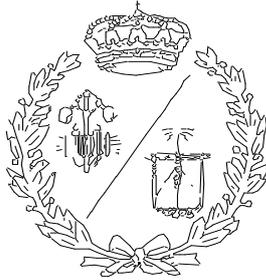


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Trabajo Fin de Grado***

**ANÁLISIS TÉRMICO DEL SISTEMA DE  
REFRIGERACIÓN DE UN MÓDULO DE  
BATERIAS MEDIANTE CFD  
(THERMAL ANALYSIS OF THE COOLING  
SYSTEM OF A BATTERY MODULE BY USING  
CFD)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

**Autor: Miguel Agüeros Díez**

**JULIO - 2021**



## RESUMEN

El rumbo tomado por industria del automóvil, para afrontar la actual situación climática y social, es la electrificación de los medios de transporte mediante el uso de motores eléctricos y baterías; sin embargo, el uso de batería genera complicaciones en el desarrollo tecnológico, la gestión térmica y su posterior reciclaje. El problema de la gestión térmica es producido por la pérdida de capacidad cuando alcanzan una temperatura fuera del intervalo óptimo, pudiendo existir riesgo de explosión en temperaturas extremas. Por ese motivo, el desarrollo de un sistema de refrigeración de las baterías es fundamental para el correcto funcionamiento de estas.

En el presente trabajo de fin de grado tiene como objetivo analizar la transferencia de calor entre el sistema de refrigeración y un módulo de baterías de un vehículo eléctrico, mediante programas de CFD (ANSYS Fluent).

En primer lugar, se realiza una introducción acerca al mundo de las baterías y su sistema de refrigeración. Además, se explican una serie de conceptos teóricos sobre la transferencia de calor y la dinámica de fluidos, necesarios para el desarrollo del proyecto. También, se presentará brevemente la dinámica de fluidos computacional (CFD).

A continuación, se propone un módulo de baterías de ion-litio formado por 56 celdas y un sistema de refrigeración líquida indirecta. Más adelante, se establecen unas hipótesis y condiciones de trabajo, que se tomarán de referencia durante las simulaciones.

Por último, se estudian los resultados obteniendo conclusiones prácticas, que permiten determinar parámetros y condiciones sobre el módulo de baterías.

## **ABSTRACT**

The route taken by the automobile industry to deal with the current climatic and societal context, is the electrification of the means of transport through the use of electric motors and batteries; however, the use of batteries creates complications in respect of technological development, heat/ temperature regulation and subsequent recycling. The problem with temperature regulation is due to the loss of capacity when a temperature outside the optimum range is reached, causing a potential risk of explosion at extreme temperatures. For this reason, the development of a battery cooling system is essential for the correct operation of the batteries.

The objective of this final degree thesis is to analyse the heat transfer between the cooling system and a battery module of an electric vehicle, using CFD programs (ANSYS Fluent).

Firstly, an introduction to the world of batteries and their cooling system is provided. In addition, an explanation of a range of theoretical concepts about heat transfer and fluid dynamics, which are necessary for the development of the project is given. Furthermore, a brief overview of computational fluid dynamics (CFD) is presented.

The thesis develops to propose a lithium-ion battery module consisting of 56 cells and an indirect liquid cooling system. Several hypotheses and working conditions are then suggested, which will be used as a reference point during simulated exercises. Finally, the results are evaluated, resulting in practical conclusions that serve as defining parameters and conditions concerning the battery module.

## ÍNDICE

1. OBJETIVO .....	9
2. INTRODUCCIÓN .....	10
3. BATERÍA.....	13
3.1 CONCEPTOS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS.....	14
3.3 HISTORIA .....	15
3.4 CLASIFICACIÓN .....	17
4. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE BATERÍAS ION-LITIO.....	23
5. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS .....	25
5.1 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO .....	27
6. CONCEPTOS TEÓRICOS.....	29
6.1 TRANSFERENCIA DE CALOR .....	29
6.1.1 ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR .....	32
6.2 MECÁNICA DE FLUIDOS .....	33
6.2.1 ECUACIONES NAVIER-STOKES .....	33
6.2.2 CAPA LÍMITE, FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO .....	36
6.2.3 CAPA LÍMITE TÉRMICA.....	38
7. DÍNAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) .....	39
7.1 MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS (FVM).....	40
7.2 RESIDUOS Y CONVERGENCIA DE LA SOLUCIÓN .....	41
8. MEMORIA .....	42
8.1 GEOMETRÍA.....	43
8.2 MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA BATERIA .....	47
8.3 MODELO DEL LÍQUIDO REFRIGERANTE .....	51
8.3 MODELO DEL FLUJO EXTERNO.....	53
8.4 CONDICIONES DE CONTORNO.....	53
8.5 MALLADO .....	55

8.5.1 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE ZONA .....	60
8.6 RESULTADOS .....	61
8.6.1 RESIDUOS .....	61
8.6.1 TUBO Y LÍQUIDO DE REFRIGERACIÓN.....	62
8.6.1 CELDAS DE BATERÍA .....	72
8.7 CONCLUSIÓN.....	78
ANEXOS .....	81
BIBLIOGRAFÍA .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1:** Esquema de una celda electroquímica.
- Figura 2:** Esquema de una Pila Daniell.
- Figura 3:** Esquema del proceso de carga y descarga de una batería de litio.
- Figura 4:** Tabla de características de los distintos tipos de batería.
- Figura 5:** Gráfica de descarga de una batería (Ion-Litio) a distintas temperaturas.
- Figura 6:** Gráfica de retención de capacidad a distintas temperaturas.
- Figura 7:** Comparativa de la conductividad térmica y la capacidad calorífica.
- Figura 8:** valores de referencia de los distintos coeficientes de convección ( $h_c$ ).
- Figura 9:** Capa limite. Espesor de capa limite ( $\delta$ ).
- Figura 10:** Evolución de la capa limite y del comportamiento del fluido.
- Figura 11:** Perfil de velocidades de flujos desarrollados laminar y turbulento.
- Figura 12:** Capa limite térmica en una placa isotérmica.
- Figura 13:** Mallas con nodos centrados en los vértices y en las caras.
- Figura 14:** Apartados de ANSYS Fluent.
- Figura 15:** Módulo de batería Tesla Model S P85D.
- Figura 16:** Impresión en 3D del tubo de refrigeración micro canalizados.
- Figura 17:** Comparación de propiedades entre aluminio y cobre.
- Figura 18:** Esquema configuración tubo de refrigeración Tesla S.
- Figura 19:** Diseño del módulo de referencia en CATIA.
- Figura 20:** Gráfica de la generación de calor respecto DOD, a distintas corrientes.
- Figura 21:** Circuito eléctrico equivalente del modelo EMC.
- Figura 22:** Gráfica de la generación de calor en el punto de trabajo de referencia.
- Figura 23:** Características del líquido refrigerante (etilenglicol al 50%).
- Figura 24:** Plano del perfil del tubo de refrigeración.
- Figura 25:** Configuración del modelo de turbulencia  $k - \epsilon$ .
- Figura 26:** Zonas frontera del modelo estudiado.
- Figura 27:** Configuración del comando 'Inflation'.
- Figura 28:** Mallado empleando comando 'Inflation'
- Figura 29:** Mallado empleando el comando 'Face sizing'.
- Figura 30:** Mallado empleando el comando 'Contact sizing'.
- Figura 31:** Tabla de calidad del mallado basado en la asimetría.

**Figura 32:** Tabla de calidad del mallado basado en la calidad ortogonal.

**Figura 33:** Resultado sobre la calidad de mallado (asimetría y calidad ortogonal).

**Figura 34:** Mallado general de módulo y el tubo de refrigeración, con plano de corte.

**Figura 35:** Zonas definidas en el módulo.

**Figura 36:** Gráfica de residuos obtenidos en los cálculos del módulo de batería.

**Figura 37:** Distribución de temperatura en el exterior del tubo de refrigeración.

**Figura 38:** Distribución de temperatura en el interior del tubo de refrigeración.

**Figura 39:** Distribución de temperatura en los segmentos intermedios del tubo de refrigeración.

**Figura 40:** Distribución de temperaturas del líquido de refrigeración, en un plano horizontal.

**Figura 41:** Recta horizontal de análisis de temperaturas del fluido refrigerante.

**Figura 42:** Distribución de temperaturas en la recta 1.

**Figura 43:** Distribución de temperaturas en la recta 2.

**Figura 44:** Distribución de temperaturas en la recta 3.

**Figura 45:** Distribución de temperaturas del líquido de refrigeración, en un plano vertical.

**Figura 46:** Campo de velocidades del líquido de refrigeración, en un plano horizontal.

**Figura 47:** Campo de velocidades en la recta 1.

**Figura 48:** Campo de velocidades del líquido de refrigeración, en un plano vertical.

**Figura 49:** Distribución de presiones en el interior del tubo de refrigeración.

**Figura 50:** Distribución de temperaturas en las celdas de baterías.

**Figura 51:** Distribución de temperaturas en las celdas de baterías, en un plano horizontal.

**Figura 52:** Tabla de las temperaturas de la batería a distintas velocidades del refrigerante.

**Figura 53:** Evolución de la temperatura máxima y variación de temperaturas a distintas velocidades del refrigerante.

**Figura 54:** Distribución de temperaturas del líquido de refrigeración, en un plano horizontal (tubo de cobre).

**Figura 55:** *Distribución de temperaturas en las celdas de baterías, en un plano horizontal (tubo de cobre).*



## 1. OBJETIVO

El propósito de este trabajo consiste en resolver el fenómeno de transferencia de calor entre una batería y el sistema de refrigeración de un vehículo eléctrico, por el cual circula un líquido para mantener las celdas bajo unas condiciones óptimas.

Para alcanzar este propósito, se construirá un modelo considerando una serie de hipótesis con el fin de simplificar el problema y el costo computacional, pero intentando mantener la naturaleza del caso estudiado. Además, se hace hincapié sobre aspectos teóricos y parámetros que afecten de forma significativa sobre el estado de las baterías.

Cabe destacar que, el hallazgo de una solución exacta y rigurosa del modelo no es el objetivo de este trabajo. Por un lado, debido a la dificultad para llevar a cabo una validación de los resultados, al no disponer de los medios para conseguir los datos experimentales. Por otro lado, dada la complejidad que supone modelar el comportamiento térmico de una batería.

Por ello, este trabajo pretende ser una introducción en el uso de programas CFD (Dinámica de fluidos computacional) a través de una resolución de un problema real. Asimismo, busca establecer una base para futuros proyectos donde se dispongan de los medios necesarios para definir completamente las baterías y realizar su correspondiente validación.

Por último, se abordarán y aplicarán conocimientos adquiridos durante el Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales, sobre todo en asignaturas como Ingeniería Térmica, Mecánica de Fluidos, Termodinámica y Termotecnia.

## 2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se está produciendo un aumento en la concienciación social sobre el cambio climático. Esta tendencia, es global e internacional, como se puede ver en el Acuerdo de París, donde alrededor de 190 países se comprometieron a promover medidas para frenar la subida de la temperatura del planeta.

En consecuencia, los distintos sectores se están adaptando para reducir el impacto de sus actividades al medio ambiente. Uno de los sectores donde se está produciendo un mayor cambio, es el sector de la movilidad. Esto se debe a la presencia de motores de combustión interna en la mayoría de los medios de transporte, que generan compuestos químicos perjudiciales, como:

**-Monóxido de carbono (CO):** se generan en una combustión incompleta debido a la falta de oxígeno o demasiado combustible. Mayormente en motores de gasolina y de gran toxicidad para las personas.

**-Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):** al igual que el compuesto anterior, se produce en mayor cantidad en motores de gasolina, pero con menor toxicidad. En elevadas concentraciones, provoca un aumento de efecto invernadero y, consecuentemente, un aumento de temperaturas.

**-Hidrocarburos (HC):** hidrocarburos consumidos parcialmente que generan irritación en piel y pulmones. Presente en ambos tipos de combustible.

**-Benzopirenos:** se trata de partículas sólidas producidas durante la combustión de diésel, ya que este contiene un mayor número de impurezas. Estas partículas, son las causantes de las boinas de humo presentes sobre las grandes ciudades, y siendo perjudiciales para el ser humano, ya que aumentan las probabilidades de desarrollar enfermedades.

**-Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>):** los combustibles en su composición tienen pequeñas cantidades de azufre que, tras la combustión, dan lugar a este tipo de gases. Son los causantes de la contaminación de la lluvia, conocida como lluvia ácida.

**-Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>):** se producen cuando hay combustiones pobres de combustible a elevadas presiones. Pueden aparecer distintos tipos de óxidos de nitrógeno, algunos pueden reaccionar con la humedad del aire y dar lugar a ácido

nítrico (altamente corrosivo) o gases como el óxido nitroso, destructor de la capa de ozono.

Para la reducción o eliminación de su producción y, por tanto, de su impacto, se están tomando distintas alternativas:

- **Mejora del rendimiento termodinámico del motor**, ya que este se encuentra entre el 30-40%. Esta acción provoca que se emitan menos gases, pero de mayor impacto para el planeta. Por todo esto, es necesario incorporar en los vehículos nuevos elementos como un catalizador, un filtro antipartículas o sistema AdBlue. Este último, se trata de un sistema situado en el tubo de escape, que disipa una disolución de urea (33%), que hace reaccionar los óxidos de nitrógeno para generar gases inocuos.
- **Incorporación de un motor híbrido o dos motores (motor térmico y motor eléctrico)**. El motor híbrido permite utilizar tanto gasolina como gas natural comprimido (GNC) o gas licuado del petróleo (GLP).  
En cambio, la utilización de los dos motores (eléctrico y térmico) permite la posibilidad de trabajar de manera conjunta o separada. Además, poseen una batería destinada para el motor eléctrico, que puede ser recargada por el propio motor térmico o mediante su conexión a la corriente.
- **Sustitución completa por motores eléctricos**, generando cero emisiones, pero introduciendo una serie de inconvenientes como la autonomía o el tiempo de carga. Sin embargo, aporta una serie de prestaciones como el escaso mantenimiento, la entrega inmediata de par o la nula contaminación acústica.

Aunque se piense que la movilidad eléctrica se trata de algo propio de las últimas décadas, en realidad se remonta a finales del siglo XIX. Cabe destacar, que antes de la aparición de los automóviles de combustión, se desarrollaron primero los vehículos eléctricos. Durante la crisis del petróleo, en los años setenta, se intentó propulsar los automóviles de manera eléctrica usando baterías de plomo. A pesar de este acontecimiento, este tipo de automóviles no consiguieron una gran comercialización, debido a la falta de desarrollo en la tecnología en la gestión y capacidad de las baterías. También, influyó la producción en masa de las automóviles de gasolina y el bajo precio del petróleo, apartando totalmente al eléctrico.

En estos días, la demanda de vehículos eléctricos está aumentando drásticamente, debido un avance tecnológico en las baterías. A medida que número de ventas crece, también son mayores las exigencias de los consumidores, sobre todo en aspectos como la autonomía, la seguridad, el precio o el tiempo de carga en comparación con los de combustión interna.

### 3. BATERÍA

Una batería eléctrica se trata de un dispositivo formado por dos o más celdas electroquímicas, que permiten transformar la energía química almacenada en su interior en electricidad. Por otro lado, se denomina pila, al dispositivo que tiene una única celda.

Las celdas están formadas por dos electrodos: cátodo y ánodo, siendo el polo negativo y el polo positivo respectivamente durante un periodo de descarga. Estos elementos se encuentran sumergidos en una sustancia cuya composición tiene iones libres (electrolito) y, de esta manera, se establece un puente salino entre ambos polos. En su interior, dependiendo de la batería, se producen reacciones de oxidación-reducción de distintas sustancias químicas. Durante la reacción, un material se oxida (ánodo) mientras que otro se reduce (cátodo) y es capaz de alimentar un circuito eléctrico externo, debido a la diferencia de potencial entre polos.

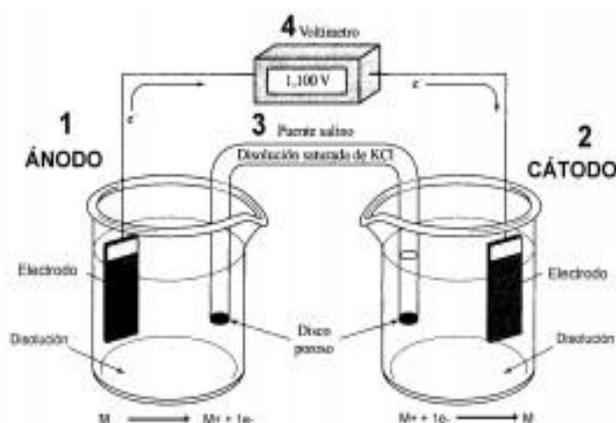


Figura 1: Esquema de una celda electroquímica [1].

### 3.1 CONCEPTOS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS

**Tensión nominal:** potencial eléctrico que puede suministrar (Voltios, V)

**Intensidad máxima de carga/descarga:** corriente máxima a la que se puede cargar o descargar una batería para que no se vea afectada ni su integridad ni su vida útil.

**Capacidad nominal:** intensidad que puede aportar, a lo largo del tiempo, cuando se le aplica la tensión nominal bajo una temperatura determinada (Amperios hora, Ah).

En la documentación informática de la batería, es frecuente encontrar la rapidez de carga o descarga admitida expresada como 1C, 2C, 10C etc. El número que precede indica el amperaje de carga o descarga respecto a la capacidad nominal de la batería. Por ejemplo, una batería de una capacidad nominal de 1000mAh si se descarga 2 A en una hora, se descarga a 2C).

**Resistencia interna:** resistencia propia de la celda a la corriente.

**Energía:** cantidad de energía capaz de suministrar una batería durante el tiempo. Resultado del producto de la capacidad y la tensión aplicada (vatios-hora, WH).

