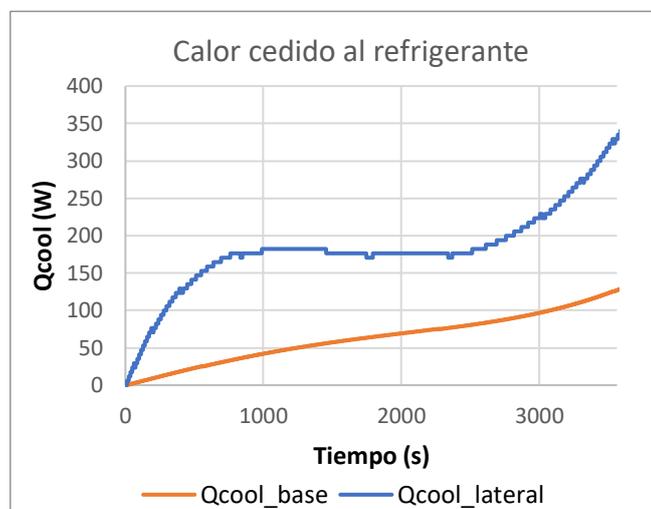


Ilustración 44. Calor cedido al fluido refrigerante. Refrigeración por base vs. Refrigeración lateral. Fuente: Elaboración propia

La segunda razón es menos evidente. Recordando la ecuación (20), la conductancia se calcula a partir del coeficiente de convección de la superficie con el fluido y del área de dicha superficie. Debido a que el área de las caras laterales es mayor que la superficie de la base, dicha conductancia aumenta visiblemente su valor. La Ilustración 45 muestra una comparativa de los resultados obtenidos para la refrigeración base y lateral, corroborando la explicación anterior.

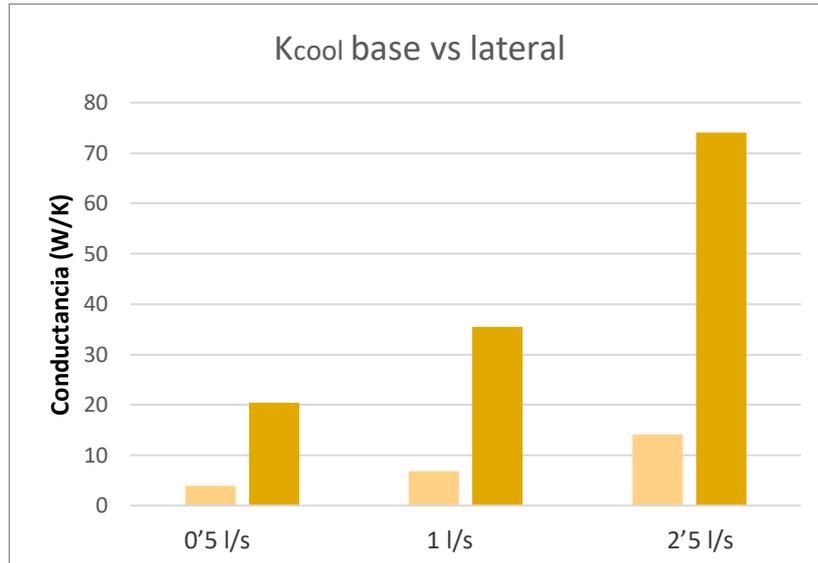


Ilustración 45. Coeficiente de la matriz de conductancias. Izquierda: Refrigeración por base. Derecha: Refrigeración lateral. Fuente: Elaboración propia

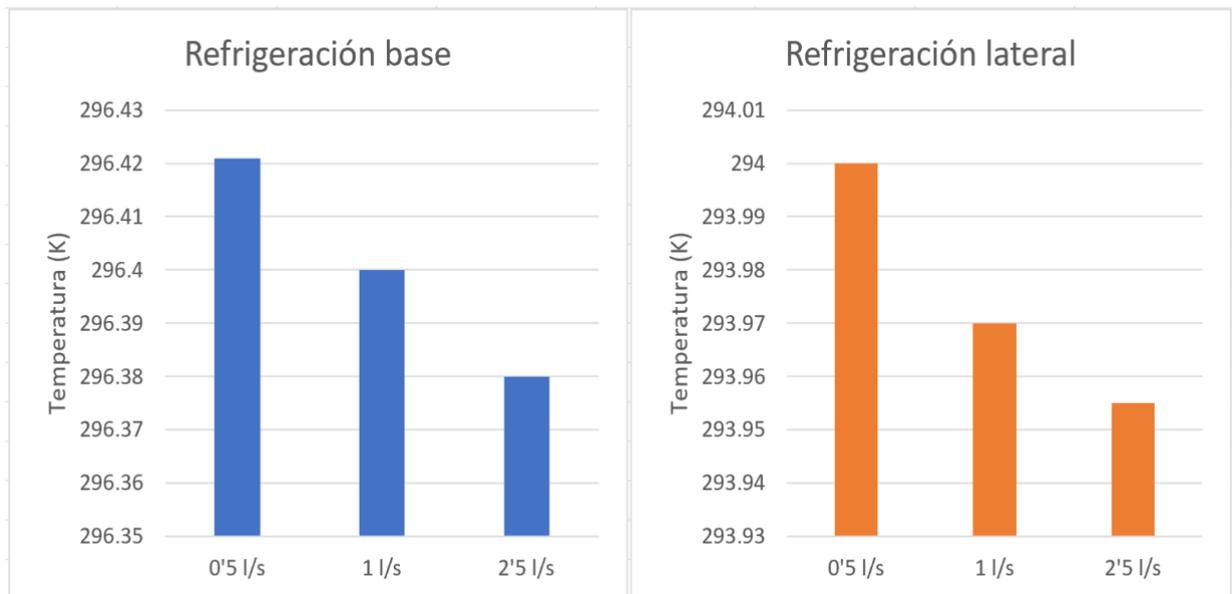


Ilustración 46. Temperatura final de la Zona Activa para los caudales 0.5 l/s, 1 l/s y 2.5 l/s para los supuestos de refrigeración por base y refrigeración lateral. Fuente: Elaboración propia

VARIACIÓN DEL CAUDAL

Este estudio se ha realizado en condiciones no adiabáticas, con una temperatura ambiente de 293 K constante, al igual que la temperatura del refrigerante, teniendo en cuenta distintas concentraciones de nanopartículas y comparando el supuesto de refrigeración por la base y refrigeración lateral.

La Ilustración 45 también muestra el impacto que la variación del caudal causa en el valor de la conductancia a través del coeficiente de película. Las tablas siguientes muestran, para el supuesto de refrigeración por la base, para caudales de 0'5 l/s (Tabla 6), 1 l/s (Tabla 7) y 2'5 l/s (Tabla 8) los parámetros adimensionales y las propiedades necesarias para el cálculo del coeficiente de película y la conductancia, así como el valor de estas variables, en función de la concentración de nanopartículas en el fluido (0, 2 y 5%).

0'5 l/s	Re	Pr	Nu	h	Kcool	k	ρ	μ
0% nf	7754.82	6.9792	75.003	1724	3.9066	0.533636	1000	0.000891
2% nf	7858.22	6.4545	73.872	1794	4.0665	0.563988	1064	0.0009356
5% nf	7996.08	5.7635	72.160	1901	4.3085	0.611735	1160	0.00100238

Tabla 6. Parámetros y propiedades térmicas del fluido refrigerante en función del porcentaje de nanopartículas para un caudal de 0'5 l/s. Fuente: Elaboración propia

1 l/s	Re	Pr	Nu	h	Kcool	k	ρ	μ
0% nf	15509.6	6.9792	130.59	3001	6.8018	0.533636	1000	0.000891
2% nf	15716.4	6.4545	128.62	3124	7.0803	0.563988	1064	0.0009356
5% nf	15992.2	5.7635	125.64	3310	7.5017	0.611735	1160	0.00100238

Tabla 7. Parámetros y propiedades térmicas del fluido refrigerante en función del porcentaje de nanopartículas para un caudal de 1 l/s. Fuente: Elaboración propia

2'5 l/s	Re	Pr	Nu	h	Kcool	k	ρ	μ
0% nf	38774	6.9792	271.81	6248	14.157	0.533636	1000	0.000891
2% nf	39291	6.4545	267.71	6503	14.737	0.563988	1064	0.0009356
5% nf	39980	5.7635	261.50	6890	15.614	0.611735	1160	0.00100238

Tabla 8. Parámetros y propiedades térmicas del fluido refrigerante en función del porcentaje de nanopartículas para un caudal de 2'5 l/s. Fuente: Elaboración propia

La densidad, la conductividad térmica, la viscosidad y el número de Prandtl, por su parte, no dependen del caudal, pero sí se observa el gran impacto que provoca la variación de flujo en el resto de las variables de la tabla (Ilustración 47). En el cálculo del número de Reynolds interviene la velocidad del fluido, directamente proporcional al caudal. El aumento de este parámetro se refleja en el número de Nusselt, y este a su vez en el coeficiente de película y la conductancia.

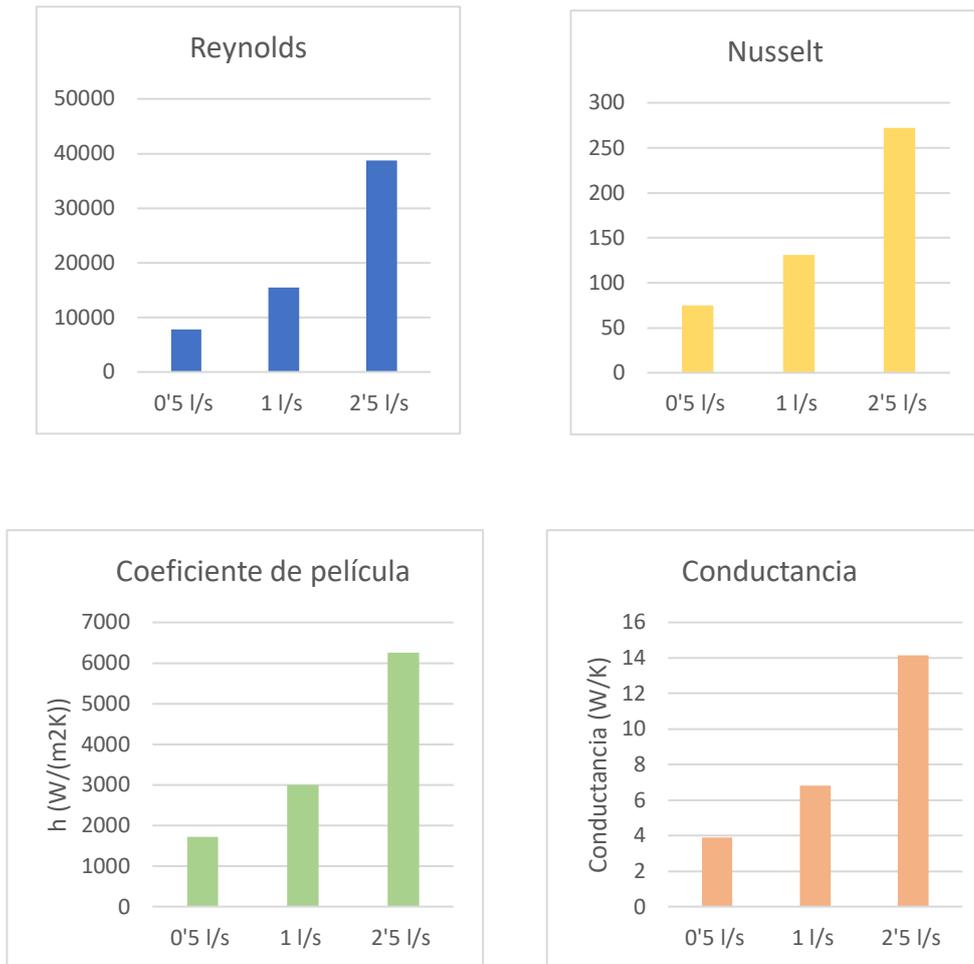


Ilustración 47. Impacto del caudal trasegado en diversos parámetros: número de Reynolds, número de Nusselt, coeficiente de película y conductancia. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, el impacto de la variación del caudal en las temperaturas de los nodos y el calor generado en la celda es menor del 0'1%. Los siguientes gráficos muestran la temperatura del nodo central y la temperatura de las caras en contacto con el refrigerante para los tres caudales estudiados. La Ilustración 48 y la Ilustración 49 muestran los resultados del supuesto de refrigeración por la base de la celda.