**Densidad específica:** relación entre la energía que es capaz de almacenar y la propia masa de la batería (WH/Kg).

**Densidad de energía:** relación de la energía almacenada por una batería y su volumen (WH/l).

**Rendimiento:** relación entre la energía eléctrica necesaria para cargarse y la energía eléctrica aportada al descargarse (Porcentaje, %). La diferencia de energía es la emitida en forma de calor hacia el exterior.

**Estado de carga (SOC):** capacidad disponible de la batería en función de la capacidad nominal.

**Estado/Profundidad de descarga (SOD/DOD):** capacidad extraída de una batería en función de su capacidad (parámetro complementario con SOC).

**Ciclos de carga-descarga:** rango de ciclos de carga-descarga que podrá soportar la batería a lo largo de su vida útil, momento que sus prestaciones se encuentran por debajo de unos límites preestablecidos.

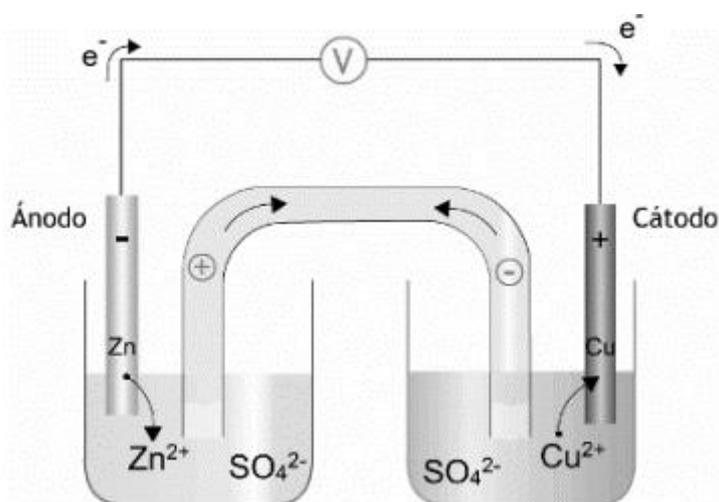
**Factor de autodescarga:** porcentaje de pérdida de carga que se produce en la batería en un determinado tiempo (%), ya que no son capaces de mantenerla de forma indefinida.

**Efecto memoria:** fenómeno que reduce la capacidad de la batería, al haber sido descargadas de forma incompleta, debido a la formación de cristales en su interior.

Dependiendo del tipo de baterías, se ven más o menos afectadas por este fenómeno, por ejemplo, las baterías de ion-litio presentan una mayor resistencia a este efecto [2] [3].

### 3.3 HISTORIA

La primera pila de la historia apareció en 1800, gracias al italiano Alessandro Volta, formada por discos intercalados de cobre y cinc, separados cada par de discos por un papel humedecido por una disolución salina. Se denominó pila voltaica y era capaz de proporcionar electricidad, a través de un hilo metálico unido a los discos. Dos años más tarde, Johann Ritter desarrolló, de manera experimental, la primera pila recargable (pila Ritter) que estaba construida a partir de discos de cobre y cartón humedecido con cloruro sódico. Durante los años siguientes, se fueron creando mejoras sobre la pila de Volta, como la pila de William Robert Grove, que proporcionaba una mayor potencia, o la inventada por Daniell (evita la acumulación de hidrogeno), que fue la primera que se empleó de manera práctica en telégrafos, teléfonos y timbres.



*Figura 2: Esquema de una Pila Daniell.*

La investigación de nuevos elementos químicos para la elaboración de baterías, a finales del siglo XIX, provocó la aparición de la pila de cinc-dióxido de manganeso ('pila seca', emplea pasta en vez de líquido como electrolito) y pila de zinc-carbono, siendo esta última bastante económica.

Gastón Planté trabajó, durante la mitad del siglo XIX, en el desarrollo de las baterías de plomo y estaban formadas por un conjunto de plomo, ácido sulfúrico y dióxido de plomo. Este tipo de baterías se caracterizó porque era capaz de reutilizarse durante varios ciclos, propiedad que no tenía la pila propuesta por Volta. Poco a poco, se han seguido mejorando y desarrollando sus propiedades hasta la actualidad.

A principios del siglo XX, Waldemar Jungner comenzó a experimentar con baterías de níquel-cadmio y con una disolución de hidróxido de potasio. Posteriormente, Thomas Alva Edison sustituyó los electrodos de cadmio por hierro, haciendo que fuese más económica, pero debido a decremento de la efectividad en la reacción redox, se encuentra prácticamente extinta. Por el contrario, la presencia de cadmio hace que una vez haya acabado su vida útil, sea un residuo muy contaminante.

Lo que hoy en día se conoce con el nombre de pila alcalina, fue inventada por Lewis Urry en 1995. Ésta está formada por un polo positivo de dióxido de manganeso y un polo negativo de cinc sumergido en un polvo alcalino. Se caracteriza por una mayor autonomía respecto a las anteriores, de cinc-carbono.

Debido a la carrera espacial, desarrollada durante 1960, aparecieron las baterías de níquel-hidruro metálico, que eran empleadas en satélites. Se caracterizan por su alta capacidad de almacenamiento y gran resistencia cíclica, pero de gran peso. Por todo ello, se fueron desarrollando tecnología para hacerlas más ligeras y, de esta manera, comenzaron a sustituir a las baterías de difícil tratamiento de residuos, como las baterías de níquel-cadmio.

En 1970, el químico Stanley Whittingham, propuso por primera vez las baterías de ion-litio, intercalando los electrodos en capas que eran capaces de almacenar iones de litio en láminas de sulfuro de titanio. Se trataba de una batería de carga rápida, gran almacenamiento y menor tamaño, pero su gran inconveniente era la posibilidad de explotar. Esta situación se debía a la formación de dendritas de litio, que traspasaban el electrolito y llegaban hasta el cátodo, produciéndose un cortocircuito. Por esto último, John B. Goodenough introdujo un cátodo de óxido de cobalto, que

permita aumentar la seguridad de las baterías de litio. En 1999, Sony comercializó la primera batería de iones de litio recargable y sentó las bases de las baterías para alimentar dispositivos, que se emplean desde móviles o portátiles a automóviles eléctricos.

En la actualidad, se está trabajando para encontrar baterías que se adapten al paradigma presente, es decir, una menor generación de residuos contaminantes o almacenamiento de energía renovable (solar o eólica). Una de las líneas de investigación son las celdas de combustible, haciendo reaccionar hidrógeno almacenado con el oxígeno del aire, proporcionando electricidad, calor y agua. Otro camino son las baterías de flujo, cuyo principio de funcionamiento se basa en el almacenamiento de energía en electrolitos líquidos. Las principales ventajas son: su mínima degradación, su seguridad y su mayor capacidad energética [3].

### 3.4 CLASIFICACIÓN

Se puede hacer una primera clasificación de las baterías en función de capacidad para volver a ser cargadas una vez usadas, dividiéndose en:

**Primarias:** son aquellas baterías no recargables, debido que poseen una reacción electroquímica irreversible por medios eléctricos.

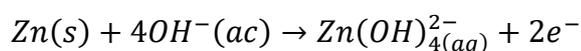
**Secundarias:** las baterías pueden ser recargadas a través de una corriente continua proveniente de una fuente externa, que permite regresar a la situación original.

También, se pueden clasificar dependiendo del material empleado en su composición, las más comunes actualmente son:

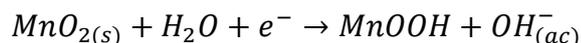
- **Batería/Pila alcalina:** baterías con celda primaria (no recargable) de gran autonomía, y por ello, empleada en muchos dispositivos móviles como mandos a distancia, radios, relojes, teclados inalámbricos o linternas.

La reacción redox se realiza entre el polvo cinc (Zn) y el dióxido de manganeso (MnO<sub>2</sub>), empleando como electrolito, una pasta de hidróxido de potasio (KOH).

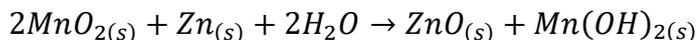
Semirreacción del ánodo (cinc):



Semirreacción de cátodo (hidróxido de potasio):



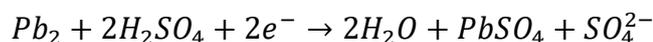
Reacción global:



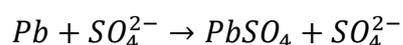
Al mismo tiempo, se producen reacciones parásitas, de forma paralela, que generan hidrógeno y provoca, en ocasiones, el aumento del volumen de la pila. Se caracterizan, aparte de por su gran duración, por proporcionar una tensión de 1,5 V y de forma muy estable.

- **Batería plomo-ácido:** este tipo de baterías recargables son las más empleadas junto a las de ion-litio. Está formada por dos placas que, en pleno estado de carga, una de ellas se encuentra recubierta con óxido de plomo ( $PbO_2$ ) y la restante, por plomo poroso ( $Pb$ ). Además, las placas se encuentran sumergidas en ácido sulfúrico, pudiendo estar en distintos estados. En el momento de la descarga, tanto el óxido de plomo (ánodo) como el plomo (cátodo) dan lugar a sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ).

Semirreacción del ánodo:



Semirreacción del cátodo:



Dependiendo del estado del electrolito, se separa a este tipo de batería en dos grupos con distintas especificaciones:

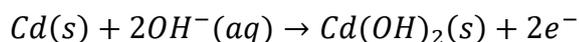
- Abiertas (líquido) (VLA, vented lead-acid): los gases producidos durante las reacciones son liberados al exterior, pudiendo formar hidrógeno en situaciones extremas. Se caracterizan por su capacidad de otorgar elevadas corrientes, una vida útil larga y por su uso exclusivo en posición horizontal, debido al estado líquido del electrolito. Suelen emplearse como baterías de arranque o iluminación.

- Selladas (gel o AGM) (VRLA, valve regulated lead-acid): este grupo de baterías no produce gases, ya que son recombinados durante las reacciones. En este caso, permite su colocación en diversas posiciones, pero con un periodo de vida menor respecto de las anteriores y un mayor costo respecto a las anteriores.

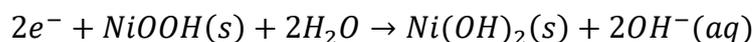
En rasgos generales, se trata de baterías económicas y de fácil fabricación, que generan aproximadamente una tensión por elemento de 2 V con una densidad específica de 30 WH/kg (baja) debido a la presencia del plomo. Además, es altamente contaminante por el plomo y el ácido sulfúrico, que se emplean en su composición [5].

- **Batería níquel-cadmio:** se trata de una batería recargable, formada por unos electrodos de hidróxido de cadmio e hidróxido de níquel, con un electrolito de hidróxido de potasio.

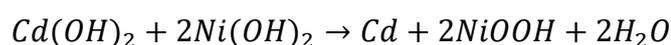
Semirreacción en el ánodo:



Semirreacción en el cátodo:



Reacción global:

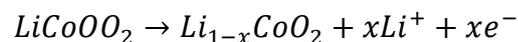


Es considerada unas baterías con una construcción robusta, impidiendo que se desprenda electrolito. Además, es capaz de proporcionar una tensión de manera casi constante a lo largo del ciclo de descarga, en cambio, se trata de una tensión inferior respecto de las anteriores (1,2 V). También, presenta un coeficiente de autodescarga reducido, permitiendo la retención de su carga durante un mayor periodo de tiempo.

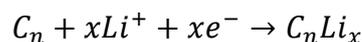
Cabe destacar, la imposibilidad de recargar a una tensión constante, debido a la baja impedancia interna que provocaría elevadas corrientes y consecuentemente, un incremento importante de la temperatura. Otra desventaja, es la presencia de un fuerte efecto memoria que imposibilita la descarga completa de la capacidad de la batería.

- **Batería níquel-hidruro metálico:** presenta muchas similitudes con las anteriores, pero se sustituye el cadmio por una aleación, que absorbe el hidrógeno. La aleación puede ser de distintos materiales, que pueden proporcionar una mayor capacidad, las más comunes son: cerio-cobalto, neodimio-cobalto o praseodimio-aluminio. Este cambio proporciona una densidad energética superior a las baterías níquel-cadmio y un menor impacto medioambiental, por la eliminación del cadmio. Tampoco se debe realizar el ciclo de carga de forma rápida debido a la baja impedancia y tiene un coeficiente de autodescarga, algo superior a las anteriores, aunque se ve afectado por la temperatura del entorno en el que se encuentre.
- **Baterías ion-litio (cobalto):** está tipo de baterías está constituida comúnmente por un cátodo de  $\text{LiCoO}_2$ , un ánodo compuesto de carbono (grafito) y un electrolito formado por una disolución de  $\text{LiPF}_6$  con carbonato de etileno (EC) y dimetil carbonato (DMC).

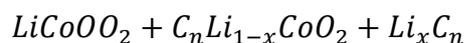
Semirreacción en el ánodo:



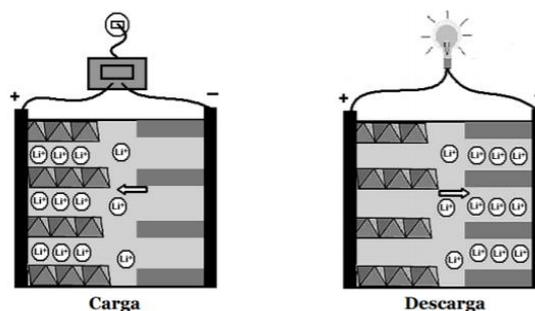
Semirreacción en el cátodo:



Reacción global:



Durante el proceso de carga, los iones de litio se mueven del ánodo y se intercalan en cátodo, aumentando la diferencia de potencial entre electrodos. En cambio, en la descarga, el ion litio atraviesa el electrolito hacia el ánodo, donde se produce la reducción, liberando electrones por el circuito externo. En definitiva, durante los ciclos de carga y descarga, los iones de litio se mueven entre los electrodos a la par que los electrones, a través del circuito externo.



*Figura 3: Esquema del proceso de carga y descarga de una batería de litio [4].*

Al emplearse litio, el metal más ligero y electronegativo existente (únicamente formado por tres protones), se reduce el peso por unidad de los dispositivos en comparación con los tipos de baterías, elevando su densidad energética. Además, tienen un efecto memoria nulo y una baja tasa de autodescarga, entorno al 5%. Destacando, su alta eficiencia tanto en la carga o la descarga, incluso cuando la intensidad de recarga es elevada y una tensión por celda elevada (3-4 V).

Por otro lado, tienen un precio bastante elevado debido al uso de cobalto, material escaso y de alto valor. Por este motivo, se está investigando con otros metales para sustituirlo y rebajar el precio, como el níquel, el manganeso o el hierro.

- **Baterías polímero de litio:** la diferencia del resto de batería de litio es la presencia de un electrolito de plástico, que impide el paso de electrones, debido a que se trata de un dieléctrico. El polímero tiene grosores de muy finos (aproximadamente de 1 mm) que habilita a la fabricación de baterías muy pequeñas.

Además, emplean una capa fina de aluminio como carcasa haciendo las más ligeras, pero tienen una alta resistencia interna, provocando un aumento de temperaturas en descargas muy fuertes.

Aunque antiguamente tenían un precio muy elevado que impedían su uso en cualquier aplicación, en la actualidad, debido al aumento en su desarrollo y producción, se han abaratado. Por ello, los vehículos eléctricos que emplean esta tecnología están bajando de precio y, en unos años, conseguirá equipararse a los de combustión.

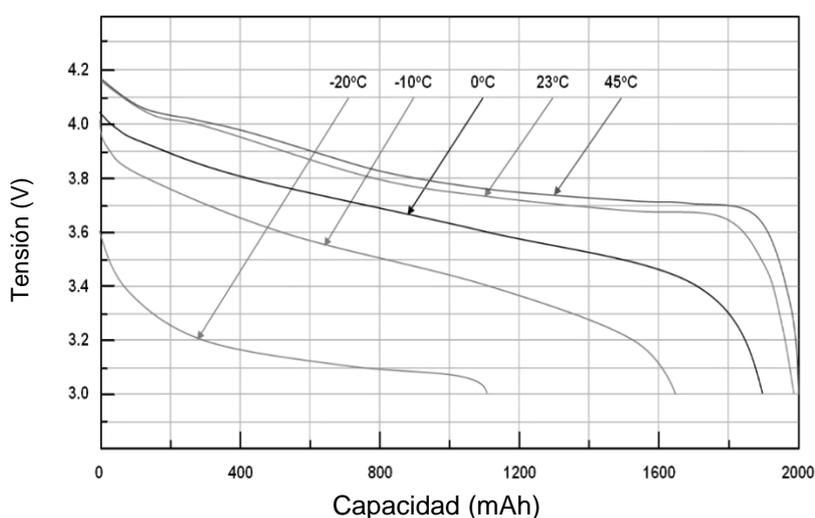
	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Autodescarga (%/mes)</b>	<b>Ciclos de vida</b>	<b>Eficiencia energética (%)</b>	<b>Energía Específica (WH/Kg)</b>	<b>Max descarga</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Alcalinas</b>	1.5	5-10	-	-	80-160	1C (cont.)	Calculadoras, equipos de sonido, juegos...
<b>Plomo- ácido</b>	2	2-20	500-800	70-80	30-40	1C (cont.)	Automóviles, vehículos eléctricos, sillas eléctricas...
<b>Níquel- cadmio</b>	1.2	10	1500- 2000	60-80	45-60	10C (cont.)	Herramientas portátiles, móviles, ordenadores portátiles...
<b>Níquel- hidruro metálico</b>	1.2	30	300-500	60-80	30-80	8C (cont.)	Cámaras fotográficas , móviles...
<b>Ion-litio (cobalto)</b>	3.6/ 3.7	<8	400-1200		100-250	1C (cont.)	Móviles, ordenadores portátiles, vehículos eléctricos...
<b>Ion-litio (Polímero)</b>	3.7	<5	>1000	92	130-200	20-45C (cont.) / 30-90C (pico)	Vehículos eléctricos, electrónica de consumo, herramientas industriales.

Figura 4: Tabla de características de los distintos tipos de batería [2].

## 4. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE BATERÍAS ION-LITIO

La temperatura es un factor muy importante para las baterías, debido su influencia en la vida útil y la capacidad de estas. Aunque la tecnología ha ido avanzando rápidamente en los últimos años, la exposición a temperaturas muy elevadas o bajas sigue suponiendo un gran problema para su rendimiento.

El intervalo de temperaturas óptimo para las baterías de litio en concreto se encuentra entre 10 y 30 °C, siendo 25 °C la temperatura ideal para la mayoría de las modelos. Una temperatura inferior a los -25 °C podría imposibilitar que se produjese la reacción en el interior de la celda y dejarla inutilizada.



*Figura 5: Gráfica de descarga de una batería (Ion-Litio) a distintas temperaturas [7].*

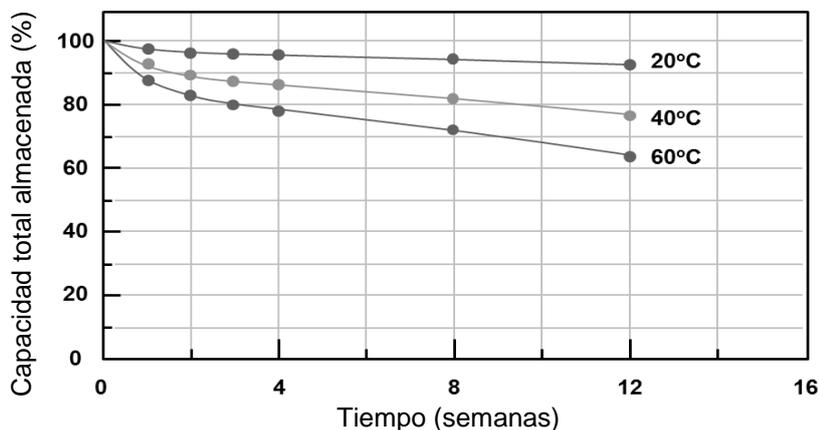
El rendimiento de una batería cuando se encuentra a -5 °C baja un 20%; en cambio, cuando alcanza una temperatura de 40 °C su rendimiento disminuye 15%, comportándose mejor con temperaturas más elevadas.

También hay que tener en cuenta la resistencia interna de la propia batería que genera calor cuando la atraviesa la corriente eléctrica, debido al Efecto Joule.

$$Q_{gen} = R_{int} \cdot I^2$$

Por tanto, cuanto mayor sea la rapidez con la que se produzca la descarga de intensidad mayor será el calor generado, aumentando la temperatura. La determinación de la distribución de temperaturas en las celdas se trata de un estudio complejo, donde se recurren a distintos modelos que se mencionaran posteriormente.

Además, la temperatura influye al coeficiente de autodescarga de la propia batería. Ante un entorno más cálido, donde se encuentren almacenadas, el índice de autodescarga va aumentando progresivamente. En consecuencia, las baterías deben ser almacenadas con una temperatura que suele estar predeterminada por el fabricante de estas.



*Figura 6: Gráfica de retención de capacidad a distintas temperaturas [7].*

En conclusión, el entorno y modo de empleo de la batería va a afectar a su comportamiento debido a los cambios de temperatura. Por ello, las baterías de los vehículos eléctricos suelen contar con un sistema de refrigeración que suavice los efectos de la temperatura y así alargar la vida útil de las mismas, ampliando el uso de este tipo de vehículos para todo tipo de climas y condiciones. Además, en una situación social donde se demanda tiempos de carga más cortos y mayores autonomías, exigiendo hasta el límite la integridad de la batería.

## 5. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

El sistema de refrigeración de baterías es una de las partes más importantes de un vehículo eléctrico, ya que permite controlar la temperatura de las baterías. Por consiguiente, es importante que no exista mucha diferencia de temperaturas entre las celdas que lo conforman (entre 5-7 °C), ya que puede acarrear distintos ratios de descarga/carga deteriorando el rendimiento de este. Además, un sobrecalentamiento de una celda podría suponer un peligro para los ocupantes, debido al riesgo de explosión.

Por ello, los fabricantes de vehículos centran gran parte de su esfuerzo en el desarrollo en el control de temperaturas de los módulos. Existen distintas opciones a la hora de refrigerar una batería:

Una opción es aprovechar el **cambio de estado de un material** para absorber el calor cuando este pasa de estado sólido a líquido. Cuando se produce un cambio de fase se puede absorber una gran cantidad de energía sin experimentar un gran aumento de temperatura; sin embargo, se produce al mismo tiempo un aumento en el volumen de material, reduciendo la practicidad de este tipo de refrigeración.

Cabe destacar otra desventaja de este sistema, como la dificultad para transferir el calor absorbido para volver cambiar de estado. Por tanto, este tipo de sistemas no es el idóneo para vehículos, pero si es empleado en el aislamiento de edificios.

Otra opción es la colocación de **aletas** entre las baterías, aumentando la superficie de transferencia de calor. Este proceso se emplea la conducción entre la aleta y la batería, y convección con el aire del entorno. Este sistema consigue el intercambio de calor necesario para cumplir los objetivos térmicos, pero implica un aumento considerable del peso total del vehículo. Este sistema es empleado en sistemas electrónicos y en la refrigeración adicional en vehículos de combustión, pero debido al ya de por sí pesado vehículo eléctrico añadirle más kilogramos no compensa los beneficios térmicos.

El sistema que tiene una complejidad menor es dirigir el **aire** para que circule por las baterías. La convección del aire no es muy eficiente y puede suponer un problema en climas donde las temperaturas del aire son elevadas. Aunque las primeras generaciones de vehículos eléctricos (Nissan LEAF o Renault ZOE) se decantaron

por este método, los más modernos optan por otras tecnologías como la refrigeración líquida.

Tanto la conductividad térmica como la capacidad calorífica son mayores en los refrigerantes líquidos (normalmente agua glicólica) que el aire, por lo que se consigue más eficiencia. Este sistema permite alcanzar los objetivos de mantener la temperatura en el intervalo adecuado y de manera uniforme, de una manera compacta y segura. Actualmente, la **refrigeración líquida** es la más usada en los vehículos eléctricos más modernos (Tesla, BMW o Mercedes).

	Agua (Líquido)	Aire
<b>Conductividad térmica</b> (W/mK)	47-48	0.02
<b>Capacidad calorífica</b> (J/m <sup>3</sup> K)	4,184 · 10 <sup>6</sup>	1213,36

*Figura 7: Comparativa de la conductividad térmica y la capacidad calorífica [8].*

Dentro de la refrigeración líquida hay dos opciones:

- **Directa:** en este caso, se expone de manera directa el refrigerante con la superficie de la batería. Actualmente, no se encuentra en ningún vehículo, debido a la complejidad del líquido refrigerante, que de tener una conductividad eléctrica muy baja (por ejemplo: agua ionizada) para impedir el paso de los electrones procedentes de las baterías.

Se encuentra en desarrollo, debido al problema mencionado, pero es sistema con mayor eficiencia ya que toda la superficie de la batería se encuentra expuesta a ser enfriada o calentada.

- **Indirecta:** el líquido refrigerante se hace pasar por un sistema de tuberías, metálicas en las zonas de contacto con las baterías (buena conductividad térmica). Este método es el más utilizado debido a su versatilidad de adaptarse a cualquier tipo celda y vehículo.

El líquido refrigerante empleado suele ser agua glicólica con aditivos, para impedir la corrosión del metal y anticongelante. Aun así, se trata del sistema más común de los vehículos eléctricos [9].

## 5.1 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

El sistema de refrigeración vehículo eléctrico no dista en gran medida del sistema propio de automóvil de combustión, pero si existen algunas diferencias significativas entre los componentes empleados por cada uno de ellos. A continuación, se mencionan los elementos más importantes que conforman la refrigeración:

- **Bomba hidráulica:** se trata de una bomba con un motor eléctrico interno, a diferencia de las empleadas en vehículos de combustión, que suelen ser mecánicas y accionadas por una correa unida al motor. En consecuencia, la bomba eléctrica es independiente del motor pudiendo ajustarse a las necesidades de cada instante, incluso llegar a apagarse.

La función principal es hacer circular el líquido refrigerante por todos los componentes necesarios mediante una turbina con funcionamiento centrífugo, y así conseguir un equilibrio térmico sin llegar a producirse sobrecalentamientos.

Las especificaciones de la bomba, como el caudal o la presión de servicio, vienen determinadas por las necesidades de enfriamiento del vehículo. Por tanto, mediante la simulación se puede dimensionar y obtener información en qué condiciones va a trabajar.

- **Radiador:** dispositivo formado por un conjunto de tubos de cobre, debido a sus excelentes propiedades conductivas, situados en paralelo junto con una serie de aletas para aumentar la superficie de transferencia de calor.

Normalmente, el líquido refrigerante caliente, procedente de las baterías, llega por la parte superior del radiador y va enfriándose gracias al aire exterior introducido por un ventilador. Finalmente, el líquido refringente sale de este componente a la temperatura óptima para el enfriamiento de las baterías.

La incorporación de un ventilador es de vital importancia, ya que permite seguir enfriando el refrigerante independientemente de la velocidad del vehículo. Esta funcionalidad, habilita el control de temperatura de las baterías cuando el automóvil se encuentra cargando y, gracias a ello, aumentar la velocidad de carga de las baterías sin sufrir daños.

- **Líquido refrigerante:** se trata de un fluido encargado del intercambio de calor con las baterías. Si se trata de un sistema de refrigeración indirecta, normalmente está compuesto por un anticongelante, denominado glicol (etilenglicol), disuelto en agua destilada. En cambio, si es una refrigeración directa, aumenta su complejidad ya que se encuentra en contacto directo con las baterías y, por tanto, debe tener propiedades dieléctricas. En la actualidad, este tipo de productos no se aplica en ningún vehículo, ya que se encuentran en desarrollo.
- **Vaso de expansión:** depósito de refrigerante que garantiza que el circuito se encuentra lleno en todo momento. Cuando el líquido refrigerante tiende a expandirse, en cambio, cuando se enfría se reduce su volumen, y gracias a este componente permite la entrada y salida de este fluido.
- **Battery Management System (BMS):** es un componente electrónico encargado de mantener las baterías bajo unas determinadas condiciones, para que no se vea reducida su vida útil ni supongan un peligro para los ocupantes del vehículo. Para ello, monitorizan las tensiones de carga y descarga de las baterías para que no sobrepasen el límite establecido por el fabricante. Además, regula el sistema de refrigeración evitando que se alcancen temperaturas superiores a las máximas, y no existan diferencias de temperaturas significativas en el interior del módulo.

A parte de las baterías, existen otros elementos que necesitan controlar la temperatura mediante refrigeración, como puede ser el motor eléctrico o componentes electrónicos. La mayoría de los sistemas de refrigeración, para mejorar la eficiencia del vehículo, suelen incorporar un circuito secundario que emplea el calor absorbido de las baterías para calentar aire y dirigirlo hacia el habitáculo de los pasajeros.

## 6. CONCEPTOS TEÓRICOS

### 6.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es un proceso de propagación del calor por distintos sistemas, que se encuentran a distintas temperaturas. Entendiendo el calor como el total de la energía cinética de todos los átomos o moléculas de una sustancia.

Cuando ambos sistemas alcanzan la misma temperatura, la transferencia de calor cesa y se llega a un equilibrio térmico.

Existen tres mecanismos de transferencia de calor:

- **Conducción:** se produce cuando hay una transferencia de calor sin transporte de materia entre dos cuerpos en contacto o en el interior del propio cuerpo, debido a la existencia de un gradiente de temperaturas. Es producto de la agitación térmica de fonones (sólidos no metálicos), electrones (sólidos metálicos) o moléculas (fluidos).

La ley de conducción de Fourier para materiales isótropos (conductividad térmica constante) para un caso unidimensional, indica que el flujo de calor es:

$$\dot{Q}_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

Siendo:

$$k = \text{conductividad térmica} \qquad \frac{\partial T}{\partial x} = \text{gradiente de temperaturas}$$

- **Convección:** transferencia de calor entre un cuerpo y un fluido en movimiento a distintas temperaturas, con transporte de materia. Además, si se produce bajo la presencia de un campo gravitatorio origina corrientes de convección.

Se trata de un problema sumamente complejo ya que es necesario realizar el estudio térmico y fluidodinámico, donde se tienen en cuenta distintos aspectos: la geometría del cuerpo, las características del fluido (viscosidad, densidad, conductividad, capacidad calorífica) y las temperaturas de ambos medios.

Por ello, se suele simplificar esta situación mediante la Ley de enfriamiento de Newton. A través de esta fórmula, se puede calcular de manera sencilla el flujo de calor entre la pared del cuerpo y el fluido en movimiento.

$$\dot{Q} = h_c A (T_{Pared} - T_{Fluido})$$

Siendo:

$$h_c = \text{coeficiente de convección (W/m}^2\text{K)} \quad A = \text{área de la pared (m}^2\text{)}$$

El coeficiente de convección o coeficiente de película ( $h_c$ ) representa la influencia de las distintas propiedades del fluido y la pared, anteriormente mencionadas. Su determinación, mediante métodos analíticos es compleja, pero se puede obtener estimaciones por medio de correlaciones de número adimensionales.

$$\text{Número de Nusselt}(Nu) = \frac{h_c L}{k}$$

Siendo:

$$k = \text{conductividad térmica (W/mK)} \quad L = \text{longitud equivalente (m)}$$

Para la obtención de manera exacta, es necesario recurrir a ensayos experimentales donde se reproduzcan las condiciones necesarias.

Se pueden distinguir dos tipos de convección: natural y forzada. En la convección **forzada**, el movimiento del fluido es producido por fuerzas exteriores, sin relación con la temperatura del fluido. En cambio, en la convección **natural**, el flujo es inducido por las fuerzas de empuje producto de las diferencias de densidades por las variaciones de temperatura del fluido (aumento de temperatura implica disminución de densidad).

<b>Coficiente de convección (W/m<sup>2</sup> K)</b>	
<b>Convección natural (Gas)</b>	2-25
<b>Convección natural (Líquido)</b>	50-1000
<b>Convección forzada (Gas)</b>	25-250
<b>Convección forzada (Líquido)</b>	50-20000
<b>Convección cambio de fase (Ebullición/Condensación)</b>	2500-100000

*Figura 8: valores de referencia de los distintos coeficientes de convección ( $h_c$ ) [10].*

- **Radiación:** consiste en la transferencia de calor en presencia o ausencia de un medio, a diferencia de los métodos anteriores. Los cuerpos que se encuentran a una temperatura superior a 0 K emiten radiación electromagnética, debido al movimiento térmico de las cargas contenidas en su interior (radiación térmica).

La superficie efectiva es la pared exterior del cuerpo, ya que la radiación emitida por el interior del cuerpo no consigue propagarse más allá de los límites del cuerpo. Por tanto, únicamente la superficie exterior es capaz de radiar a otros cuerpos.

La ley de Stefan-Boltzmann permite conocer la potencia máxima ( $W/m^2$ ) emisiva de un cuerpo a una determinada temperatura ( $T_{Superficie}$ ).

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{Superficie}^4$$

Siendo:

$\sigma$ = constante Stefan-Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$ )       $\varepsilon$ = emisividad

La emisividad ( $\varepsilon$ ) es una propiedad radiactiva que relaciona la radiación emitida por una superficie real y la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Se denomina cuerpo negro, aquel cuerpo que se comporta como un perfecto emisor, es decir, que emite la máxima potencia emisiva a una determinada temperatura ( $\varepsilon = 1$ ).

### 6.1.1 ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

La ecuación fundamental de la transferencia de calor permite conocer la distribución de temperaturas en un sistema. Para obtenerla, se supone un elemento diferencial, de un material isótropo, expuesto a un campo de temperaturas, al cual se aplica un balance de energía:

$$\dot{Q}_{Entrante} + \dot{Q}_{Saliente} + \dot{Q}_{Generado} = \dot{Q}_{Almacenado}$$

$$\dot{Q}_{Entrante} = \dot{Q}_x + \dot{Q}_y + \dot{Q}_z \quad \dot{Q}_{Saliente} = \dot{Q}_x + dx + \dot{Q}_y + dy + \dot{Q}_z + dz$$

$$\dot{Q}_{Generado} = \dot{q}_{Generado} \cdot dV \quad \dot{Q}_{Almacenado} = \rho dV C_p \frac{\partial T}{\partial t} = dm C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Siendo:

$\partial V$  = diferencial de volumen

$\rho$  = densidad

$\partial m$  = diferencial de masa

$C_p$  = capacidad calorífica

$\frac{\partial T}{\partial t}$  = distribución de temperaturas en el tiempo

Aplicando la Ley de conducción Fourier y algunas simplificaciones, permite llegar a la ecuación fundamental de la transferencia de calor:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \dot{q}_{Generado} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Para la resolución de la ecuación diferencial, son necesarias unas condiciones de contorno e iniciales junto con el calor generado. De esta manera, se podrá determinar la temperatura en cualquier punto del sistema estudiado.

Se encuentra referida a un sistema de coordenadas cartesianas pudiéndose modificarse a cilíndricas o esféricas, dependiendo de la geometría del problema que se vaya a estudiar.