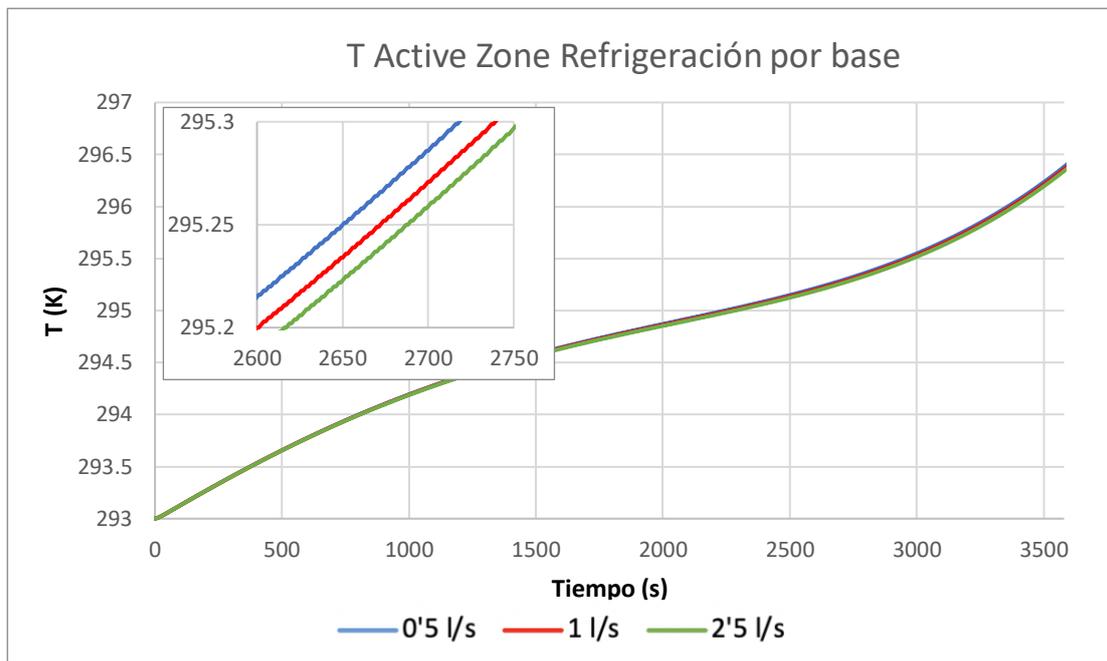


Ilustración 48. Temperatura del nodo Zona Activa para diferentes caudales en el caso de refrigeración por base. Fuente: Elaboración propia

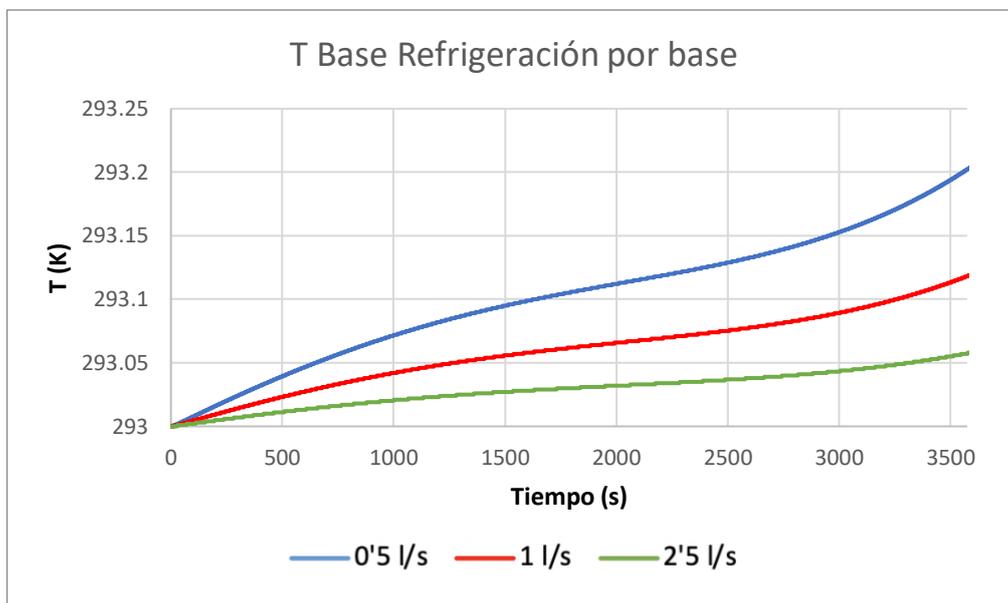


Ilustración 49. Temperatura del nodo Base para los diferentes caudales en el caso de refrigeración por base. Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 50 y la Ilustración 51 son análogas a las dos gráficas anteriores, pero para el supuesto de refrigeración por las caras laterales de la celda.

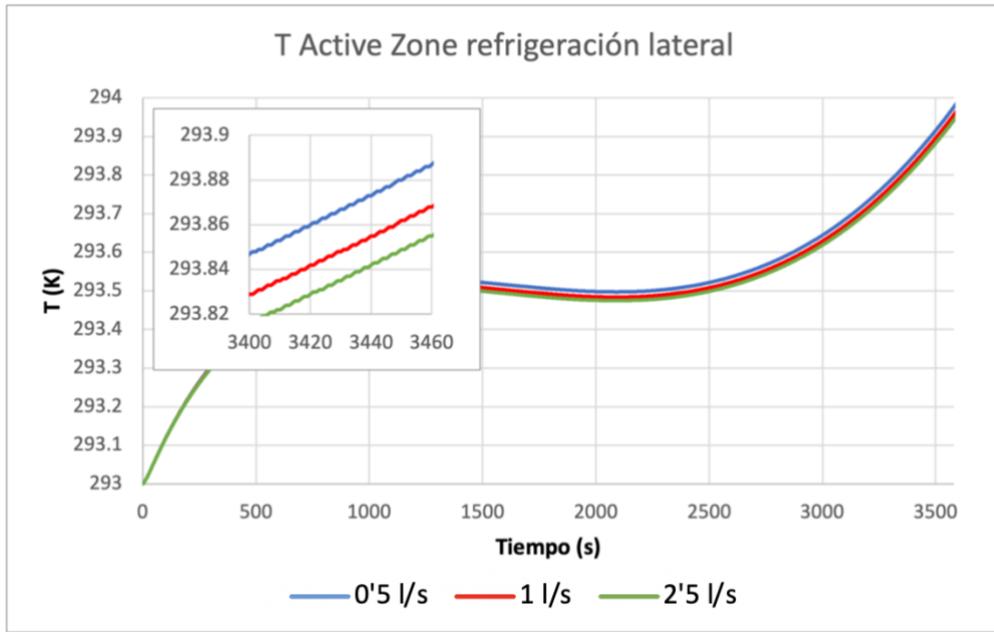


Ilustración 50. Temperatura del nodo Zona Activa para los diferentes caudales en el caso de refrigeración lateral. Fuente: Elaboración propia

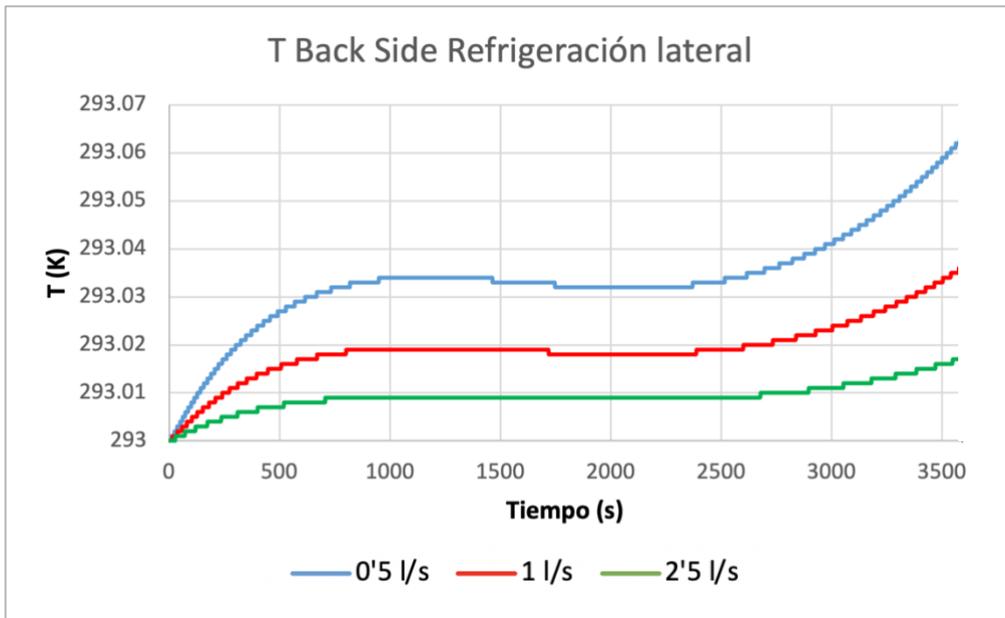


Ilustración 51. Temperatura del nodo Back Side para los diferentes caudales en el caso de refrigeración lateral. Fuente: Elaboración propia

La conclusión que puede deducirse de las cuatro ilustraciones anteriores es que la variación del caudal afecta muy ligeramente a las temperaturas de los nodos: multiplicar por 5 el caudal trasegado apenas consigue disminuir la temperatura del nodo central 3 centésimas. Dentro de que el impacto es mínimo, los nodos en contacto con el refrigerante muestran una reducción de la temperatura conforme aumenta el flujo de caudal ligeramente mayor que el nodo central: en el supuesto de refrigeración por la base, comparando los dos casos extremos se puede observar una diferencia de 15 centésimas.

NANOFLUIDOS

Se presentarán los resultados del estudio en las condiciones de descarga a 1C, temperatura ambiente 293 K constante, temperatura del refrigerante 293 K constante y caudal de 0'5 l/s constante. Se consideran los supuestos de refrigeración por la base de la celda y por las caras laterales. Además, se tienen en cuenta tres posibles concentraciones de nanopartículas: 0, 2 y 5%.

Para estudiar el impacto del uso de nanofluidos se debe centrar de nuevo la atención en la Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8. La variación de las variables presentes en la tabla con la concentración de nanopartículas es mucho menor que con el caudal; ello se traduce a su vez en un impacto menor en las temperaturas de la celda.

- El número de Reynolds se incrementa ligeramente debido a que el aumento de la densidad con la concentración tiene más peso que el incremento de la viscosidad del fluido.
- El número de Prandtl descende debido a que la capacidad de los nanofluidos es menor que la del fluido base.
- Como consecuencia de ello el número de Nusselt disminuye, pero el aumento tan considerable de la conductividad provoca un impacto positivo en el coeficiente de película y en la conductancia.

Los gráficos presentados en la Ilustración 52 muestran estos cambios en los diferentes parámetros para un caudal de 0'5 l/s.

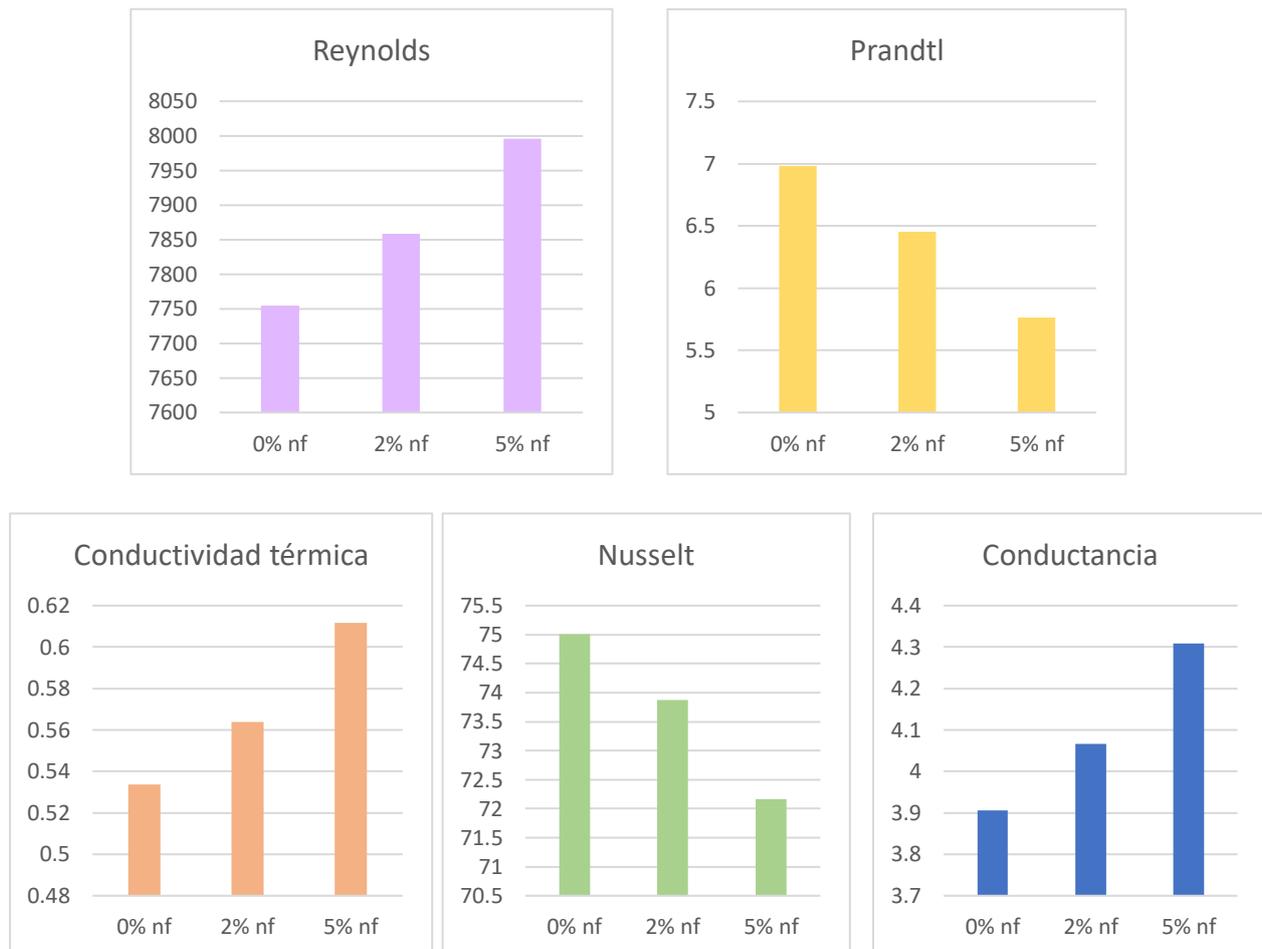


Ilustración 52. Impacto de la concentración de nanopartículas en diversos parámetros: número de Reynolds, número de Prandtl, conductividad térmica, número de Nusselt y conductancia. Caudal de 0'5 l/s. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, en una situación análoga a la vista anteriormente con la variación de caudal, el uso de nanofluidos provoca un impacto inapreciable en las temperaturas de los nodos de la celda, como se puede observar en los siguientes gráficos.

En las cuatro ilustraciones siguientes se muestra la temperatura del nodo Zona Activa para una concentración de nanopartículas de 0% (representada para que sirva como la distribución de temperaturas de referencia), 2% y 5%.

Concretamente, en la Ilustración 53 se observan los resultados obtenidos en el supuesto de caudal 0'5 l/s y refrigeración por la base de la celda. En primer lugar, se observa que el impacto del porcentaje de nanopartículas en la temperatura es mínimo, apenas unas milésimas de variación. En segundo lugar, observando los resultados obtenidos en el supuesto de igual caudal, pero refrigeración lateral (Ilustración 54), se puede concluir que el uso de nanofluidos no genera mayor impacto por el hecho de estar en contacto con las caras laterales.

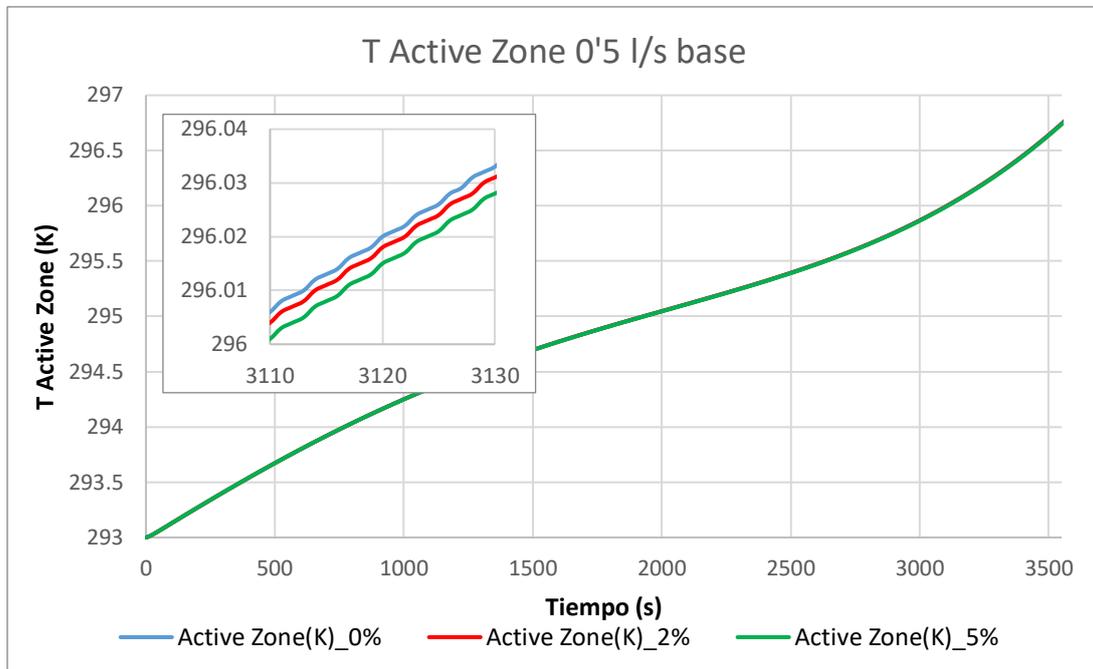


Ilustración 53. Temperatura del nodo Zona Activa para un caudal de 0'5 l/s y concentración de nanopartículas de 0%, 2% y 5%. Refrigeración por base. Fuente: Elaboración propia

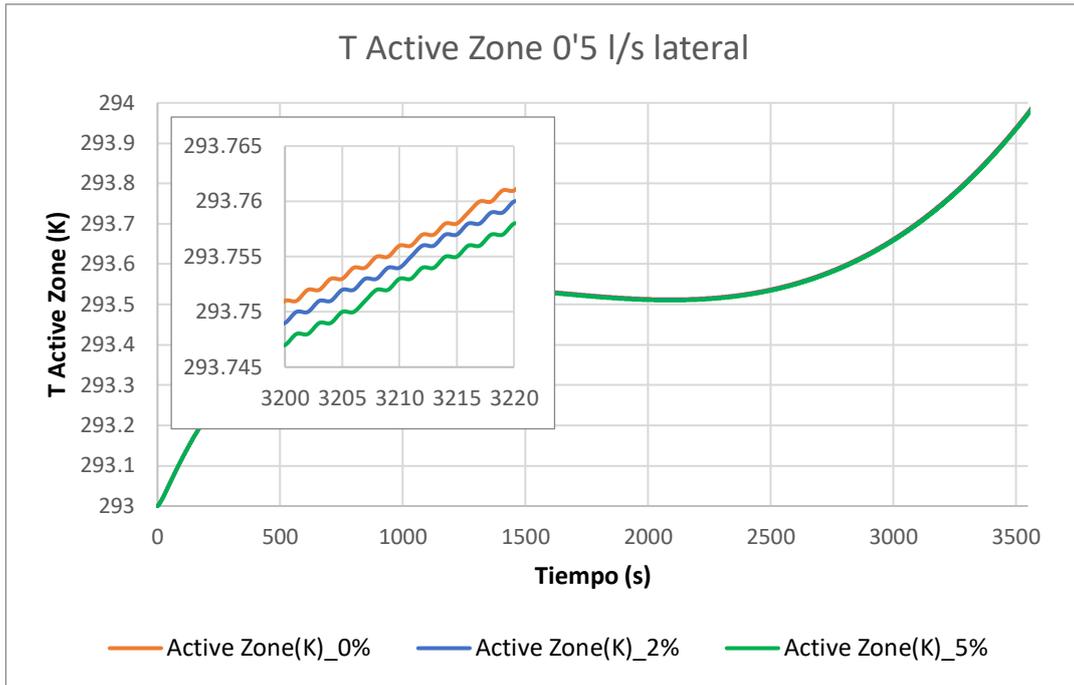


Ilustración 54. Temperatura del nodo Zona activa para un caudal de 0'5 l/s y concentración de nanopartículas de 0%, 2% y 5%. Refrigeración lateral. Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 55 y la Ilustración 56 representan el supuesto de refrigeración por base con un caudal de 1 l/s y 2'5 l/s respectivamente. Comparando estos resultados con los vistos en la Ilustración 53 se concluye que no se percibe mayor impacto de los nanofluidos con el aumento de caudal.