Cabe explicar con más detalladamente, los términos de capacidad calorífica y conductividad térmica, debido a su importancia futura. El **calor específico** ( $C_p$ ) se define como la capacidad de energía térmica que es capaz de almacenar (SI (Sistema

Internacional):  $J/kg \cdot K$ ). Si se realiza el producto entre el calor específico y la densidad, se obtiene la cantidad de energía térmica capaz de almacenar por unidad de volumen (**capacidad calorífica**,  $J/m^3 \cdot K$ ). En cambio, la **conductividad térmica** es una propiedad física que mide la facilidad con la que un material conduce el calor (SI:  $W/m \cdot K$ ).

Por otro lado, la **difusividad térmica** ( $\alpha$ ), cociente entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica de un material, nos permite obtener la relación de calor conducido y calor almacenado por unidad de volumen ( $m^2/s$ ). En el caso, de los metales tienen una difusividad térmica muy elevada.

## 6.2 MECÁNICA DE FLUIDOS

La mecánica de fluidos es la rama de la física que las leyes de movimiento y los fenómenos que ocurren cuando interactúan con cuerpos sólidos. Se encuentra estrechamente relacionado con la transferencia de calor, ya que una modificación en la temperatura del fluido puede provocar la salida de reposo de este.

### 6.2.1 ECUACIONES NAVIER-STOKES

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones que permiten describir el movimiento de un fluido, que se encuentra en un determinado volumen ( $V$ ). El fluido debe ser newtoniano, es decir, que su viscosidad se mantenga constante para una determinada temperatura y presión.

La obtención de las ecuaciones se basa en el hecho de que el comportamiento dinámico de un fluido está gobernado por las siguientes ecuaciones de conservación:

- Conservación de la masa o **ecuación de continuidad**: principio fundamental de la mecánica de fluido que afirma que la masa no puede ser creada ni destruida, por lo tanto, la masa de un fluido en un determinado volumen se conserva en el tiempo.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \, dV + \oint_{\partial V} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS = 0$$

Siendo:

$\rho$ = densidad

$\vec{v}$ =vector velocidad

$t$ = tiempo

$\vec{n}$ =vector unitario

Aplicando el Teorema de Gauss sobre las integrales permite obtener la ecuación de continuidad en forma diferencial.

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

El primer término de la ecuación hace referencia a la variación temporal de la masa por unidad de volumen y el segundo, a el flujo convectivo de masa por unidad de volumen.

- Conservación del momento cinético o **ecuación de movimiento**: se hace referencia a la segunda ley de Newton, donde se afirma que la variación del momento es la consecuencia del sumatorio de todas las fuerzas que actúan sobre el fluido.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{v} dV + \oint_{\partial\Omega} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_V \rho \vec{f}_e dV - \oint_{\partial V} p \vec{n} dS + \oint_{\partial V} (\vec{T} \cdot \vec{n}) dS$$

Siendo:

$p$ = presión del fluido

$\vec{T}$ = tensor de tensiones

$\rho \vec{f}_e$ = conjunto de fuerzas por unidad de volumen

Empleando de nuevo el Teorema de Gauss (Teorema de divergencia), como la ecuación de conservación anterior, para transformarla en forma diferencial.

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

El primer término de la ecuación hace referencia a la variación temporal de cantidad de movimiento y el segundo, al flujo convectivo de cantidad de movimiento. El segundo miembro representa las fluctuaciones de cantidad de movimiento causadas por la diferencia de presiones, los efectos de las fuerzas másicas por unidad de volumen y los esfuerzos viscosos en el movimiento.

- **Conservación de la energía:** se trata de la primera ley de la termodinámica, que establece que la energía no puede ser creada ni destruida, solo se transforma.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E \, dV + \oint_{\partial V} \rho E (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS = \int_V (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + \dot{q}_h) \, d\Omega + \oint_{\partial V} k (\nabla T \cdot \vec{n}) \, dS + \oint_{\partial V} (\vec{T} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} \, dS$$

Siendo:

$E$  = energía total por unidad de masa

$\dot{q}_h$  = generación térmica por unidad de tiempo y masa del fluido

Aplicando el Teorema de Gauss, como en las ecuaciones de movimiento y continuidad, para obtener la forma diferencial.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (E \vec{v}) = \nabla \cdot (-p \vec{v}) + \nabla \cdot (\tau \cdot \vec{v}) - \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + \rho \dot{q}_h$$

El primer miembro de la ecuación hace referencia a la variación de energía total por unidad de volumen y el flujo convectivo de energía. Por otro lado, el segundo miembro expresa distintos trabajos por unidad de volumen y tiempo, además de la generación calor por unidad de volumen.

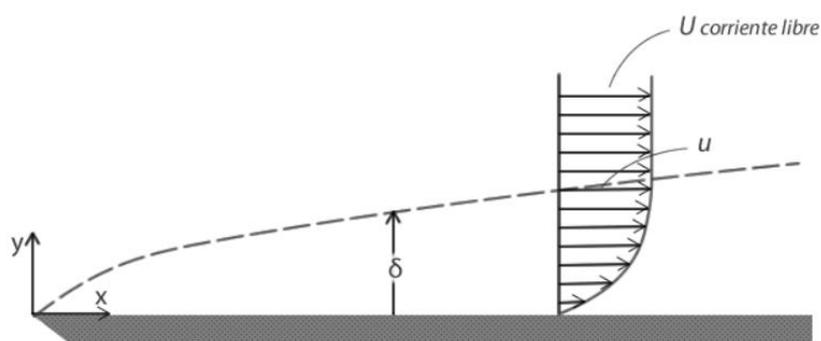
Las ecuaciones obtenidas se encuentran expresadas de forma integral y diferencial, cuyo uso depende del problema estudiado. Por un lado, la forma diferencial se emplea para la descripción de un campo de fluidos completo, en cambio, la forma integral de las ecuaciones suele aplicarse para la obtención de magnitudes resultantes en el volumen de control.

En la mayoría de los casos se pueden realizar ciertas simplificaciones que facilitan el análisis del fluido: condiciones de contorno estacionarias, reducción de dimensiones (bidimensionales), aproximando el comportamiento del fluido (fluido incomprensible, fluido no viscoso), simplificación de fuerzas sobre el fluido (hidrostático) o tomar aproximaciones basadas en valores medios [11] [12].

## 6.2.2 CAPA LÍMITE, FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO

Durante el análisis del comportamiento de un fluido es importante conocer la influencia de las fuerzas de inercia y viscosas en el movimiento.

La mayoría de los fluidos viscosos pueden ser estudiados en dos regiones distintas. La primera, denominada **capa limite**, se trata del flujo más cercano a la pared del sólido, donde es necesario considerar los efectos viscosos del fluido. El resto del flujo, que se encuentra fuera de la capa limite, los efectos viscosos son prácticamente despreciables y el fluido se puede estudiar como un flujo no viscoso. Es importante tener en cuenta, que el punto del fluido en contacto con la superficie su velocidad es nula.



*Figura 9: Capa limite. Espesor de capa limite ( $\delta$ ).*

Para la caracterización del flujo, que se encuentra en el interior de la capa limite, se emplea el **número de Reynolds**. Se trata de un número adimensional resultado de la relación de las fuerzas de inercia y viscosas de las ecuaciones de Navier-Stokes, resultando:

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu} = \frac{\bar{v} D}{\nu}$$

Siendo:

$\bar{v}$  = velocidad característica

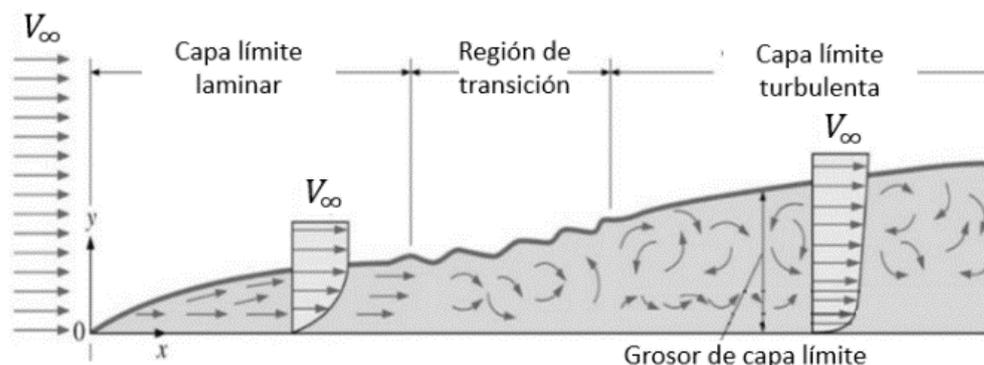
$D$  = longitud característica

$\rho$  = densidad del fluido

$\mu$  = viscosidad dinámica

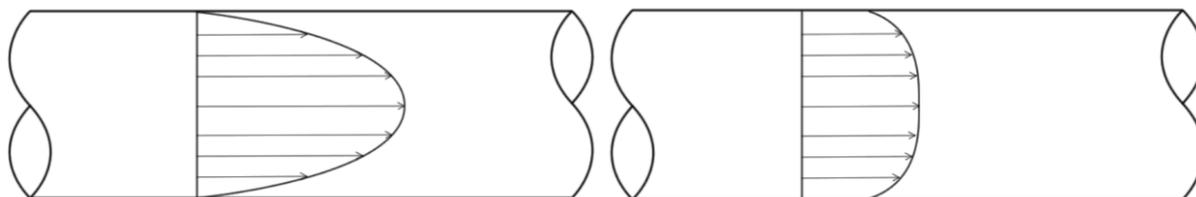
$\frac{\mu}{\rho}$  = viscosidad cinemática ( $\nu$ )

De forma experimental, se observa que para números de Reynolds menores de 2000-2400 (depende de diversos factores como la rugosidad de la pared, el gradiente de presión o la transferencia de calor) el movimiento del flujo es **laminar**, es decir, predominan las fuerzas de rozamiento. En cambio, para valores superiores del número de Reynolds, se denomina flujo **turbulento**, ya que tiene una mayor influencia las fuerzas de inercia respecto de las de rozamiento.



*Figura 10: Evolución de la capa límite y del comportamiento del fluido.*

En un tubo, se denomina flujo desarrollado cuando las velocidades describen un perfil de velocidades constante. Dependiendo del número de Reynolds, puede existir flujo desarrollado laminar o turbulento.



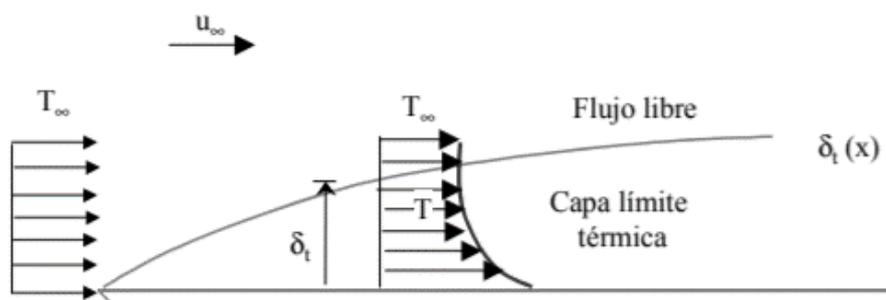
*Figura 11: Perfil de velocidades de flujos desarrollados laminar y turbulento.*

El flujo laminar describe un perfil parabólico, en cambio, el flujo turbulento es más uniforme en la zona central, debido al elevado transporte de cantidad de movimiento en sentido transversal [13] [14] [15].

### 6.2.3 CAPA LÍMITE TÉRMICA

En el análisis de fluidos, el estudio térmico es vital importancia debido a que, tanto los valores de la densidad como la viscosidad de flujos compresibles, se ven afectados por la temperatura.

Al mismo tiempo, que se desarrolla una capa límite de velocidad también se forma una capa límite térmica. Si se analiza para una pared isotérmica: el fluido en contacto directo con la superficie (velocidad nula) tendrá una temperatura en equilibrio igual a la de la superficie, mediante conducción. De forma análoga a las velocidades, las partículas van transmitiendo la energía de unas a otras, dando lugar a un perfil donde la temperatura evoluciona desde la que presenta el fluido externo hasta la temperatura propia de la superficie.



*Figura 12: Capa límite térmica en una placa isotérmica.*

## 7. DÍNAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics) es la rama de la mecánica de fluidos que emplea modelos matemáticos computacionales para el estudio de flujos fluidos, donde intervienen fenómenos de transferencia de calor, combustión o reacciones químicas, entre otros.

El principal objetivo es la resolución de las ecuaciones de conservación (Navier-Stokes) que determinan el estado termodinámico de un fluido, para unas determinadas condiciones. Además, la solución analítica no siempre es posible, debido a la complejidad de problemas reales, por ello, es necesario la utilización de métodos numéricos.

Un programa de CFD emplea métodos numéricos con el fin de aproximar funciones por medio de un polinomio. Además, se aplica una serie de algoritmos para hacer converger la solución. Cuanto mayor sea el grado del polinomio empleado y menor el número de iteraciones necesarias para la convergencia, menor será el error cometido.

Para poder llevar a cabo la simulación, hay que realizar una discretización espacial del dominio estudiado y del tiempo, si se trata de una situación transitoria. Este proceso consiste en la división del espacio en distintas unidades, formando una malla. Se pueden diferenciar dos tipos de mallados:

- **Estructurados:** cada punto de la malla está identificado por los índices  $(i, j, k)$  en coordenadas cartesianas. Las celdas son cuadriláteros bidimensionales y hexaedros tridimensionales. También, pueden clasificarse en ortogonales o no ortogonales, si las líneas que forman las distintas celdas forman  $90^\circ$  o no.
- **No estructurados:** los puntos de la malla no tienen un orden establecido y, por lo tanto, los puntos cercanos a uno dado no pueden identificarse directamente por los índices. Las celdas son cuadriláteros y triángulos bidimensionales y tetraedros y hexaedros tridimensionales. El tiempo requerido por el ordenador para realizar esta metodología es mucho menor que para un mallado estructurado, pero necesitan una mayor memoria.

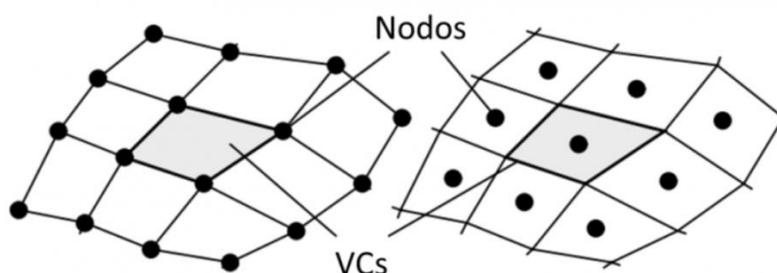
Dependiendo del método de discretización de las ecuaciones empleado, se emplea un tipo de mallado u otro. Existen tres tipos de discretización: método de diferencias finitas, método de elementos finitos y método de volúmenes finitos. Este último, es el más común en programas de simulación de fluidos, como ANSYS Fluent [15].

## 7.1 MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS (FVM)

El método de volúmenes (Finite Volume Method) fue introducido en 1970 por McDonald, MacCormack y Paullay, como alternativa a los métodos ya existentes (método de diferencias finitas y método de elementos finitos).

Este método se basa en la formulación de las ecuaciones integrales de conservación (Navier-Stokes) para cada volumen de control, previamente generado en el mallado del dominio. El mallado es muy flexible, pudiendo ser estructurado y no estructurado, permitiendo su uso en geometrías muy complejas.

Posteriormente, se obtiene la solución discreta para los puntos de control de cada volumen, por ello, cuanto mayor sea la precisión requerida mayor tendrá que ser el refinado de la malla. Los puntos de control, donde se guardan los valores obtenidos, pueden situarse en los vértices de cada celda o en el centro de estas, esta última opción es la aplicada por ANSYS Fluent.



*Figura 13: Mallas con nodos centrados en los vértices y en las caras.*

El método de diferencias finitas presenta problemas en la transformación entre sistemas de coordenadas. Sin embargo, el método de volúmenes finitos no se encuentra con ese inconveniente, ya que realiza la discretización directa en el espacio del problema.

Además, en determinadas condiciones, el método de volúmenes finitos se comporta como el método de diferencias finitas. En consecuencia, es uno de los métodos más empleados, a pesar de los avances producidos en la implementación de códigos utilizados en el método de elementos finitos [15].

## **7.2 RESIDUOS Y CONVERGENCIA DE LA SOLUCIÓN**

Como sea mencionado en apartados anteriores, los softwares CFD realizan procesos iterativos para alcanzar la convergencia de la solución dentro de unos parámetros establecidos previamente. Durante el transcurso de las iteraciones no siempre se alcanza la convergencia, debido a que la solución no consigue estabilizarse en ningún determinado valor.

El proceso de convergencia puede ser examinado a través de unas referencias, denominadas residuos, y cuyo valor es la diferencia entre dos iteraciones consecutivas de una variable. Por lo tanto, si una solución converge, los residuos tendrán que ir disminuyendo su valor, en caso contrario, el problema planteado no converge en ninguna solución.

También, se debe prestar atención en la gráfica descrita por los residuos porque debe producirse una disminución de manera progresiva. Si presentará algún tipo de oscilación puede generar errores acumulativos e impedir que se obtenga la solución correcta.

Si se aplica un criterio de convergencia muy pequeño puede que sea necesario un número muy alto de interacciones para poder alcanzarlo. Por tanto, esta situación podría suponer un elevado tiempo de espera y gasto computacional, por eso suele limitarse el número máximo de iteraciones.

En conclusión, se debe establecer un compromiso entre el tiempo empleado para la convergencia y la calidad de la solución, a través de la modificación los parámetros mencionados. Además, el análisis de evolución de los residuos puede ser un método de comprobación para el mallado y las condiciones del conjunto, establecidos previamente [12].