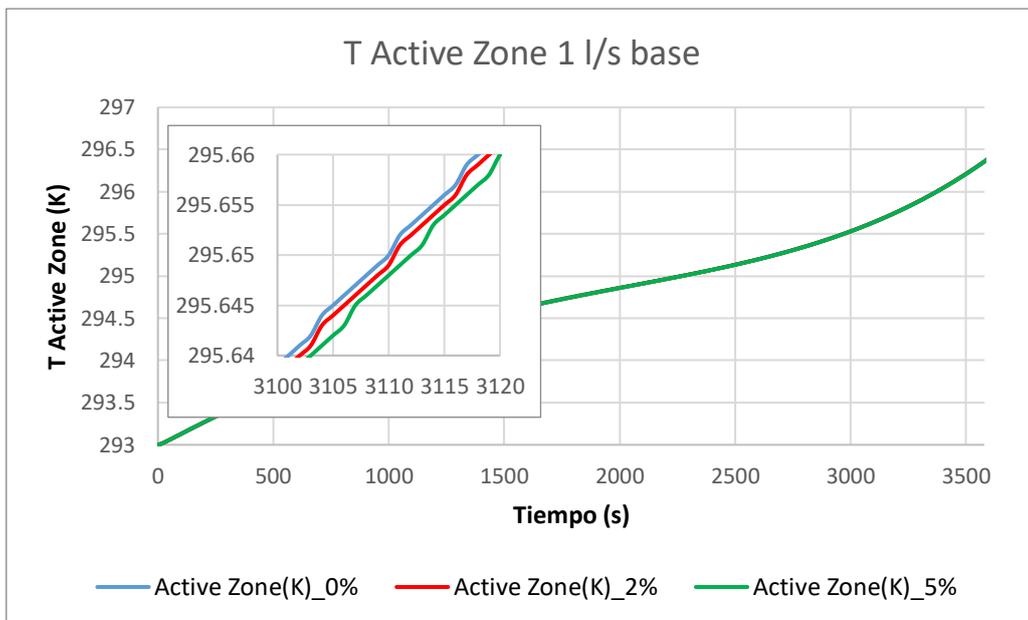


Ilustración 55. Temperatura del nodo Zona Activa para un caudal de 1 l/s y concentración de nanopartículas de 0%, 2% y 5%. Refrigeración por base. Fuente: Elaboración propia

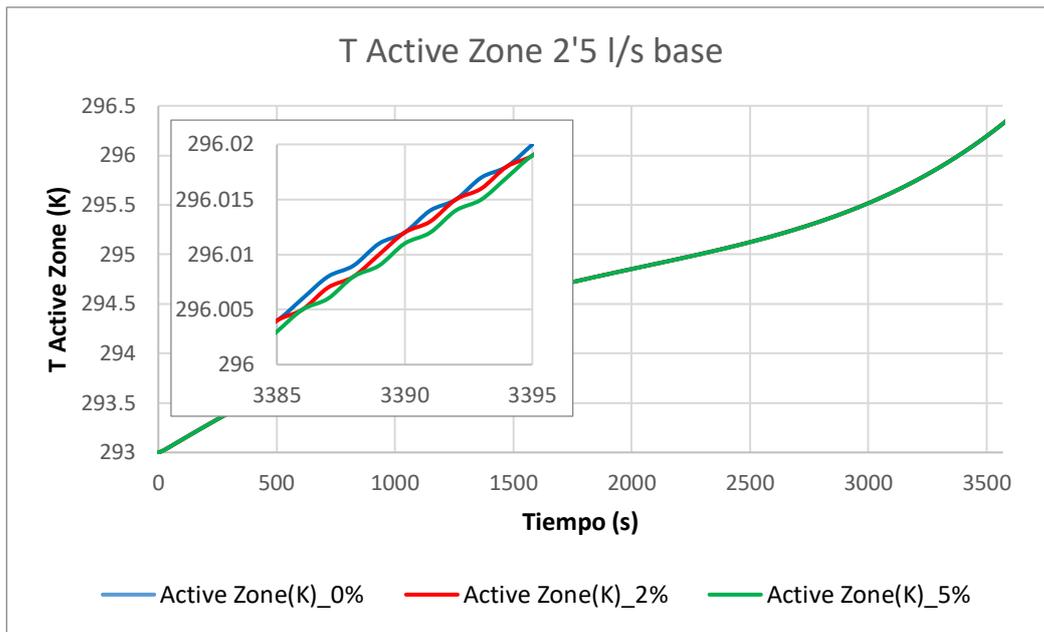


Ilustración 56. Temperatura del nodo Zona Activa para un caudal de 2'5 l/s y concentración de nanopartículas de 0%, 2% y 5%. Refrigeración por base. Fuente: Elaboración propia

Aun con todo esto, el impacto que provocan los nanofluidos en todos los supuestos estudiados es el esperado: a mayor concentración de nanopartículas, el coeficiente de convección aumenta y por ello la temperatura del nodo disminuye.

La Ilustración 57 muestra el trabajo de la bomba en función de la concentración de nanofluidos.

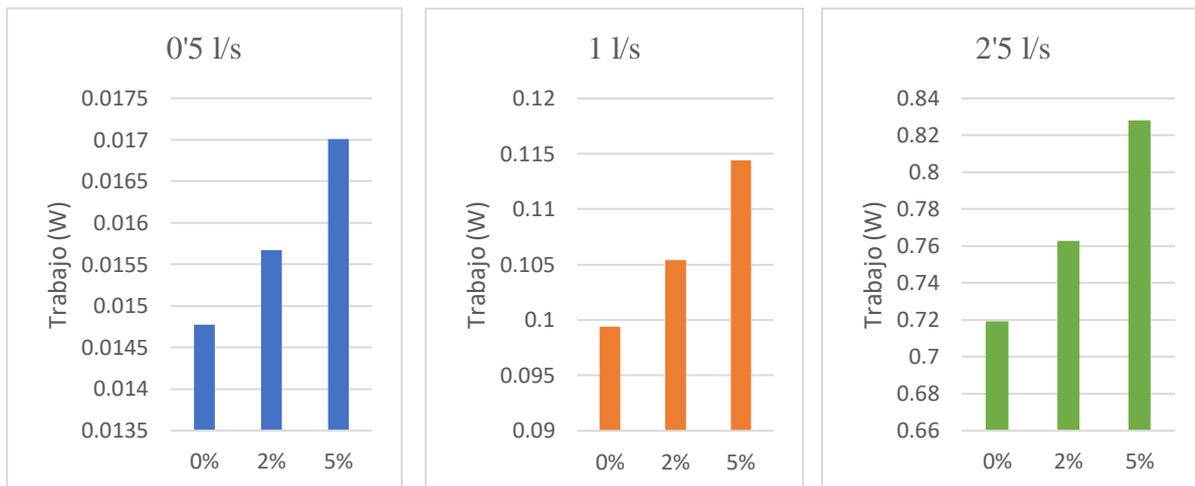


Ilustración 57. Trabajo de la bomba en función del porcentaje de nanopartículas para los caudales 0'5 m³/s, 1 m³/s y 2'5 m³/s. Fuente: Elaboración propia

En la ecuación (28) se observa que la caída de presión depende del factor de fricción, de la densidad y del cuadrado de la velocidad del fluido. Todo ello genera un incremento en el trabajo de la bomba de 0'0022 W para un caudal de 0'5 l/s, 0'015 W para un caudal de 1 l/s, y 0'1 W para un caudal de 2'5 l/s, cuando la concentración de nanopartículas asciende a un 5%.

TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE

En el estudio del impacto que provoca variar la temperatura del refrigerante se han observado las temperaturas del nodo Zona Activa, de los nodos que recogen la temperatura del refrigerante a la entrada y a la salida de su paso por las celdas, y del nodo en contacto con el fluido refrigerante, siendo este el nodo base o el nodo del lateral de la celda dependiendo de la cara que esté siendo refrigerada. El estudio se ha llevado a cabo para un ratio de descarga a 1C en el supuesto de un caudal de 0'5 l/s de fluido refrigerante compuesto por agua más glicol, en ausencia de nanopartículas.

Este estudio presenta los mismos resultados para el supuesto de refrigeración lateral, pero el impacto es menos acusado. Por ello se procede a presentar los resultados obtenidos del estudio para refrigeración por la base.

La Ilustración 58 se corresponde con el caso adiabático de refrigeración por la base de la celda, mientras que la Ilustración 59 considera el supuesto de un sistema no aislado del entorno con una temperatura ambiente de 293 K. Ambas representan la temperatura de la base y la temperatura de la zona central de la celda.

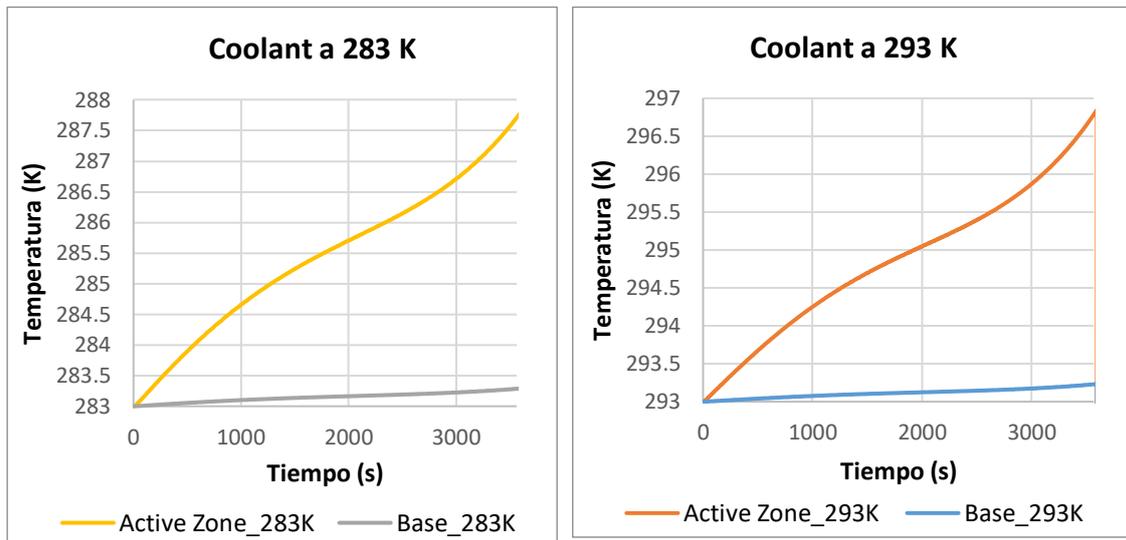


Ilustración 58. Temperaturas de los nodos Zona Activa y Base. Sistema adiabático. Refrigeración por base. Izquierda: Temperatura del refrigerante 283 K, Derecha: Temperatura del refrigerante 293 K. Fuente: Elaboración propia

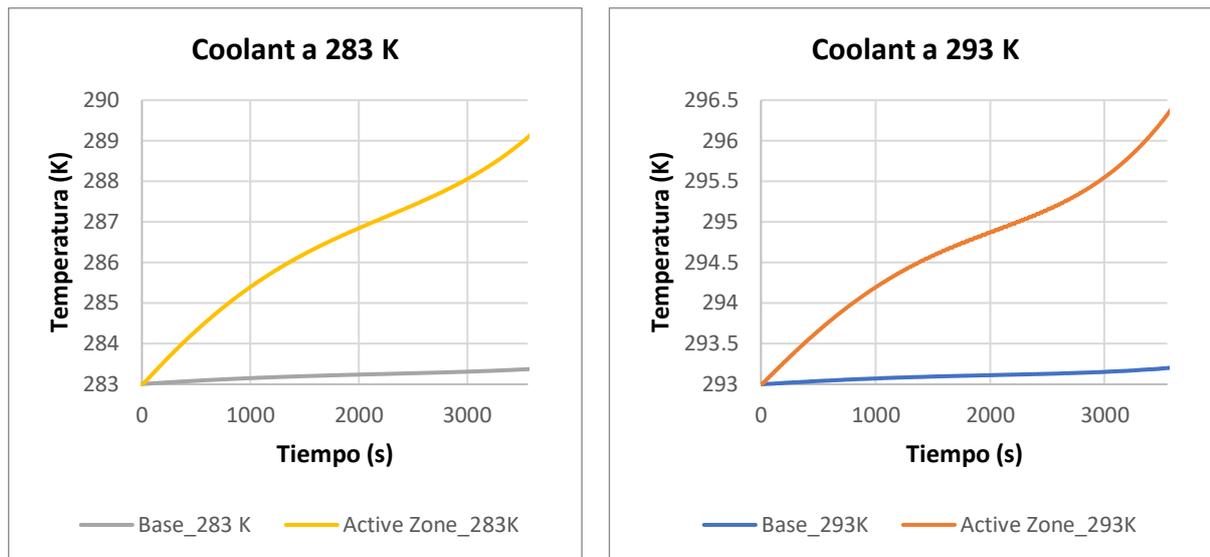


Ilustración 59. Temperaturas de los nodos Zona Activa y Base. Sistema no adiabático. Temperatura ambiente 293 K. Refrigeración por base. Izquierda: Temperatura del refrigerante 283 K. Derecha: Temperatura del refrigerante 293 K. Fuente: Elaboración propia

De la comparación de las cuatro ilustraciones presentadas se puede extraer conclusiones relevantes para el estudio. Si la temperatura del refrigerante es de 293 K, el caso más desfavorable, es decir, la situación en la que las temperaturas alcanzan valores mayores es el caso adiabático. Si, por el contrario, la temperatura del refrigerante es de 283 K, el caso más desfavorable resulta ser el caso no adiabático, ya que la interacción con el ambiente, que se encuentra a 293 K, genera un mayor incremento no deseado de la temperatura del refrigerante. A causa de este aumento, el salto térmico de la temperatura de la Zona Activa es también mayor.

TEMPERATURA AMBIENTE

El estudio del impacto de la temperatura del entorno se ha llevado a cabo en las condiciones de caudal 0'5 l/s, refrigeración por la base de la celda y concentración nula de nanopartículas. Se han llevado a cabo las simulaciones con una temperatura de refrigerante de 293K (Ilustración 60) y 283K (Ilustración 61). En ambos supuestos se ha considerado una temperatura ambiente por encima y por debajo de la del refrigerante y se ha simulado el caso adiabático.

En la Ilustración 60 se observa como la temperatura de la Zona Activa experimenta un gran incremento, de 2'3 °C con respecto al caso adiabático, en la simulación de un clima caluroso; asimismo se observa que, considerando la temperatura ambiente de 293K, la adiabaticidad es perjudicial, ya que el calor no se evacúa hacia el ambiente, sino que se almacena aumentando la temperatura de la celda.

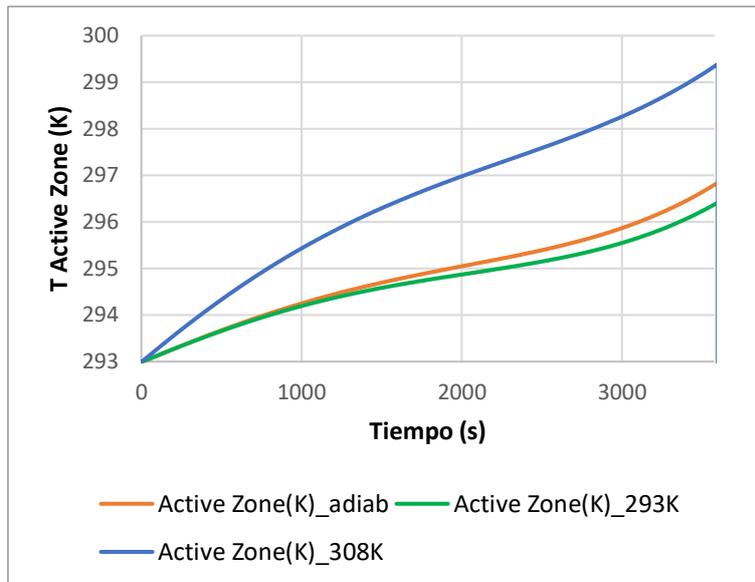


Ilustración 60. Impacto de la temperatura ambiente en la temperatura de la Zona Activa. Temperatura del refrigerante 293 K. Fuente: Elaboración propia

De la Ilustración 61 se pueden extraer las mismas conclusiones. Considerando una temperatura del ambiente por debajo de la del refrigerante, resulta una mejor opción un sistema no adiabático en el que se pueda evacuar calor mediante convección con el aire. Asimismo, si la temperatura ambiente es mayor, un sistema no adiabático es contraproducente.

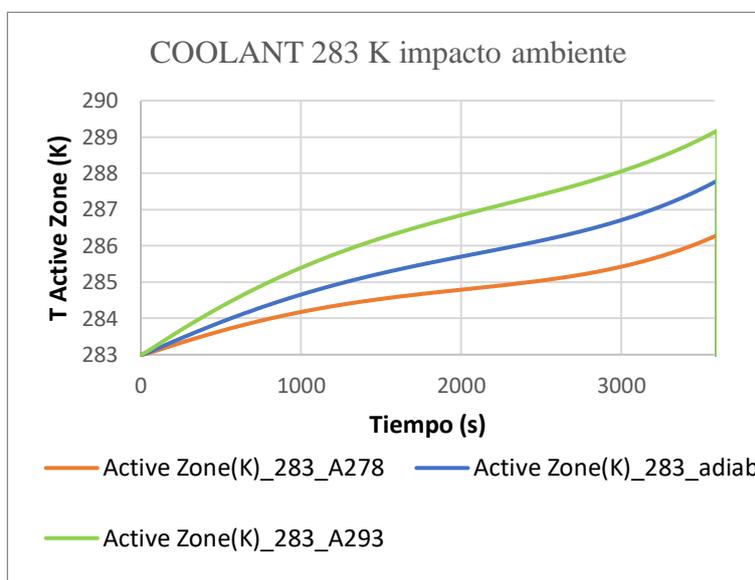


Ilustración 61. Impacto de la temperatura ambiente en la temperatura de la Zona Activa. Temperatura del refrigerante de 293 K. Fuente: Elaboración propia

Resulta ineludible para considerar de interés los resultados del estudio explicar brevemente cómo podría mantenerse la temperatura del refrigerante en un valor menor o mayor que la temperatura del ambiente. Sería posible mantener la temperatura del fluido refrigerante en el rango óptimo mediante la utilización de una bomba de calor, y un intercambiador de calor entre el SGTB y el sistema HVAC del vehículo (calefacción, ventilación y aire acondicionado).

ESTUDIO DESCARGA A 3C Y 6C

A continuación, se mostrarán las gráficas correspondientes a los estudios a 3C y 6C y se comentarán las diferencias más relevantes.

La Ilustración 62 y la Ilustración 63 representan la evolución de los parámetros del circuito equivalente para los ratios de descarga 3C y 6C respectivamente. Se observa que su evolución es prácticamente idéntica a la mostrada en la Ilustración 38 a la Ilustración 40.

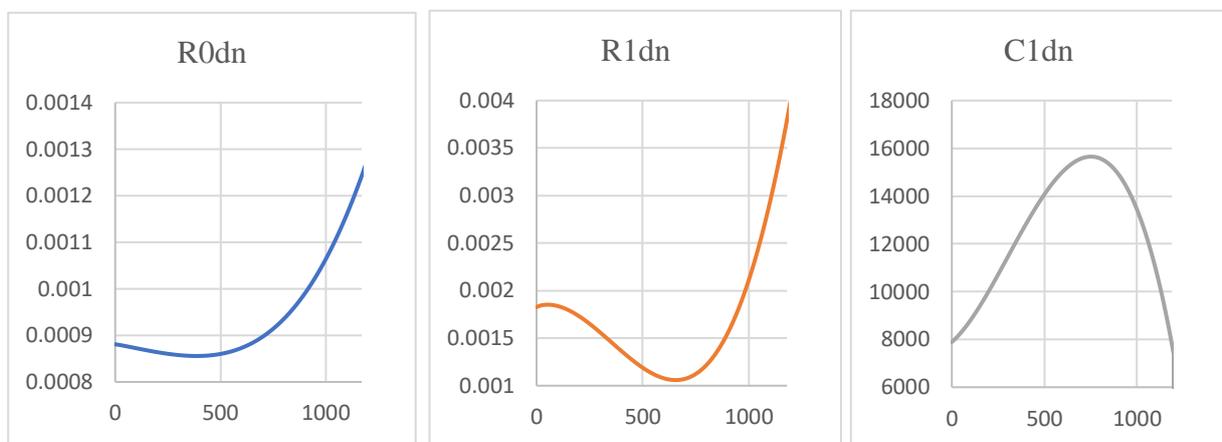


Ilustración 62. Evolución de los parámetros del circuito equivalente. Descarga a 3C. Fuente: Elaboración propia

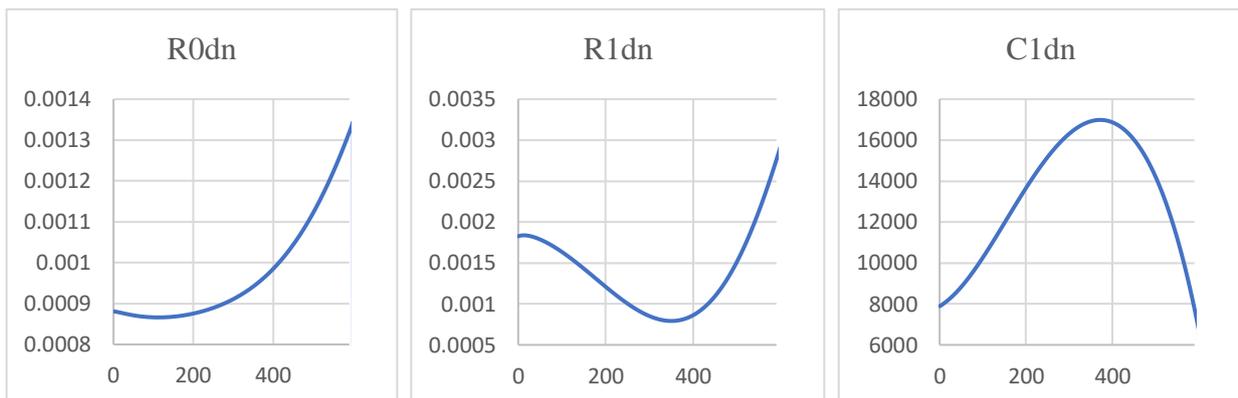


Ilustración 63. Evolución de los parámetros del circuito equivalente. Descarga a 6C. Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 64 muestra el calor generado por el pack de baterías para los diferentes ratios de descarga. Se aprecia un importante incremento del calor a medida que crece la velocidad de descarga: triplicando el ratio de descarga, el calor generado se ve multiplicado por 7; con un ratio de descarga de 6C, este factor de multiplicación aumenta a más de 24 unidades.