## 8. MEMORIA

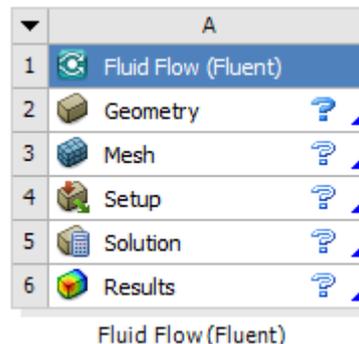
Como se ha podido observar, el sistema de refrigeración tiene una gran relevancia en el desarrollo de los vehículos eléctricos. Por tanto, llevar a cabo una simulación térmica cobra gran sentido, ya que permite observar su comportamiento en distintas condiciones de funcionamiento.

En la realización de este trabajo, se plantea un sistema constituido por una refrigeración líquida, que estarán en contacto de forma indirecta con las celdas de batería. Se elige, concretamente este sistema, debido a su eficiencia y presencia actual en la mayoría de los vehículos eléctricos.

Para llevar a cabo este análisis se empleará ANSYS, un programa diseñado para la implementación de CFD entre otras funcionalidades ya que puede realizar simulaciones mecánicas, térmica-eléctricas o electromagnéticas. Entre todos los módulos, se empleará el software Fluent, destinado a la simulación de flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones químicas.

El propio ANSYS Fluent ofrece una estructura de referencia, la cual se debe ir completando en orden, y está compuesta por los siguientes apartados:

1. **Geometría**
2. **Mallado.**
3. **Configuración**
4. **Solución**
5. **Resultados**



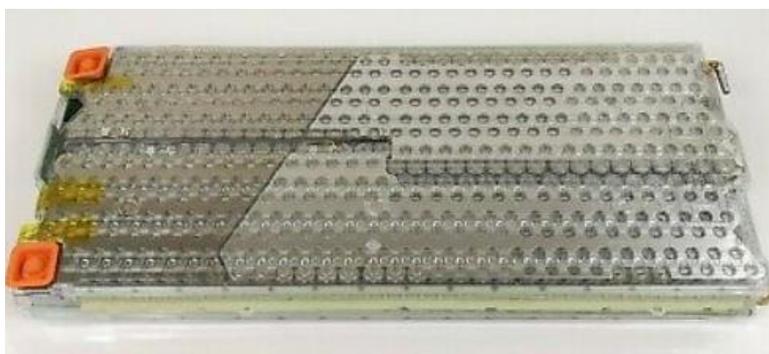
*Figura 14: Apartados de ANSYS Fluent.*

La última parte permite el tratamiento de las soluciones obtenidas y mostrar los resultados de diversas formas, que faciliten la comprensión de estos. Todo ello, gracias la extensión propia del programa, ANSYS CFD-Post.

## 8.1 GEOMETRÍA

Debido a la dificultad que supondría la modelización de todo el sistema de refrigeración o todo el conjunto de las baterías, se centrará la atención en único modulo con su correspondiente refrigeración. Además, para la realización de una simulación de tal calibre, sería necesario un ordenador con unas características muy específicas y los tiempos aumentarían considerablemente.

También cabe destacar, las dificultades encontradas a la hora de obtener información sobre dimensiones y características de para la modelización módulos de baterías reales, se ha optado por la realización de un modelo propio, que servirá de referencia para la elaboración del estudio.



*Figura 15: Módulo de batería Tesla Model S P85D.*

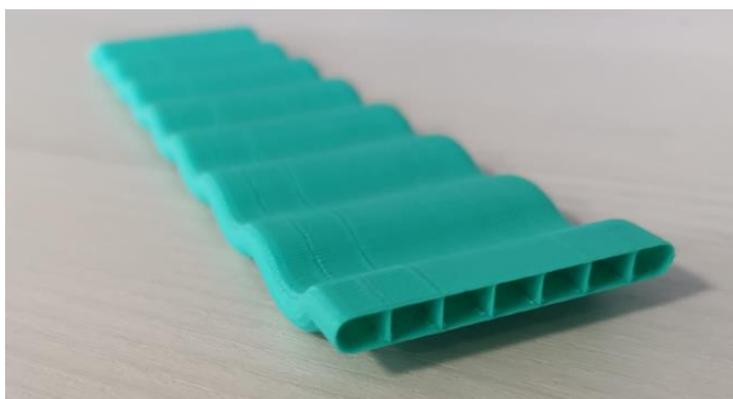
Las celdas de baterías elegidas para su modelado son del modelo SAMSUNG INR21700-40T (ion-litio cobalto) [Anexo I]. Se trata de una celda cilíndrica, cuyas características más relevantes son:

- **Tensión nominal:** 3.6V.
- **Capacidad nominal:** 4000mAh.
- **Carga estándar:** 2A, 4,2V y con corte en 200mA.
- **Máxima descarga continua:** 45A y con corte de temperatura 80 °C.
- **Ciclos de vida:** 250 ciclos.
- **Temperaturas de funcionamiento:** 23-40 °C (100% capacidad).

Cada módulo estará formado por 56 celdas conectadas eléctricamente en una configuración 8p7s (8 paralelo 7 serie), es decir, 7 grupos unidos en serie y cada grupo está formado por 8 celdas en paralelo. De esta manera, cada módulo tendrá una potencia aproximada de 750 WH, que conectados en serie pueden alcanzar la

potencia necesaria para alimentar el motor eléctrico de un vehículo. Por ejemplo, un vehículo formado por 20 módulos 8p7s podría construirse con un motor eléctrico de 109 KW (aproximadamente 149 CV), potencia más que suficiente para su propulsión.

En cuanto a los tubos de refrigeración, que se encuentran en contacto con las baterías, se ha optado por unos tubos de aluminio micro canalizados [Anexo II]. El tubo está formado por 7 canales, lo suficientemente finos como para pasar entre las baterías sin suponer un gran aumento de volumen.



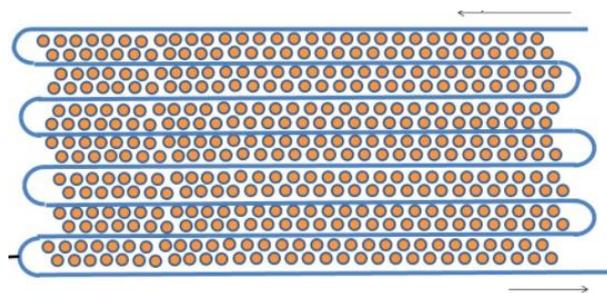
*Figura 16: Impresión en 3D del tubo de refrigeración micro canalizados.*

La elección del aluminio, como material principal del tubo, viene dado por las buenas propiedades conductivas sin un elevado precio. En el mercado, existen materiales con una mayor conductividad térmica, como el cobre, pero su precio haría económicamente inviable la fabricación de vehículos eléctricos.

	<b>Densidad (<math>\rho</math>)</b>	<b>Calor especifico (<math>C_p</math>)</b>	<b>Conductividad térmica (k)</b>	<b>Precio</b>
<b>Aluminio</b>	2719 kg/m <sup>3</sup>	871 J/kgK	202.4 W/mK	2,02 €/kg
<b>Cobre</b>	8978 kg/m <sup>3</sup>	381 J/kgK	387.6 W/mK	7,30 €/kg

*Figura 17: Comparación de propiedades entre aluminio y cobre [ANSYS].*

La configuración del tubo de refrigeración sobre cada módulo será en forma de 's', de tal manera tendrá únicamente una entrada y una salida de refrigeración. Esta opción fue elegida por algunas compañías del automóvil, con la única diferencia, que abarcaban más de un único módulo al mismo tiempo.



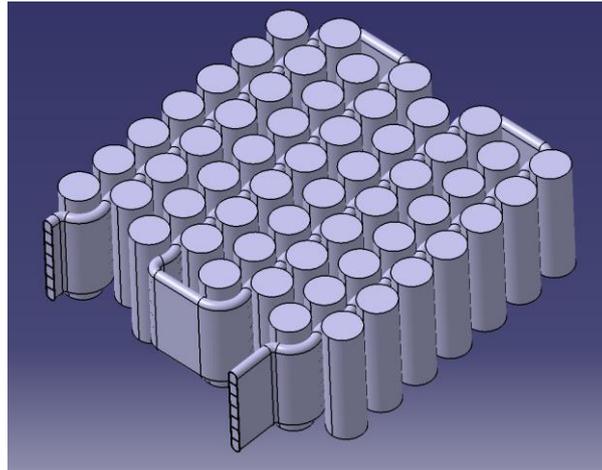
*Figura 18: Esquema configuración tubo de refrigeración Tesla S.*

Debido a la naturaleza del problema, se ha optado por una geometría en tres dimensiones ya que la transferencia de calor se produce en todas las direcciones. Esta decisión, implicaría un menor gasto computacional que si se hubiera elegido una geometría bidimensional, pero no se obtendría una solución práctica con la cual poder sacar unas conclusiones claras.

Para comenzar este proceso, se debe modelizar la geometría que se desea analizar, para ello ANSYS ofrece una extensión CAD propia (DesignModeler). Debido a la antigüedad de la versión y la complejidad de la geometría estudiada, se ha recurrido a otro programa auxiliar que facilite el diseño.

El software escogido es CATIA, un programa CAD en 3D orientado al diseño avanzado de proyectos mediante el modelado de sólidos, superficies y ensamblaje. Se trata de una aplicación desarrollada por Desselault Systemes, siendo la más empleada en la industria aeronáutica y automovilística. A través de la cual, se ha realizado el diseño del módulo y su sistema de refrigeración, mediante una serie de comandos.

Se ha optado por una disposición de celdas en diagonal, en vez de una en frente de otra, de esta manera el tubo de refrigeración se adapta a la forma de las baterías y aumenta la superficie de contacto. Además, es la configuración empleada por los vehículos eléctricos (Figura 15, Figura 18). En consecuencia, un mejor ajuste de tubo implica una mayor capacidad de refrigeración y, por tanto, una mayor eficiencia.



*Figura 19: Diseño del módulo de referencia en CATIA.*

El diseño de la celda ha sido simplificado en un cilindro, eliminado las formas de los conectores que se situaban en los extremos. De esta manera, se simplificará el posterior mallado de las baterías, sin que la solución pueda verse afectada.

Además, como se puede observar en la Figura 19, se ha hecho pasar al tubo de refrigeración por todas las celdas con el objetivo de conseguir una temperatura más homogénea del módulo. También, se simulará otra configuración de refrigeración donde se libera algunas celdas y se comprobará la necesidad o no, de refrigeración directa de todas las celdas de batería.

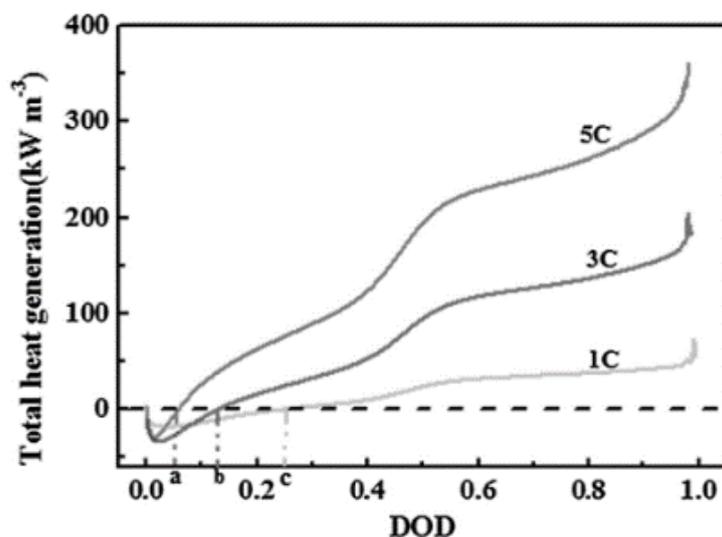
Asimismo, surge la necesidad de modelizar el interior de los canales si se quiere simular el comportamiento y obtener los parámetros del fluido refrigerante que circula por los tubos.

Es conveniente agrupar, en un único elemento, el tubo de refrigeración y las distintas partes modelizadas en su interior. De esta manera, solo aparecerán las zonas de contacto resultantes del tubo y las baterías.

## 8.2 MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA BATERIA

La generación interna de calor influye significativamente sobre el diseño de las baterías y su gestión térmica, ya que altera directamente a la temperatura del módulo. De mismo modo, el estudio y diseño de una batería de ion litio presenta grandes dificultades, al tratarse de un problema cuya naturaleza implica diferentes procesos físicos y a distintas escalas. Como en el caso de las reacciones químicas, ocurren en la parte activa de la batería a una escala atómica y, además, su comportamiento se ve afectado por diversos aspectos.

Los dos factores principales sobre la generación de calor de una batería de ion litio son la profundidad de descarga (DOD) y la corriente de descarga respecto la nominal. Como se puede observar en la Figura 20, al comienzo de la descarga con DOD bajos, la generación de calor es suprimida por la temperatura ambiente. Después de esta etapa, la curva asciende rápidamente, de manera más pronunciada en el caso de descarga a 5C.



*Figura 20: Gráfica de la generación de calor respecto DOD, a distintas corrientes [16].*

Además, la producción de calor interno de la batería se puede dividir en calor irreversible y reversible. El calor irreversible, producido por los distintos componentes de la batería, es una magnitud relativamente baja y con un impacto menor en el aumento de temperatura. En cambio, la generación de calor irreversible en los electrodos afecta en mayor medida a la temperatura, más concretamente el electrodo negativo de la batería [16].

Si se quiere conocer cómo evoluciona el comportamiento térmico, es necesario la obtención de datos experimentales, que posteriormente podrán ser implementados en el software CFD. Dependiendo modelo empleado para la modelización del comportamiento y distribución de temperaturas de la batería, se necesitan adquirir unos determinados datos u otros. Concretamente, ANSYS ofrece los siguientes modelos [17, 18]:

- **Modelo empírico NTGK (Newman, Tiedeman, Gu y Kim):** se trata de un modelo electroquímico semi-empírico, que relaciona la transferencia de corriente con el campo potencial, mediante la siguiente ecuación algebraica:

$$j = aY(U - (\varphi_+ - \varphi_-))$$

Siendo:

$a$ =área de contacto entre electrodos       $\varphi_+/\varphi_-$ = campo potencial positivo/negativo

$Y/U$ = parámetros función del DOD de la batería

Se trata del modelo más simple, ya que no son necesarios una gran cantidad de datos para poder obtener el comportamiento de una batería de ion-litio.

- **Modelo circuito eléctrico (ECM):** el comportamiento de la batería es modelizado a través de un circuito eléctrico, formado por 3 resistencias y dos condensadores.

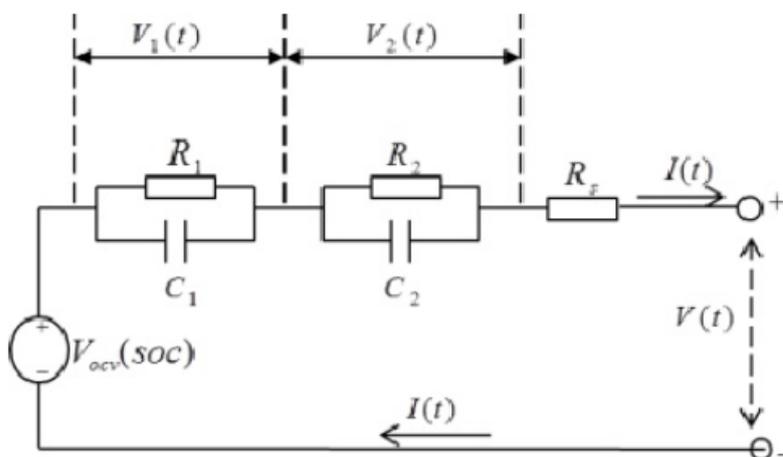


Figura 21: Circuito eléctrico equivalente del modelo EMC

Obteniendo la relación intensidad-tensión a partir de las siguientes ecuaciones:

$$V(t) = V_{ocv}(SOC) + V_1 + V_2 - R_s(SOC)I(t)$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial t} = -\frac{1}{R_1(SOC)c_1(SOC)}V_2 - \frac{1}{c_1(SOC)}I(t)$$

$$\frac{\partial V_2}{\partial t} = -\frac{1}{R_2c_2}V_1 - \frac{1}{c_2}I(t)$$

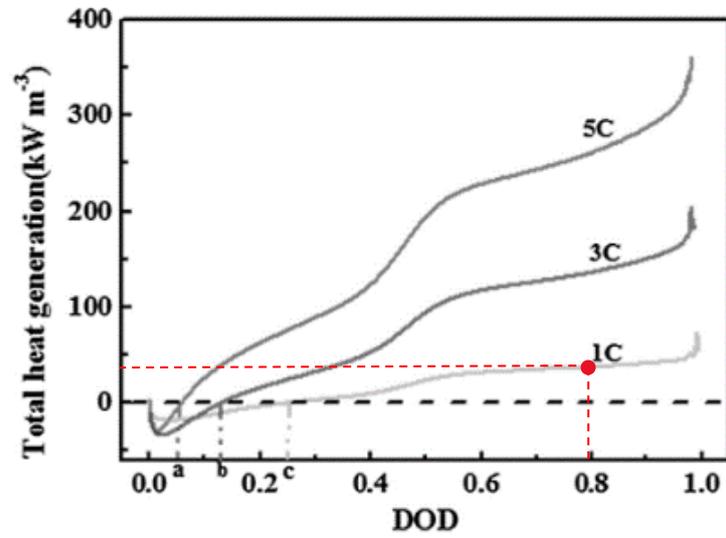
$$\frac{\partial(SOC)}{\partial t} = I(t)/3600Q_{Ah}$$

- **Modelo Newman P2D:** este modelo emplea electrodos porosos y diversas soluciones teóricas, para conseguir representar de manera precisa el intercambio de iones litio en el interior de la batería. Por ello, los trabajos experimentales son de gran complejidad debido al gran número de datos necesarios. A continuación, se citan algunos de los parámetros:
  - Eficiencia conductiva eléctrica ( $\sigma^{eff}$ ).
  - Conductividad difusa del electrolito ( $k_D^{eff}$ ).
  - Fracción volumétrica de material activo en el electrolito ( $\varepsilon_e$ ).
  - Número de transferencia del ion litio ( $t_+^0$ ).