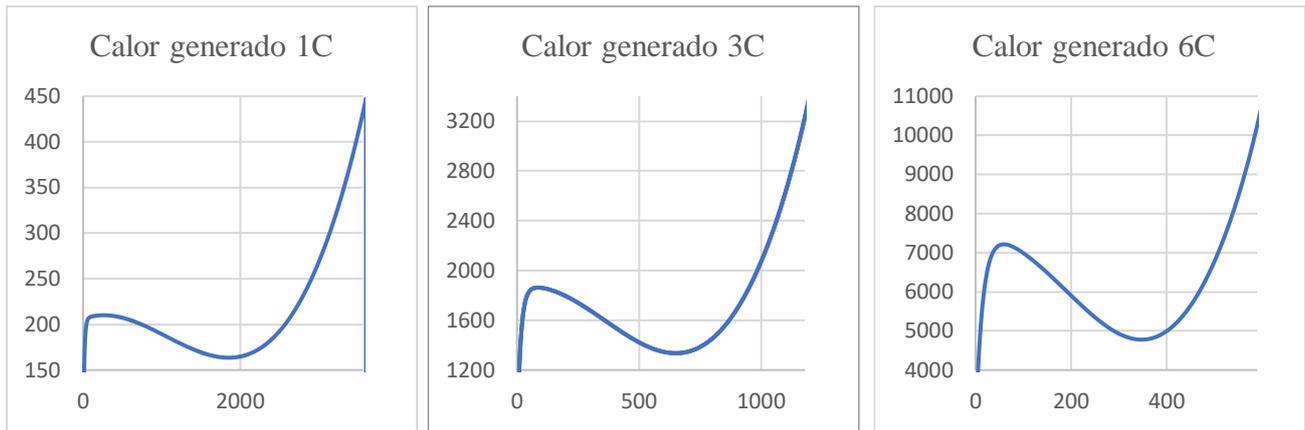


Ilustración 64. Calor generado por la batería en los ratios de descarga 1C, 3C y 6C. Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 65 muestra el impacto del caudal en la temperatura de la Zona Activa para descarga a 3C. La Ilustración 66 es análoga a la anterior, pero para la situación de descarga a 6C. Al igual que en la Ilustración 48 y la Ilustración 50, la variación del caudal genera un impacto muy ligero en la temperatura del nodo central, un poco más apreciable en el caso de la refrigeración lateral.

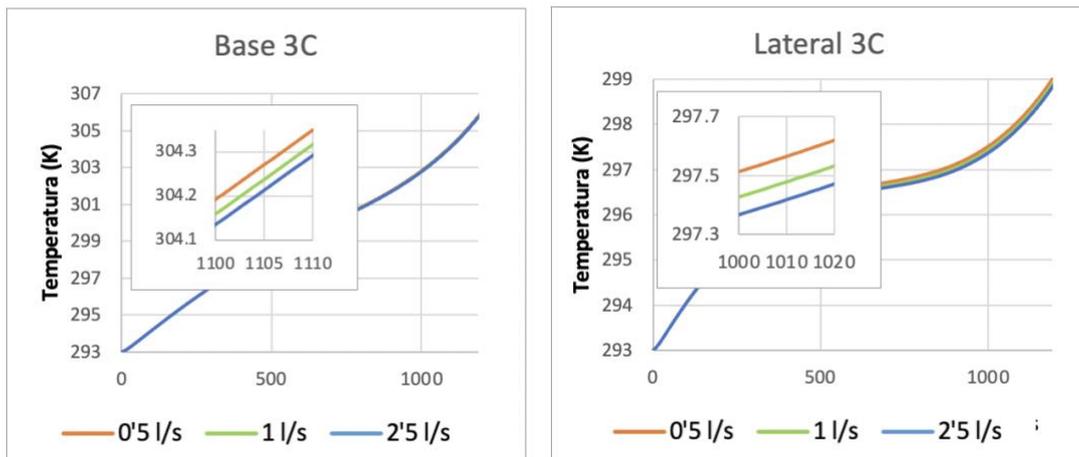


Ilustración 65. Temperatura de la Zona Activa para diferentes caudales. Descarga a 3C. Fuente: Elaboración propia

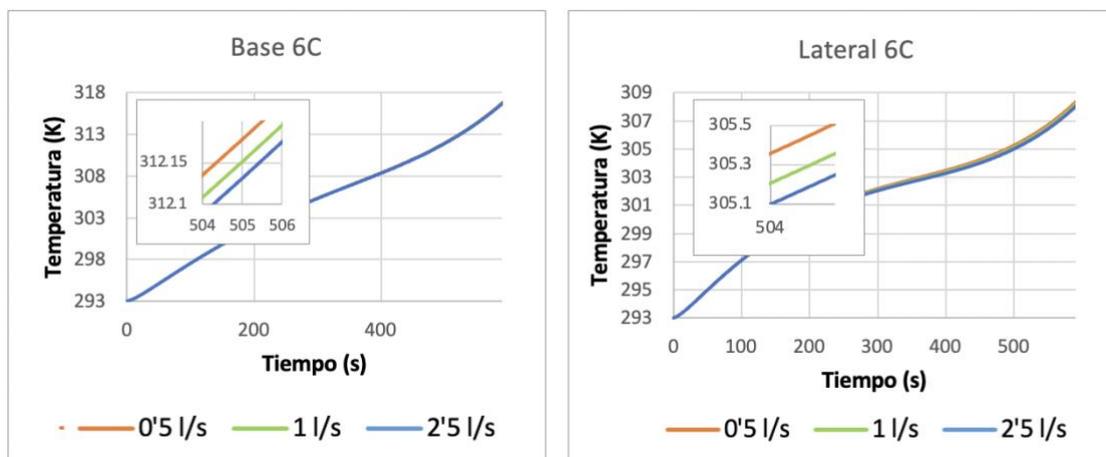


Ilustración 66. Temperatura de la Zona Activa para diferentes caudales. Descarga a 6C. Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 67 y la Ilustración 68 muestran las temperaturas de los nodos Zona Activa, Base y Front Side, una de las caras laterales, con el objetivo de comparar la refrigeración por la base y por las caras laterales en el proceso de descarga a 3C y a 6C respectivamente.

Recordando la Ilustración 41, la temperatura de la Zona Activa alcanzaba hacia el final de la descarga valores de 297 K. Observando en la Ilustración 67 y en la Ilustración 68 la temperatura de este mismo nodo, destaca el importante incremento que sufre al aumentar la tasa de descarga: 9 grados más en el caso de ratio 3C y 21 grados más en la descarga a 6C.

Por otro lado, la reducción de temperatura que se consigue al refrigerar las caras laterales es también más importante cuanto mayor es el ratio de descarga. En concreto, se observa una disminución de la temperatura del nodo central de hasta 7 grados en el caso de descarga a 3C y de 9 grados en la descarga a 6C, frente a los 27 grados que se conseguían en la descarga a 1C.

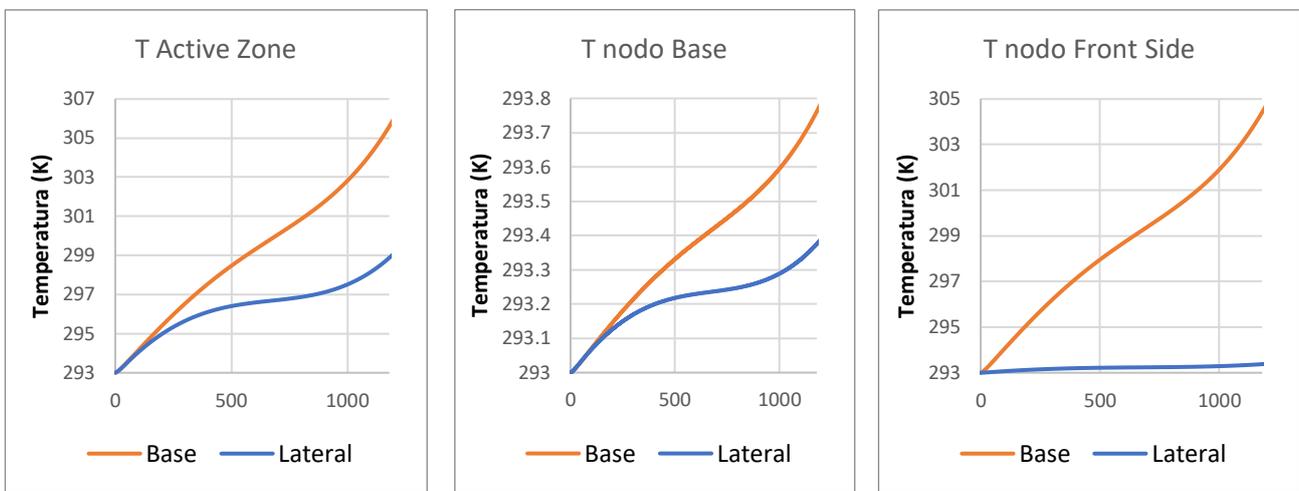


Ilustración 67. Temperatura de los nodos Zona Activa, Base y Front Side para los casos refrigeración por base y refrigeración lateral. Descarga a 3C. Fuente: Elaboración propia

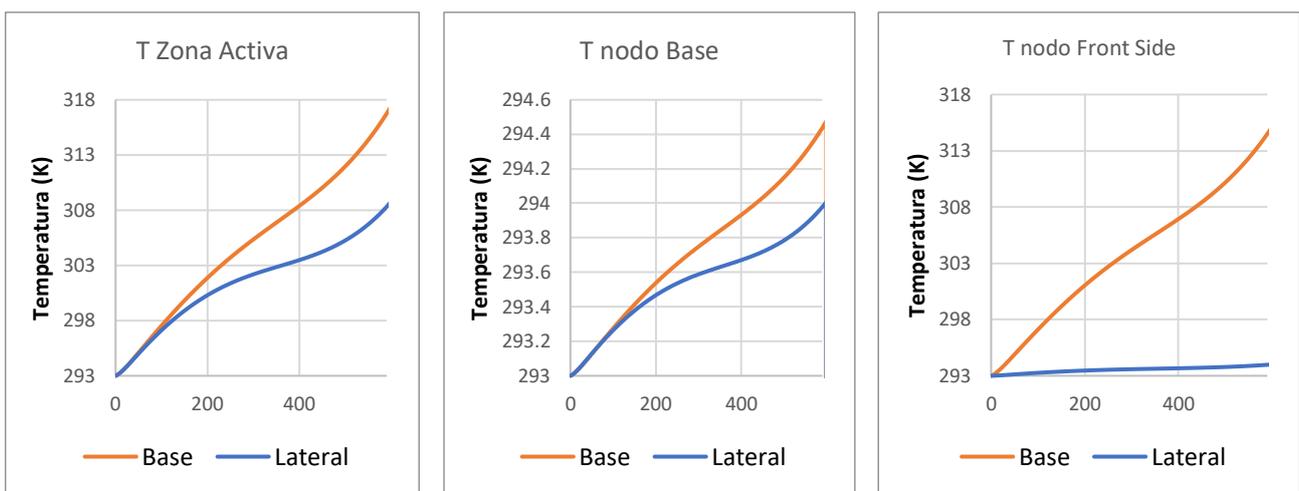


Ilustración 68. Temperatura de los nodos Zona Activa, Base y Front Side para refrigeración por base y refrigeración lateral. Descarga a 6C. Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 69 muestra el impacto de la concentración de nanofluidos para las simulaciones a un ratio de descarga de 3C. Se puede observar que no hay ninguna mejoría en su uso con respecto a los resultados vistos para el ratio de descarga de 1C (Ilustración 53 e Ilustración 54), así como tampoco se aprecia una mejoría en los resultados obtenidos para la descarga a 6C.

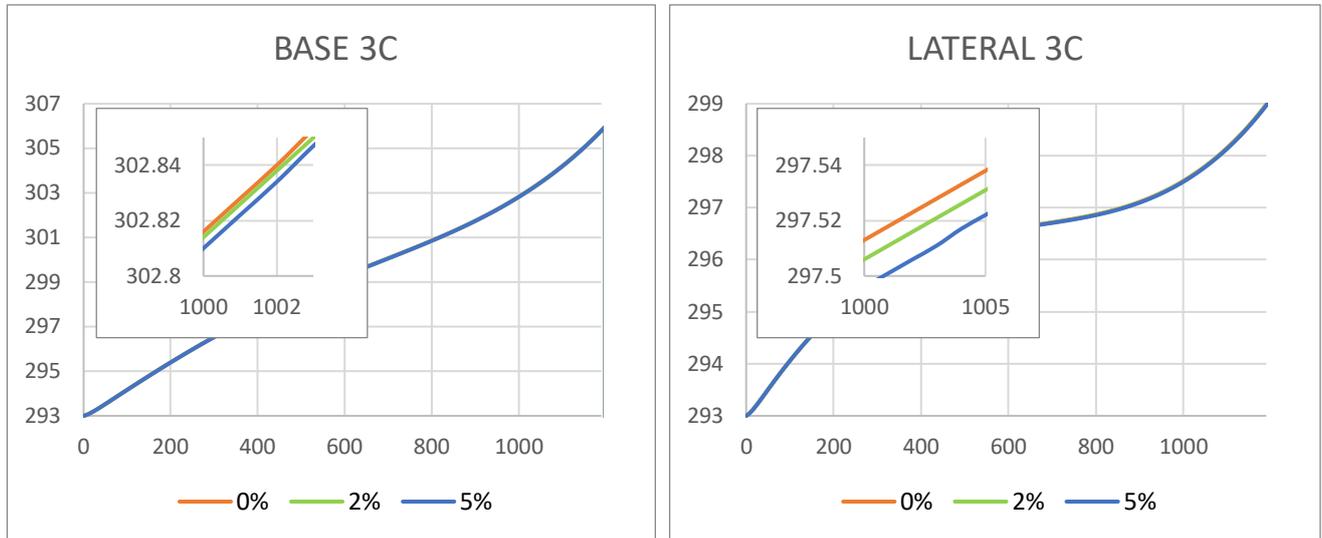


Ilustración 69. Impacto de la concentración de nanofluidos. Refrigeración por base (izquierda) y refrigeración lateral (derecha). Descarga a 3C

SIMULACIÓN DE UN CICLO REAL

Para concluir los estudios se ha realizado la simulación de un ciclo real de descarga de la batería, obteniéndose los resultados que se verán a continuación.

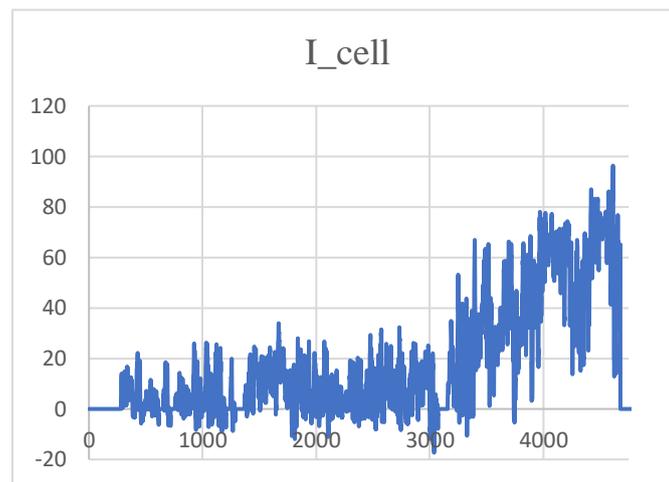


Ilustración 70. Intensidad de la celda. Fuente: Elaboración propia

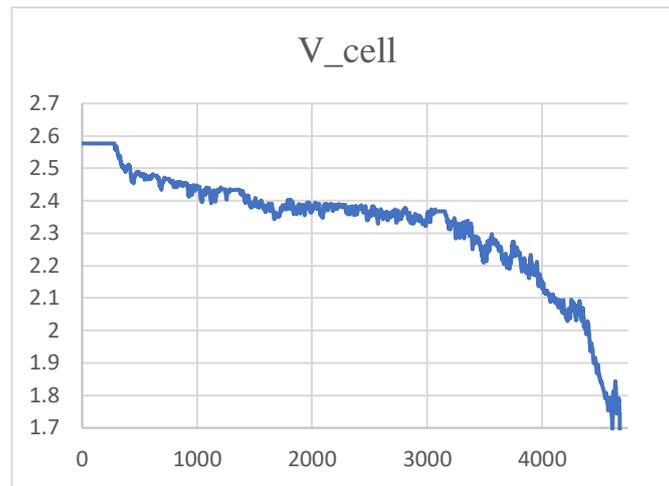


Ilustración 71. Voltaje de la celda. Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 70 y la Ilustración 71 muestran, respectivamente, la intensidad y el voltaje de la celda durante el ciclo. Al tratarse de un ciclo real, hay momentos en los que la intensidad se hace negativa, el voltaje aumenta y la batería se carga ligeramente (obsérvese la Ilustración 73). Esto ocurre debido a la frenada regenerativa.

La Ilustración 72 muestra la evolución del ratio de descarga. En ella se puede observar que generalmente el ciclo ocurre a ratios de descarga cercanos a 1C, pero que también hay momentos de carga de la batería o de descarga a mayor velocidad (ratios de hasta 4C).

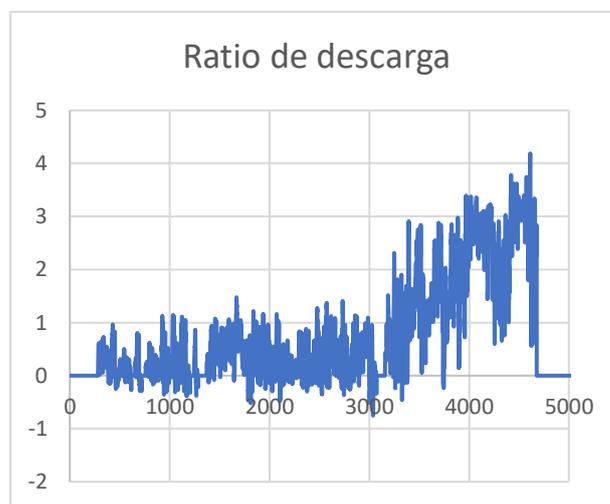


Ilustración 72. Evolución del ratio de descarga. Fuente: Elaboración propia

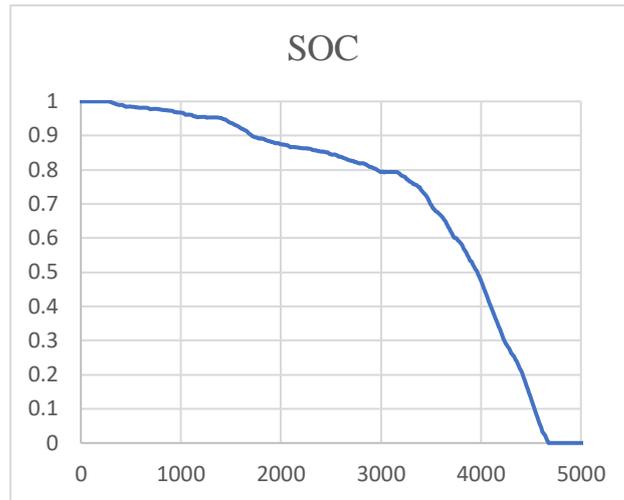


Ilustración 73. Estado de carga (SOC) de la batería. Evolución del ratio de descarga. Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 74 muestra a la izquierda el calor generado por el total de las celdas y a la derecha la parte de dicho calor que es evacuado por el fluido refrigerante.