La realización del proceso empírico implica la necesidad de ciertos recursos, a los cuales no se tiene acceso actualmente, además de suponer un aumento muy importante en el tiempo total del trabajo.

Por lo tanto, para conseguir la simplificación de esta etapa, se establece como referencia los datos del estudio Figura 20 [16]. Asimismo, se determina un punto de funcionamiento con una determinada profundidad de descarga (DOD) bajo una corriente de descarga concreta. De esta manera, la generación de las baterías puede introducirse como un parámetro constante, ya que se analiza el comportamiento térmico para un instante determinado.

Finalmente, se establece un punto de trabajo con un DOD de 0,8 y 1C, para el cual una celda de batería tiene una generación de calor volumétrica de 36 KW/m<sup>3</sup>. Al encontrarse el módulo formado por 56 celdas, la generación de calor total del conjunto será de 2016 KW/m<sup>3</sup>.



*Figura 22: Gráfica de la generación de calor en el punto de trabajo de referencia*

Esta generación de calor se repartirá de forma uniforme por todas las celdas de baterías y servirá como referencia para la obtención de los resultados.

### 8.3 MODELO DEL LÍQUIDO REFRIGERANTE

Como se mencionó con anterioridad, el líquido refrigerante se trata de una disolución de etilenglicol en agua, cuya proporción depende de las temperaturas que se puedan alcanzar en la zona de conducción. Se tomará como referencia un líquido refrigerante con un 50% de etilenglicol, con las siguientes características:

Líquido	Conductividad térmica (k)	Calor específico (C <sub>p</sub> )	Viscosidad dinámica (μ)	Densidad (ρ)	Número Prandtl (Pr)
Etilenglicol (50%)	0,43 W/mK	3297,63 J/kgK	0,003367 Pa · s	1053,25 kg/m <sup>3</sup>	25,82

*Figura 23: Características del líquido refrigerante (etilenglicol al 50%) [Anexo III].*

Además, es necesario conocer si el líquido refrigerante alcanza el régimen turbulento por el interior de los canales. Para ello, se calculará el número de Reynolds mediante el diámetro hidráulico de la sección total de los canales.

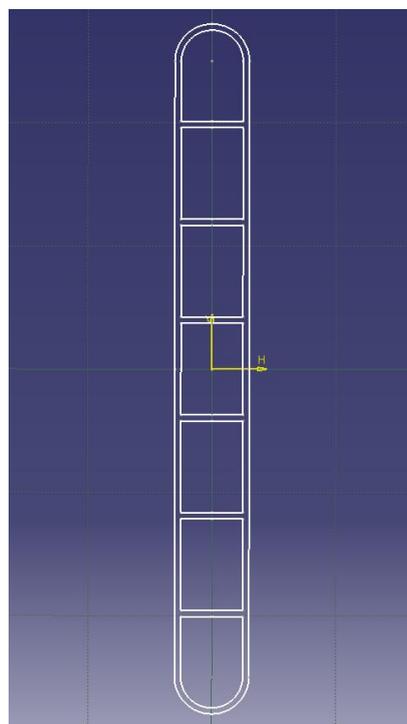
$$A_{Total} = 5 \cdot (7,44 \cdot 5 + 2 \cdot 4,9) + \pi(2,5)^2$$

$$= 254,635 \text{mm}^2$$

$$Perímetro = 5 \cdot 2 \cdot (7,44 + 5) + 2 \cdot 2 \cdot (4,9 + 5)$$

$$+ 2\pi 2,5 = 179,708 \text{mm}$$

$$D_h = \frac{4 \cdot Area}{Perímetro} = \frac{4 \cdot 254,635}{179,708} = 5,668 \text{mm}$$



*Figura 24: Plano del perfil del tubo de refrigeración.*

Con la velocidad del líquido refrigerante, una viscosidad dinámica de 0,003367 Pa · s y una densidad de 1053,25 kg/m<sup>3</sup>. Hay que tener en cuenta que, durante la simulación se van a realizar análisis a distintas velocidades, por tanto, se obtendrá el número de Reynolds para la velocidad máxima y mínima.

$$Re_{m\acute{a}x} = \frac{\rho \cdot v_{m\acute{a}x} \cdot D_h}{\mu} = \frac{1053,25 \cdot 2000 \cdot 5,668}{0,003367} = 36240,41$$

$$Re_{m\acute{i}n} = \frac{\rho \cdot v_{m\acute{i}n} \cdot D_h}{\mu} = \frac{1053,25 \cdot 400 \cdot 5,668}{0,003367} = 7248,08$$

En ambos casos, el número de Reynolds supera el límite de régimen laminar (2300) (Apartado 6.2.2), considerándose flujo turbulento para todo el rango de velocidades comprendidos entre la máxima y la mínima.

Por todo ello, se implementará el modelo de turbulencia k – ε. Este modelo está basado en las ecuaciones de transporte de la turbulencia cinética (k) y su tasa de disipación (ε). Además, se mantienen los valores predefinidos para las distintas variables, debido a que su aplicación es correcta para la mayoría de los problemas planteados [18].

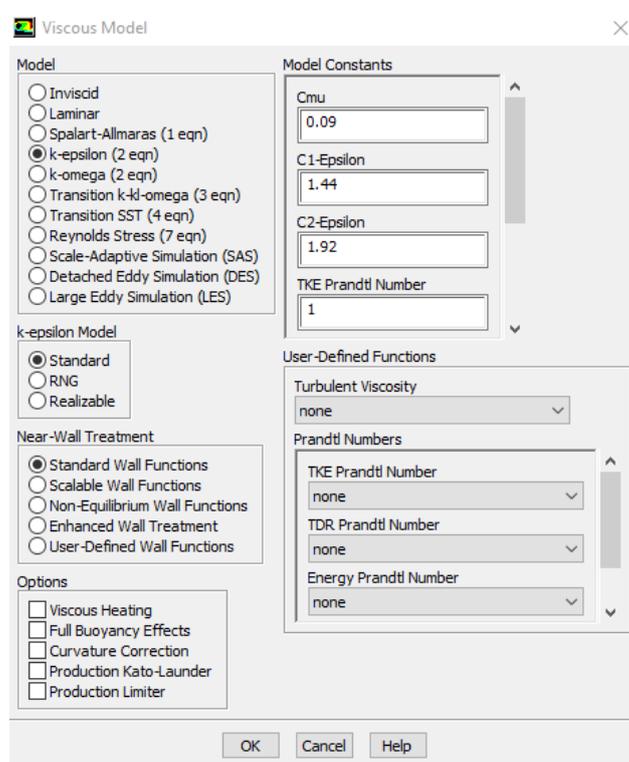


Figura 25: Configuración del modelo de turbulencia k – ε.

### **8.3 MODELO DEL FLUJO EXTERNO**

Por otro lado, es importante determinar el entorno en que se encuentra el módulo de batería, para modelizar su interacción con el medio que lo rodea.

Normalmente, las baterías de vehículos eléctricos con refrigeración líquida se encuentran en sistemas cerrados. Debido a la presencia de conexiones eléctricas entre los distintos módulos y la electrónica de potencia, es conveniente el aislamiento para impedir posibles problemas de filtraciones que puedan poner en peligro, tanto la seguridad de los ocupantes como la integridad de la batería.

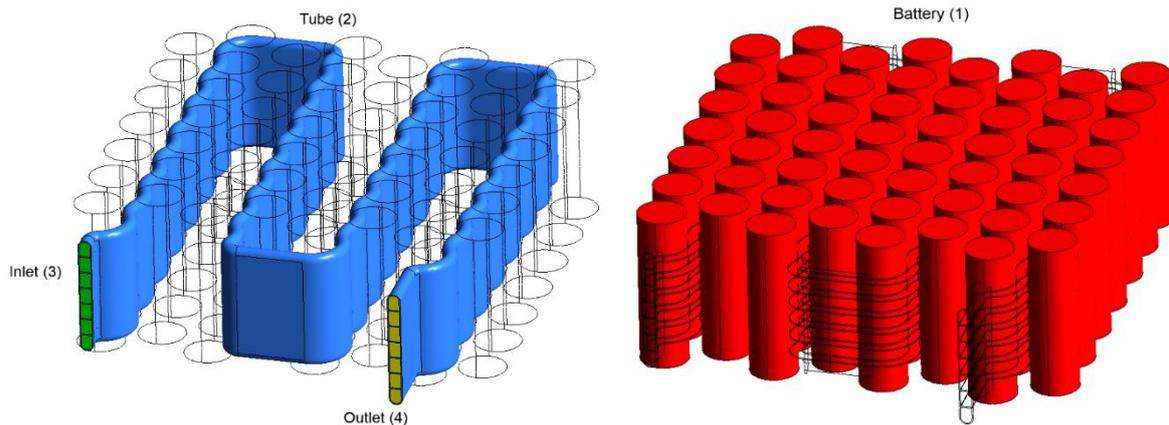
Por lo tanto, la convección existente alrededor de las celdas de batería y el tubo de refrigeración será natural y con un coeficiente de convección muy pequeño ( $0-5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ). Al encontrarse cerrado, incluso podría suponerse un sistema adiabático, donde no existiese intercambio de calor con el medio, sin acumular demasiado error en los resultados.

Finalmente, se impone una condición de convección natural alrededor del módulo y sistema de refrigeración con un coeficiente de convección de  $2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , mediante aire a una temperatura constante de  $300 \text{ K}$ .

### **8.4 CONDICIONES DE CONTORNO**

Es necesario determinar las condiciones de contorno de las zonas frontera, para que el programa pueda resolver las ecuaciones de Navier-Stokes y de energía. El conjunto estudiado posee las siguientes fronteras:

- Superficie exterior de las baterías (1).
- Paredes del tubo de refrigeración (2).
- Zonas de entrada de líquido refrigerante (3).
- Zonas de salida de líquido refrigerante (4).



**Figura 26:** Zonas frontera del modelo estudiado.

En el interior de (1), se establece una generación de calor constante de  $2016 \text{ kW/m}^3$  (total). En la superficie exterior de las celdas (1), que no se encuentra en contacto con la refrigeración, se establece una convección natural débil con aire y un coeficiente de convección de  $2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . La temperatura del flujo libre exterior, causante de esa convección, se fijará en valor constante de  $300 \text{ K}$ .

La pared exterior del tubo de refrigeración (2), al igual que las celdas, se aplica una convección natural con las mismas características.

En cuanto a la entrada de líquido refrigerante (3), se establece una entrada de caudal uniforme sobre los 7 canales disponible, con una temperatura de  $291 \text{ K}$ . Además, la velocidad de este fluido es un parámetro que se modificará para observar su influencia en los resultados. El rango de velocidades se encuentra en  $0,4\text{-}2 \text{ m/s}$ , tomando como velocidad de referencia  $0,75 \text{ m/s}$ .

## 8.5 MALLADO

La creación de la malla es la fase más crítica y relevante de todo el proceso de simulación. Un mal mallado puede mostrar resultados sin ningún sentido físico, como la aparición de temperaturas extremadamente altas o bajas en ciertos puntos del problema estudiado.

Es importante antes de realizar el mallado, conocer el fenómeno que se va a estudiar y las zonas donde produce. En este caso, se analiza la transferencia de calor de un sistema de refrigeración, como se ha explicado previamente la capa límite térmica se produce en las zonas más cercanas del fluido con el sólido. Por tanto, en las zonas periféricas el mallado deberá tener un mayor refinamiento.

Con la elaboración de este estudio previo se conseguirá, aparte de resultados coherentes, una focalización de la potencia computacional en las áreas de mayor interés.

Teniendo todos estos aspectos en cuenta, se comienza el proceso de mallado del módulo de baterías a través de distintas condiciones de mallado.

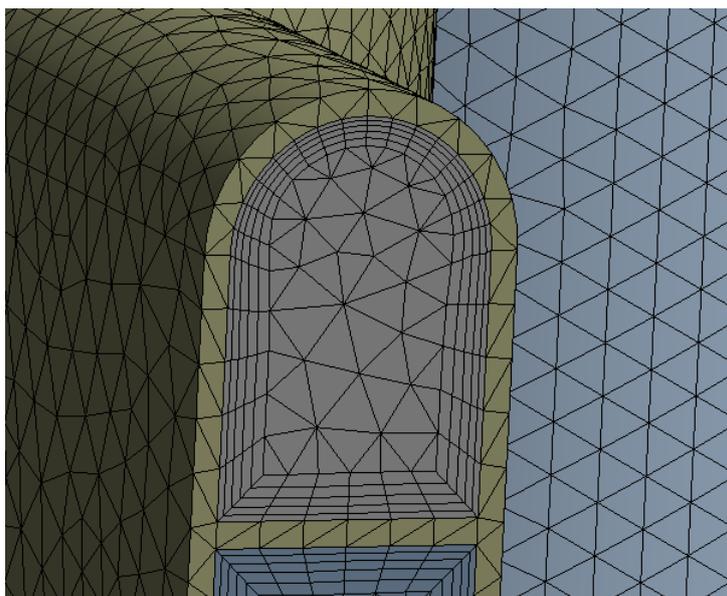
En primer lugar, hay que determinar una forma de mallado de referencia para todo el conjunto en base a la física del análisis que se realice. En este caso, se trata de un análisis de fluidos ('Fluent') y establece una serie de características por defecto.

Seguidamente, se centrará la atención en el tubo de refrigeración y sus respectivas condiciones de mallado. Como ya ha sido mencionado, el tubo consta de 7 canales por donde circula el líquido refrigerante y cuyos interiores han sido modelizados, por tanto, es necesario una mayor densidad de celdas o elementos en las zonas cercanas al tubo. Esta condición se puede realizar a través del comando '*Inflation*', que nos permitirá establecer un patrón de crecimiento de las celdas una vez que estén más cerca del centro del canal.

Details of "Inflation" - Inflation	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	199 Faces
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	Default (0,272)
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre

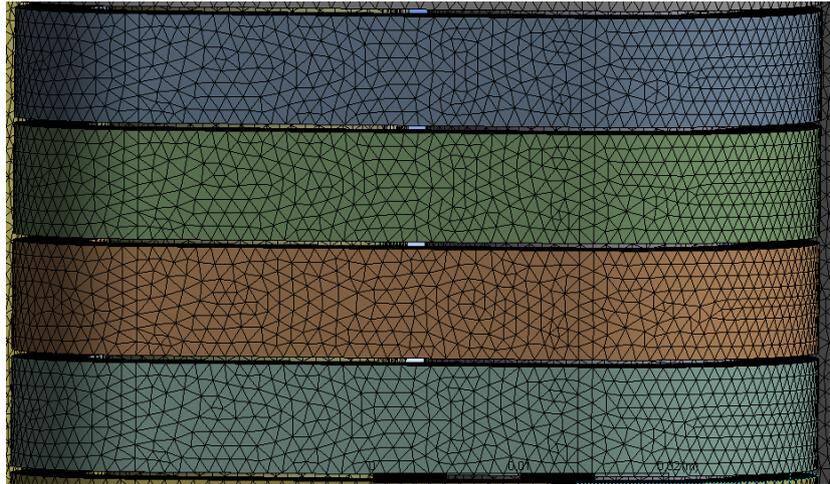
*Figura 27: Configuración del comando 'Inflation'.*

Para la configuración, se han seleccionado las caras externas de cada canal, estableciendo 5 capas con una ratio de crecimiento de 1,2. Si fuera necesario abarcar un área mayor, se podría realizar mediante un aumento en el número máximo de capas.



*Figura 28: Mallado empleando comando 'Inflation'*

A parte de realizar el refinamiento del mallado en el interior de los canales, se ha hecho hincapié en la parte exterior con la aplicación del comando '*Face sizing*'. Este comando permite determinar el tamaño del elemento situado en la superficie, estableciendo un tamaño de referencia de 0,001 mm por elemento.



*Figura 29: Mallado empleando el comando 'Face sizing'.*

Tanto las configuraciones como los comandos empleados en el tubo de refrigeración pueden ser aplicados de la misma forma sobre las celdas de batería. Cabe destacar que, el tamaño de los elementos (*'Face sizing'*) de las baterías es 0,002 mm, mayor que el caso anterior, debido a que la transferencia de calor se va a realizar mediante condiciones de contorno y no mediante la interacción con otros elementos (en las zonas que no se encuentren en contacto con el tubo de refrigeración).

Es importante que exista una mayor densidad de mallado en las zonas de contacto entre ambas geometrías, respecto del resto. Con ese fin, se aplica el comando *'Contact sizing'* que proporciona un tamaño determinado, en este caso 0,001mm, en las áreas cercanas a la zona de unión.



*Figura 30: Mallado empleando el comando 'Contact sizing'.*

Debido a la geometría compleja de tubo de refrigeración es conveniente aplicar un método de conformidad, que permite respetar caras y límites dentro de una tolerancia muy pequeña. En concreto, un mallado de conformidad tetraédrico ya que reforzará el mallado más refinado en los bordes de los canales.

Finalmente, se comprueba la calidad de la malla realizada a través distintos parámetros, como, asimetría (**'Skewness'**), calidad ortogonal (**'Orthogonal Quality'**), ratio jacobiana, desviación paralela o calidad del elemento. Únicamente, se analizarán la asimetría y la calidad ortogonal, debido a su sencillez a la hora de evaluar la naturaleza de los elementos.

El parámetro de asimetría determina como de cerca se encuentran las celdas de su forma ideal (rectangular o triángulo equilátero). Teniendo en cuenta esa idea, se centra en estructura de la celda y se establece siguiente criterio:

Calidad mallado	Muy buena	Buena	Aceptable	Pobre	Mala	Inaceptable
<b>Asimetría</b>	0-0,25	0,25-0,5	0,5-0,8	0,8-0,95	0,95-0,98	0,98-1

*Figura 31: Tabla de calidad del mallado basado en la asimetría [19].*

Si se trabaja con una geometría tridimensional, la mayoría de las celdas deben encontrarse al menos en 0,5, pero es normal que algunas se sitúen con valores de asimetría alejados del resto. Por ello, se tomará como referencia el valor medio para la comprobación de la calidad.

El parámetro de calidad ortogonal de las celdas se calcula teniendo en cuenta los vectores normales de cada lado, los vectores entre el centroide (centro geométrico) de la celda y el punto medio de cada lado, y los vectores desde el centroide de la celda a los centroides de las celdas adyacentes.

Calidad mallado	Inaceptable	Mala	Pobre	Aceptable	Buena	Muy buena
<b>Calidad ortogonal</b>	0-0,001	0,001-0,15	0,15-0,20	0,20-0,70	0,70-0,95	0,95-1

*Figura 32: Tabla de calidad del mallado basado en la calidad ortogonal [19].*

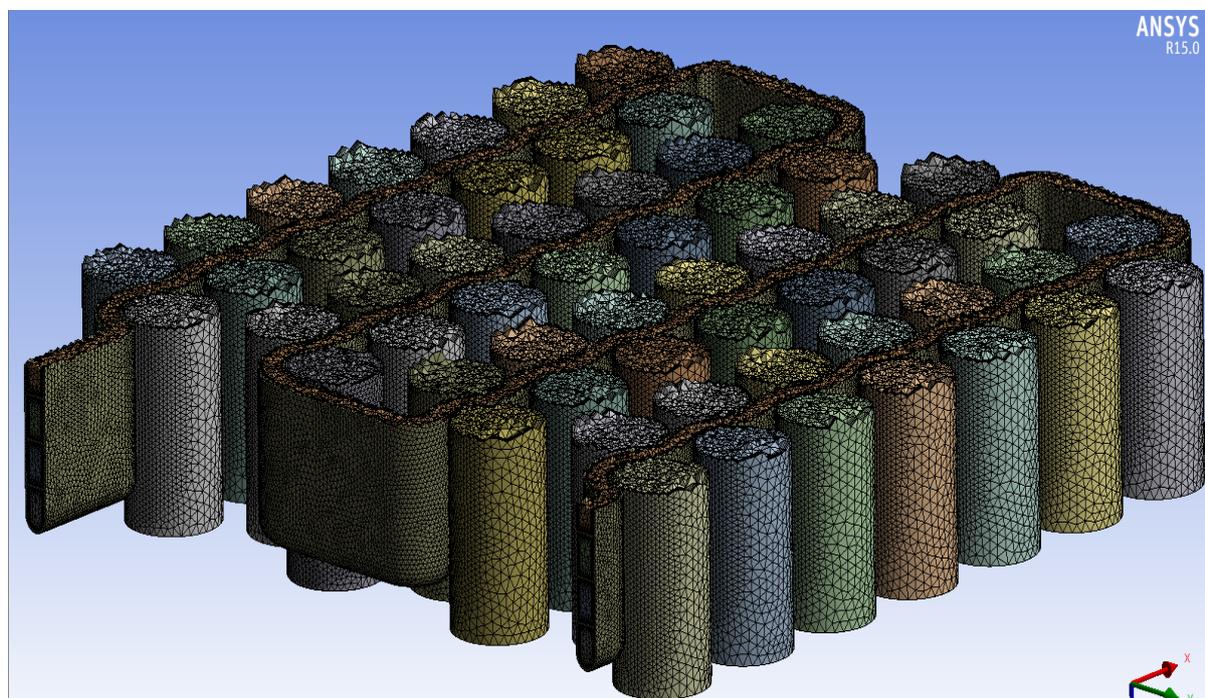
En este caso, se focaliza en el estudio de la forma de la celda y, al igual que la asimetría, se tomará como medida significativa el valor medio obtenido por el conjunto de la malla.

Teniendo en cuenta estos conceptos, se procede al cálculo de los parámetros obteniendo los siguientes resultados:

	<b>Asimetría</b>	<b>Calidad ortogonal</b>
<b>Valor máximo</b>	0,92825	0,99980
<b>Valor mínimo</b>	8,81172e-6	0,12419
<b>Valor medio</b>	0,23509	0,86755

*Figura 33: Resultado sobre la calidad de mallado (asimetría y calidad ortogonal).*

Se observa que los valores medios de ambos parámetros se sitúan en el intervalo de buena o muy buena, pudiéndose vaticinar que se ha realizado un mallado correcto. Como se mencionó con anterioridad, hay valores lejos del medio ya que es una geometría tridimensional, pero destacar que el número de elementos con valores pobres es mínimo, como se puede observar en los histogramas [Anexo III].



*Figura 34: Mallado general de módulo y el tubo de refrigeración, con plano de corte.*

Las estadísticas de la malla completa muestran que ha sido necesario la creación de un total de 3888135 nodos y 13580846 elementos.

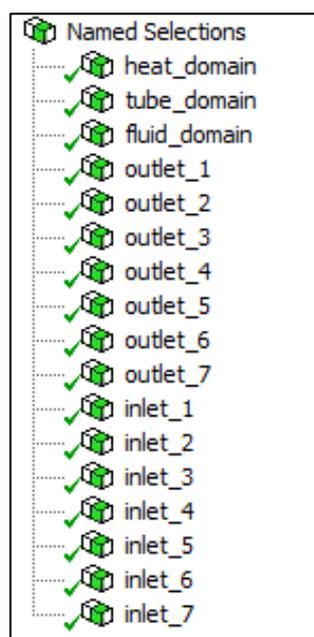
### 8.5.1 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE ZONA

Durante el proceso de mallado se definen las características físicas y operacionales del modelo en distintas regiones. Existen dos tipos de zonas:

- **Zonas límites:** determinan las características operacionales en una determinada superficie del dominio.
- **Zonas continuas:** determinan las características físicas en una región del modelo (volumen).

Los nombres de las distintas zonas se encuentran estandarizados, para que puedan ser interpretadas por el programa más adelante. Por tanto, teniendo en cuenta las características del módulo, como la circulación de un líquido refrigerante ante el calor producido por las baterías, se determinan las siguientes zonas:

- **Inlet\_1-7:** sobre las superficies iniciales de los canales, indicando la entrada de un flujo.
- **Outlet\_1-7:** al final de los canales, indicando la salida de un flujo.
- **Fluid\_domain:** interior de los canales donde circula el líquido refrigerante.
- **Tube\_domain:** dominio del tubo de refrigeración.
- **Heat\_domain:** las celdas de batería donde se producirá la generación de calor.



*Figura 35: Zonas definidas en el módulo.*

## 8.6 RESULTADOS

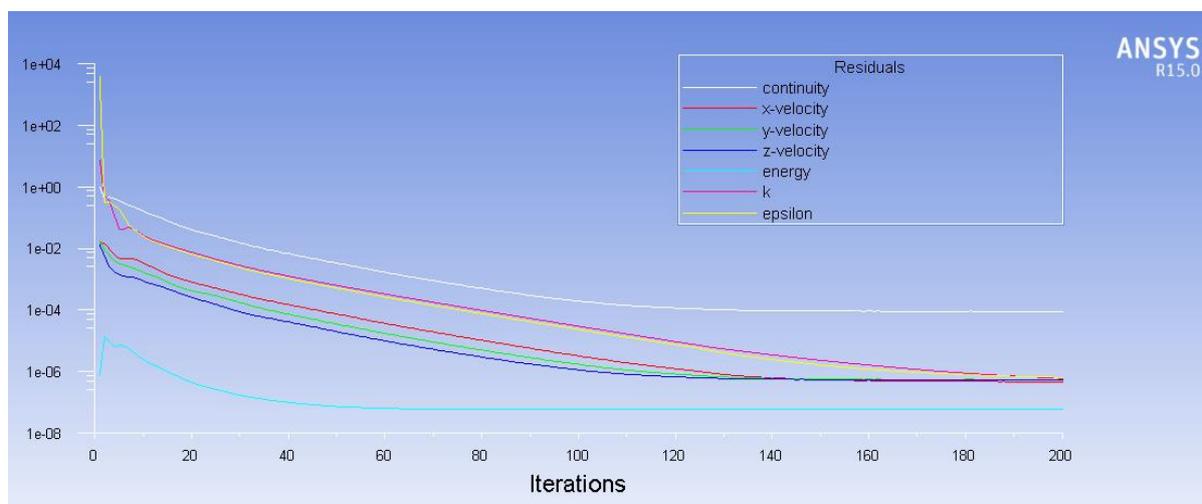
Una vez finalizado los cálculos de la batería y su sistema de refrigeración, se obtienen una gran cantidad de datos sobre el conjunto (velocidades, temperaturas, presiones etc.). Además, esos datos resultantes se pueden mostrar de distintas formas, debido a la gran variedad de posibilidades que ofrece ANSYS CFD-Post.

A continuación, se mostrará resultados que permitirán alcanzar conclusiones y observar los fenómenos físicos explicados teóricamente con anterioridad.

### 8.6.1 RESIDUOS

El análisis de residuos es un procedimiento para examinar tanto el modelo como el mallado empleado, como se mencionó en el Apartado 7.2.

Es importante destacar que el proceso de cálculo fue detenido por alcanzar el número máximo de iteraciones establecido (200 iteraciones) y no por el criterio de convergencia de residuos ( $1 \cdot 10^{-6}$ ). Posiblemente, el criterio de convergencia sea demasiado exigente para el conjunto estudiado.



*Figura 36: Gráfica de residuos obtenidos en los cálculos del módulo de batería.*

Prestando atención en la Figura 36, se observa como los residuos se estabilizan en un determinado valor a partir de la iteración 190. Concretamente, los valores relacionados con la velocidad y los de turbulencia ( $k$ ,  $\epsilon$ ) se consolidan sobre  $5 \cdot 10^{-7}$ , estando por debajo del criterio de convergencia. En cambio, los residuos de continuidad se encuentran fijados en  $9 \cdot 10^{-5}$ , siendo el culpable de alcanzar el número máximo de iteraciones. Por otro lado, la energía se fija  $6 \cdot 10^{-8}$ , dato considerablemente inferior al del resto de residuos.

En definitiva, se puede obtener una conclusión positiva del mallado y el modelo empleado, a partir del estudio de los residuos. Pudiendo aportar más seguridad sobre la veracidad de los resultados obtenidos.

### 8.6.1 TUBO Y LÍQUIDO DE REFRIGERACIÓN

En el estudio de las distintas variables del tubo y el líquido de refrigeración, se tomará como referencia, un líquido de refrigeración con 50% de etilenglicol a una velocidad de 0,75 m/s y 291 K. La variación de parámetros, como la velocidad, será exclusivamente en el análisis térmico de las celdas de baterías.

En primer lugar, se prestará atención sobre la distribución de temperaturas del tubo de refrigeración (Figura 37). Su rango de temperaturas se encuentra entre un máximo 302 K y un mínimo de 291 K, temperatura del refrigerante en la entrada.

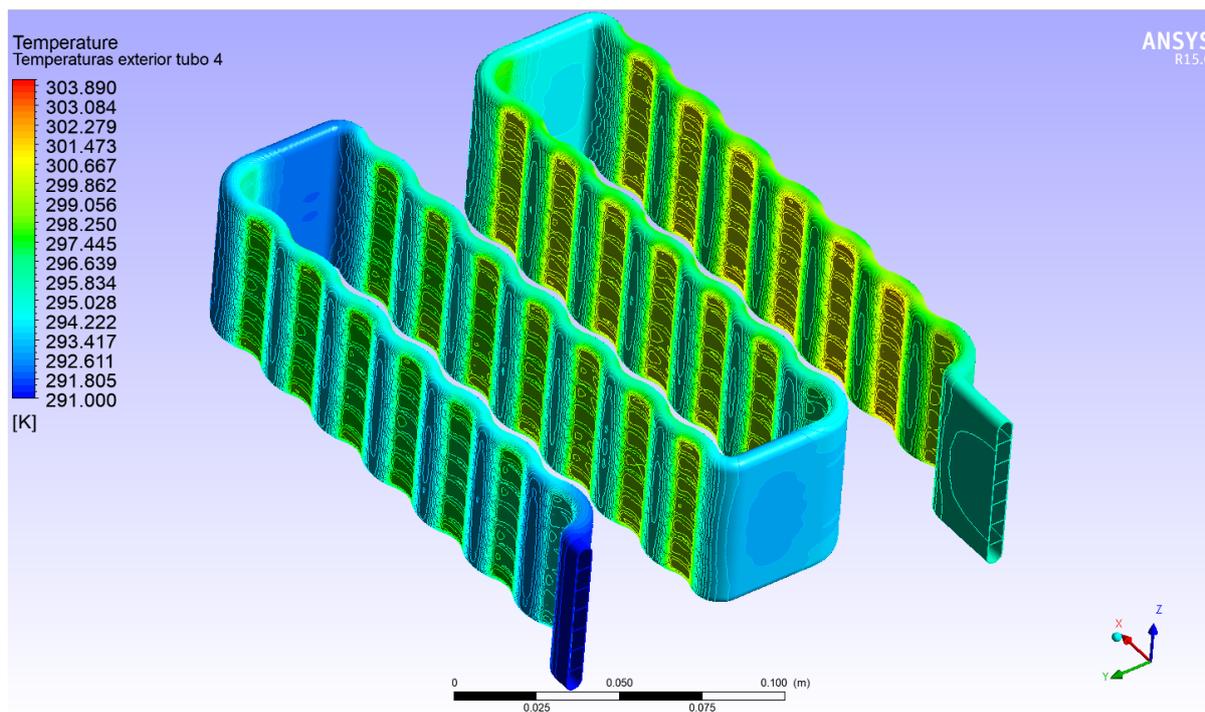
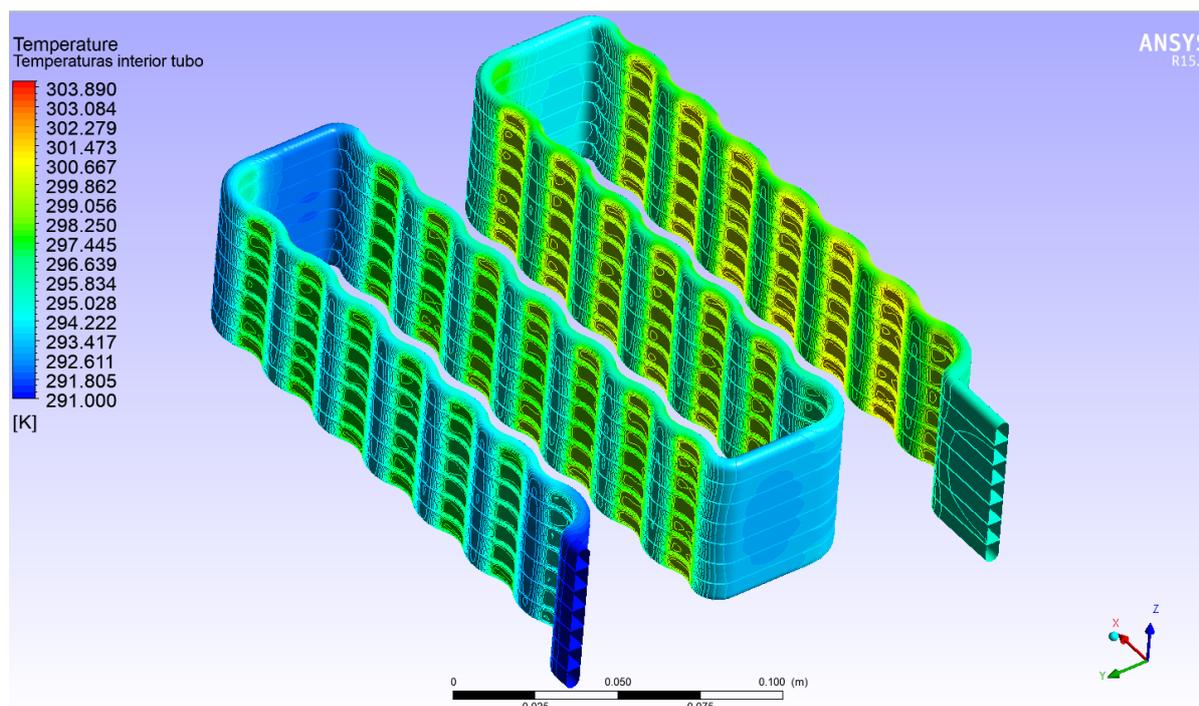


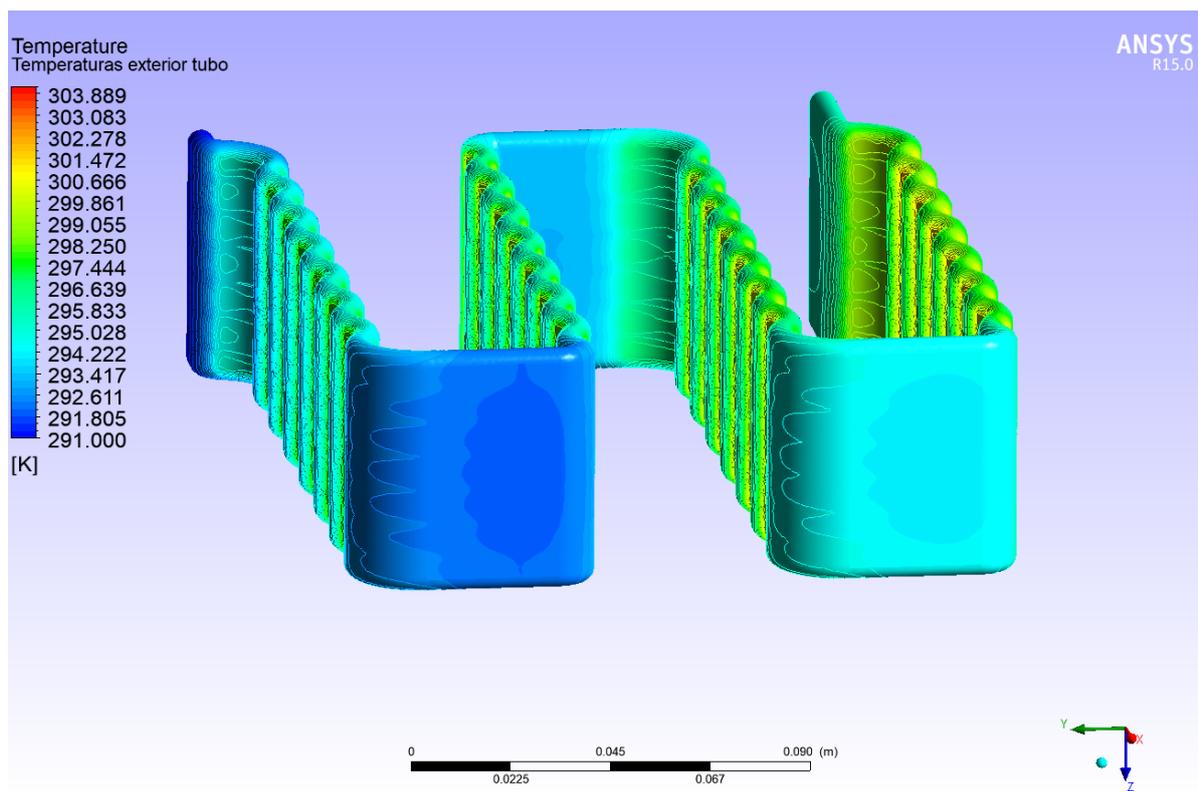
Figura 37: Distribución de temperatura en el exterior del tubo de refrigeración.