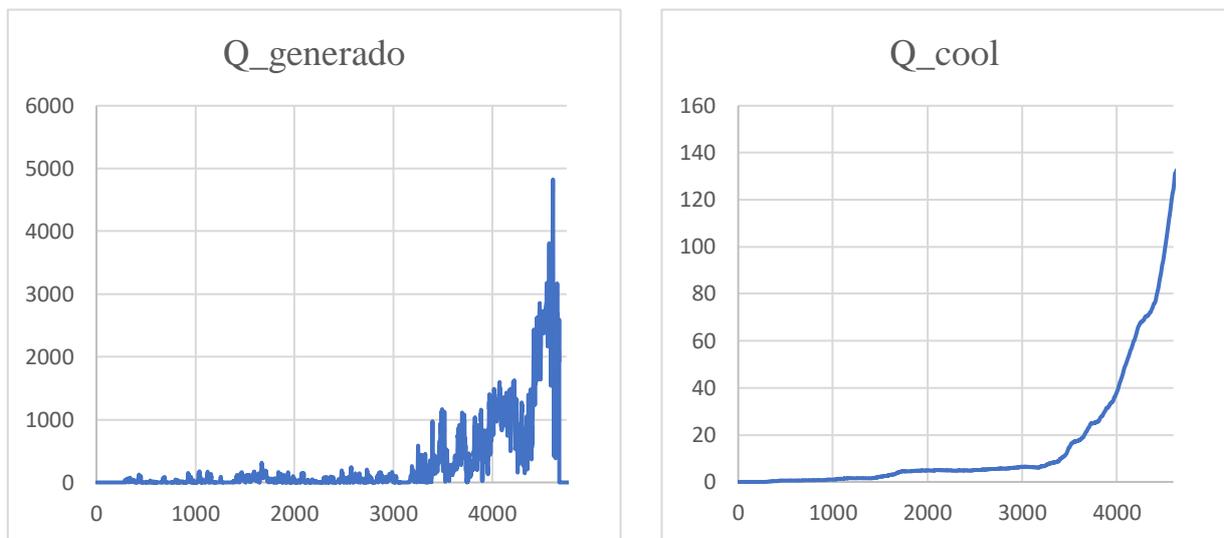


Ilustración 74. Calor generado por el paquete de baterías y calor cedido al refrigerante. Fuente: Elaboración propia

La distribución de temperaturas mostrada en la Ilustración 75 resulta lógica: La temperatura de la Zona Activa es la mayor de todas al tratarse de la zona de la celda en la que se genera el calor. La temperatura del resto de paredes de la celda disminuye conforme aumenta la distancia al nodo central y el refrigerante mantiene su temperatura por debajo de la de todos los nodos.

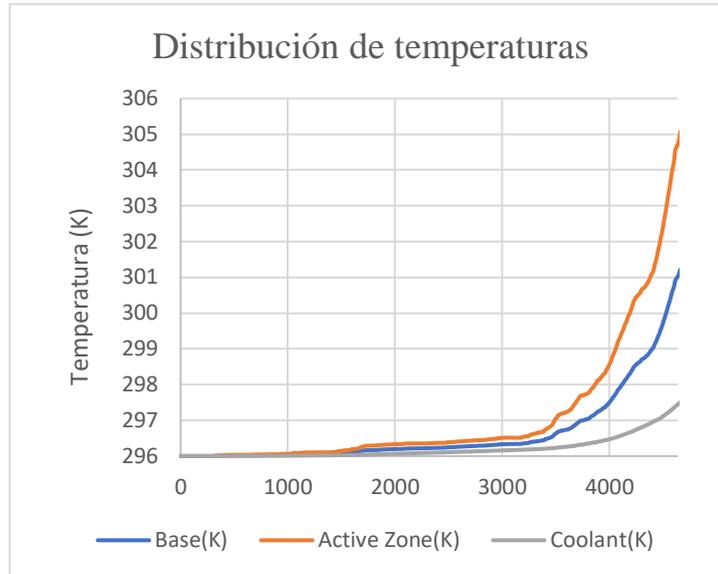


Ilustración 75. Evolución de las temperaturas del nodo Base, Zona Activa y Coolant. Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado una metodología para el estudio de los sistemas de gestión térmica en baterías. Para ello, en primer lugar, se implementó un modelo eléctrico basado en un circuito equivalente y un modelo térmico nodal para la celda objeto de estudio. Además, se implementó un modelo termohidráulico del circuito de refrigeración del pack de baterías en el software VEMOD. Posteriormente al desarrollo del modelo de la batería, se procedió a realizar diversos estudios paramétricos a ratios de descarga constantes, de 1C, 3C o 6C, a lo largo de todo el proceso de descarga variando ciertas condiciones de contorno. Respecto al caudal, se consideraron tres posibilidades: 0'5 l/s, 1 l/s y 2'5 l/s. En cuanto a la temperatura del refrigerante, se estudiaron las temperaturas de 283 K y 293 K. Por lo que respecta a la interacción con el ambiente, se comparó un sistema adiabático con uno no adiabático. En lo que al fluido refrigerante se refiere, se consideró el uso de agua glicolada como fluido de referencia, estudiando el efecto que provoca la adición de nanopartículas de óxido de titanio en pequeñas concentraciones. Por último, en relación con las superficies de la celda prismática en contacto con este fluido, se consideraron dos diseños distintos, uno de ellos con refrigeración por la base de la celda y el otro con refrigeración por los laterales de esta.

Observando los resultados extraídos, se ha podido concluir que el uso de nanofluidos y la variación del caudal trasegado no generan un impacto determinante para el buen funcionamiento del pack de baterías. Ahondando en la anterior afirmación, la variación del caudal provoca un gran impacto en el coeficiente de película y en la conductancia. Sin embargo, ello no se traduce en una disminución de la temperatura de la batería. Igualmente, en el estudio de nanofluidos, la adición de nanopartículas es capaz de incrementar en cierta medida el coeficiente de película y la conductancia, pero no de disminuir la temperatura de la batería. La medida que ha resultado más efectiva y ha provocado importantes descensos en las temperaturas de los nodos gracias al gran incremento de la conductancia ha sido el diseño de sistema de refrigeración por las caras laterales de la celda en vez de a través de su base. Sentado lo anterior, puede concluirse que la celda objeto de estudio tiene baja conductividad hacia el exterior, especialmente entre el nodo central (Zona Activa) y el nodo Base. Respecto a las simulaciones a mayores ratios de descarga, se puede concluir que la batería siempre se encuentra en el rango óptimo de temperaturas de

funcionamiento de una batería de tipo ion-litio, a pesar de que la descarga rápida incrementa en gran medida la temperatura y el calor generado. Por último, los resultados de la simulación del ciclo real muestran una distribución lógica de las temperaturas de los nodos, siendo la temperatura del nodo generador de calor la superior y la temperatura del fluido refrigerante la menor de todos los nodos.

Como desarrollo futuro del presente Trabajo Fin de Grado, existe un gran abanico de posibilidades y de líneas de trabajo. Sería conveniente mejorar el modelo de batería existente con medidas como aumentar el número de nodos del modelo térmico. Asimismo, la profundización en el estudio de nuevos sistemas de gestión térmica de baterías contribuiría a la optimización del funcionamiento de dicho elemento. Sentado lo anterior, se señala la posibilidad de ampliar los resultados de este trabajo bien mediante la realización de simulaciones de ciclos RDE distintos, bien mediante la consideración de celdas de química o geometría diferente, o, por último, considerando la posibilidad de valorar el uso de otras nanopartículas diferentes del óxido de titanio.

7. REFERENCIAS

[1] Nicolas Damay, Cristophe Forgez, Marie-Pierre Bichat and Guy Friedrich (2015), *Thermal modeling of large prismatic LiFePO₄/graphite battery. Coupled thermal and heat generation models for characterization and simulation* in “Journal of Power Sources”.

[2] Anna Tomaszewska, Zhengyu Chu, Xuning Feng, Simon O’Kane, Xinhua Liu, Jingyi Chen, Chenzhen Ji, Elizabeth Endler, Ruihe Li, Lishuo Liu, Yalun Li, Siqu Zheng, Sebastian Vetterlein, Ming Gao, Jiuyu Du, Michael Parkes, Minggao Ouyang, Monica Marinescu, Gregory Offer and Billy Wu (2019), *Lithium-ion battery fast charging: A review* in “eTransportation”.

[3] Yuanwang Deng, Changling Feng, Jiaqiang E, Hao Zhu, Jingwei Chen, Ming Wen and Huichun Yin (2018), *Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review* in “Applied Thermal Engineering”.

[4] Shashank Arora (2018), *Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies* in “Journal of Power Sources”.

[5] Zhonghao Rao and Shuangfeng Wang (2011), *A review of power battery thermal energy management* in “Renewable and Sustainable Energy Reviews”.

[6] Antonio Jose Torregrosa, Alberto Broatch, Pablo Olmeda and Amin Dreif (2020), *Assessment of the improvement of internal combustion engines cooling system using nanofluids and nanoencapsulated phase change materials* in “International Journal of Engine Research”.

[7] Yu W, France DM, Timofeeva EV, Singh D and Routbort JL (2012). *Comparative review of turbulent heat transfer of nanofluids*. Int J Heat Mass Tran.

[8] Yu W and Choi SU (2004). *The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a reno- vated Hamilton-Crosser model*. J Nanopart Res.

[9] PEM study by RWTH Aachen University (2018). https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabdqbtl.

[10] Qian Wang, Bin Jiang, Bo Li and Yuying Yan (2016), *A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles* in “Renewable and Sustainable Energy Reviews”.

[11] Jaewan Kim, Jinwoo Oh and Hoseong Lee (2019), *Review on battery thermal management system for electric vehicles* in “Applied Thermal Engineering”.

[12] Wiautomation (n.d.). https://es.wiautomation.com/siemens/variadores-motores-proteccion-de-circuitos/simotics/1LE15031EB434AA4?utm_source=shopping_free&utm_medium=organic&utm_content=ES137667&gclid=CjwKCAjw3MSHBhB3EiwAxcaEu_ZyC4i3TZR6OcuQIGbR20Smd1E_f-8jcjgQz8kj16nE44DWzBZ_pxo.

[13] Direct Industry (n.d.). <https://www.directindustry.es/prod/telwin/product-55497-2034161.html>

[14] International Energy Agency (2019). https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb3b2e8d-28e0-47fd-a8ba-160f7ed42bc3/CO2_Emissions_from_Fuel_Combustion_2019_Highlights.pdf



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Universitat Politècnica de València
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO

Autor: Julia Sánchez Pérez

Tutor: Pablo César Olmeda González

Valencia, septiembre de 2021

PRESUPUESTO

El presupuesto del proyecto abarca los gastos derivados del personal involucrado en el proyecto y los gastos de los equipos, herramientas y software necesarios para la realización del mismo.

GASTOS DE PERSONAL

Categoría	Dedicación (h)	Tasa horaria (€/h)	Coste (€)
Estudiante	300	20	6000
Doctorando	100	40	4000
Director del proyecto	20	60	1200
TOTAL			11200

Tabla 1. Gastos de personal del proyecto

EQUIPOS Y LICENCIAS DE SOFTWARE

Categoría	Unidades	Coste (€)
Ordenador portátil	1	1400
Licencia Office 365	1	100
Licencia MATLAB	1	800
Licencia VEMOD	1	0
Licencia Visual Studio	1	400
TOTAL		2700

Tabla 2. Gastos de equipos y licencias de software del proyecto.

PRESUPUESTO GENERAL

Categoría	Coste (€)	
Gastos de personal	11200	
Equipos y licencias	2700	
SUBTOTAL		13900
Beneficio industrial (15%)		2085
TOTAL		15985

Tabla 3. Presupuesto general del proyecto

Así pues, el presupuesto total del proyecto asciende a QUINCE MIL NOVECIENTOS OCHENTA Y CINCO euros.