*Figura 38: Distribución de temperatura en el interior del tubo de refrigeración.*

Además, se puede observar en las zonas de contacto directo entre el tubo y las baterías se alcanzan los valores de temperatura más elevados. Siendo más altas en el tramo final del tubo, debido a un calentamiento del refrigerante y, por tanto, su pérdida progresiva de su poder de enfriamiento.

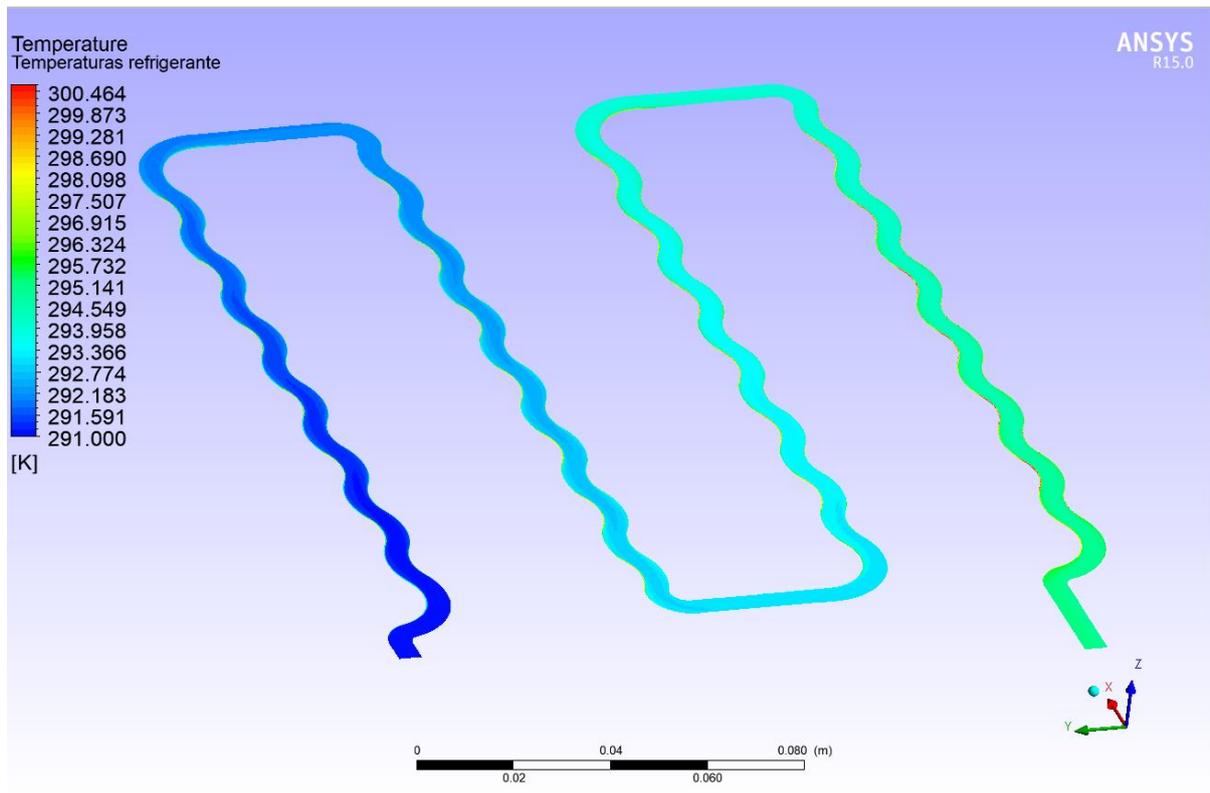
En los segmentos intermedios, se puede observar cómo la temperatura se estabiliza e incluso en algunos puntos se produce disminución. Esta situación es provocada por la lejanía relativa de las baterías y el efecto débil de convección propio del aire, que se encuentra a una mayor temperatura alrededor de la batería (Figura 39).



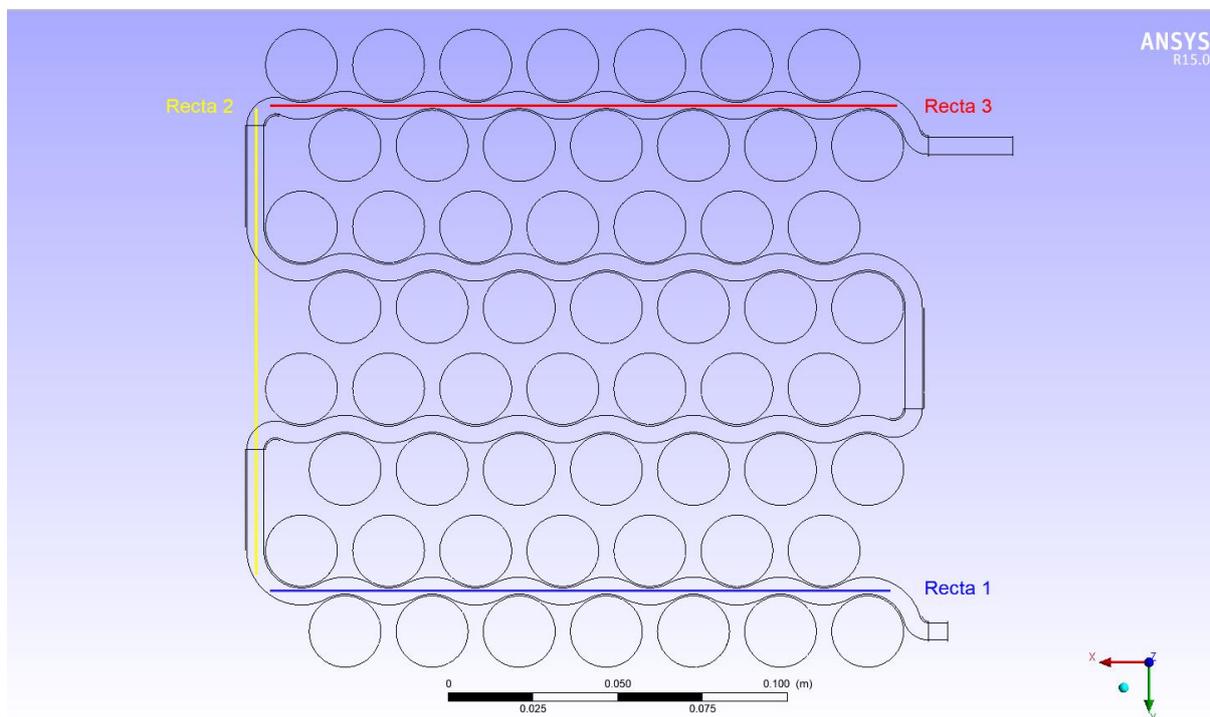
*Figura 39: Distribución de temperatura en los segmentos intermedios del tubo de refrigeración.*

Si se centra la atención sobre el líquido refrigerante, concretamente en las distintas temperaturas que presenta a lo largo del tubo, se aprecia el aumento progresivo de temperatura desde los 291 K iniciales hasta aproximadamente los 295 K (Figura 40). Implicando que para la refrigeración de un módulo con estas especificaciones se ha producido un aumento de 4 grados en el refrigerante.

Se trata de un aspecto importante en el diseño del sistema de refrigeración de todo el conjunto de módulos, porque determina la configuración que se lleva a cabo en el vehículo (serie o paralelo). Si el sistema de refrigeración se encuentra completamente en serie, puede que las celdas situadas en la parte final no se puedan refrigerar correctamente, suponiendo un grave problema. Por otro lado, un sistema que implemente una configuración en paralelo para cada módulo, mejoraría la refrigeración, pero aumentaría la complejidad y el coste del vehículo eléctrico.



*Figura 40: Distribución de temperaturas del líquido de refrigeración, en un plano horizontal.*



*Figura 41: Recta horizontal de análisis de temperaturas del fluido refrigerante.*

Con el fin de realizar un mejor estudio del comportamiento térmico del fluido, se trazan una serie de líneas rectas a través de un canal intermedio, como se muestra en la Figura 41. Obteniendo las siguientes gráficas:

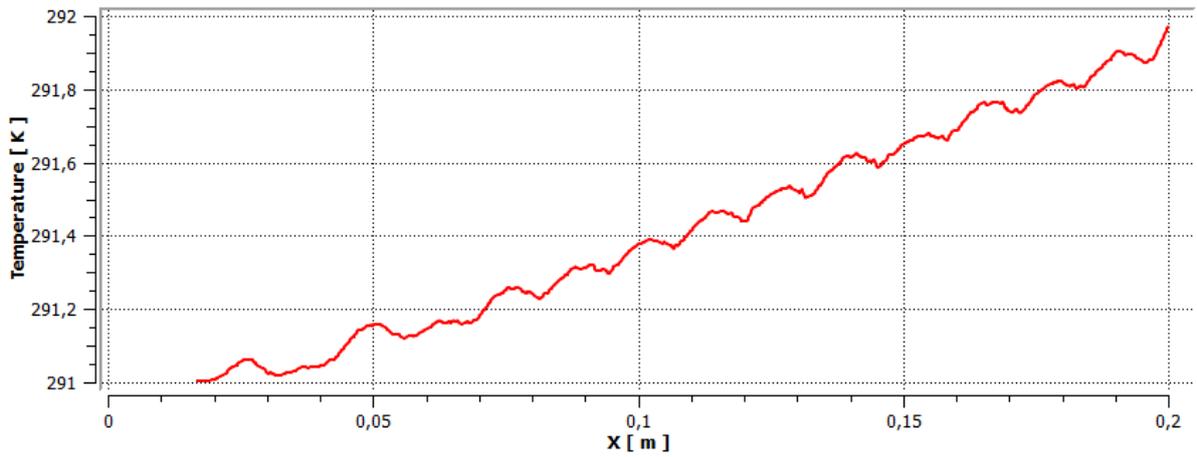


Figura 42: Distribución de temperaturas en la recta 1.

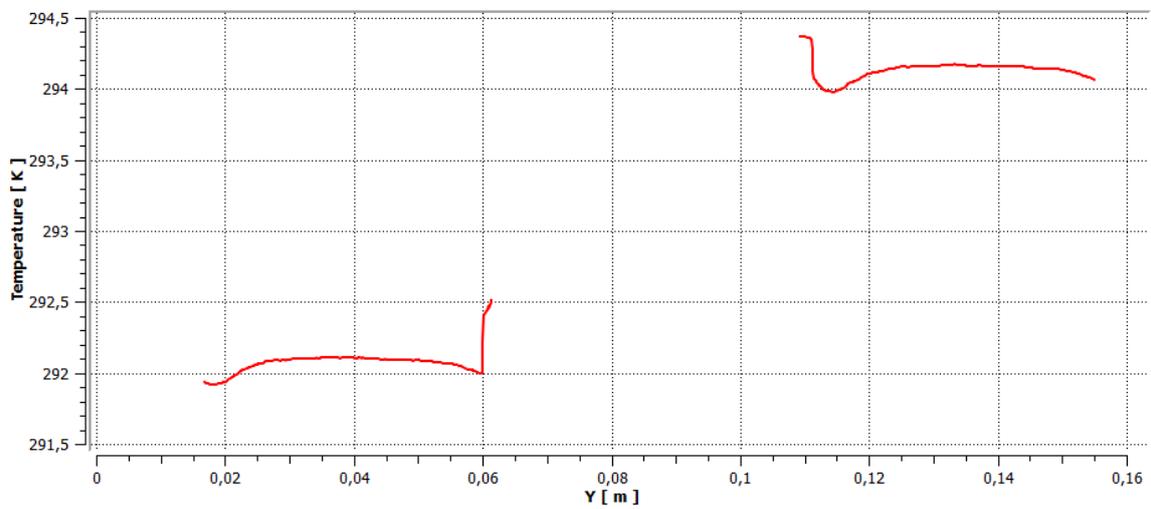


Figura 43: Distribución de temperaturas en la recta 2.

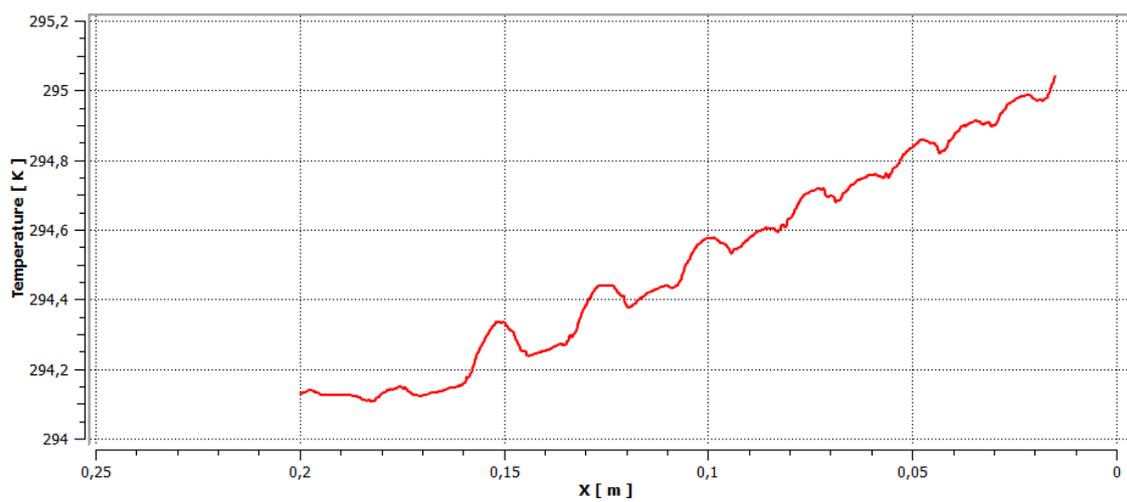


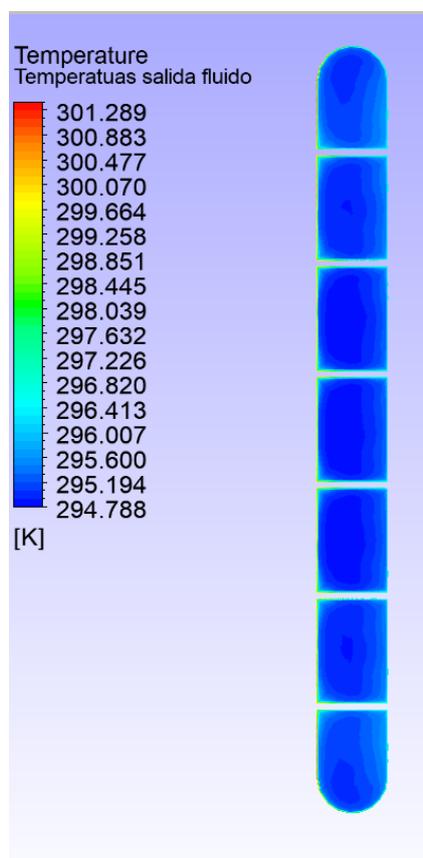
Figura 44: Distribución de temperaturas en la recta 3.

Los saltos presentes en Figura 42 y Figura 44, es producto de la diferencia de geometría entre las líneas rectas realizadas y la geometría del tubo, consecuentemente, hay sectores más cercanos al borde donde la temperatura es mayor.

En el primer tramo de refrigeración, donde el tubo está en contacto con 14 celdas de batería, la temperatura aumenta de los 291 K iniciales a 291,96 K. Por tanto, se produce un aumento de un grado en el refrigerante, describiendo una trayectoria prácticamente lineal.

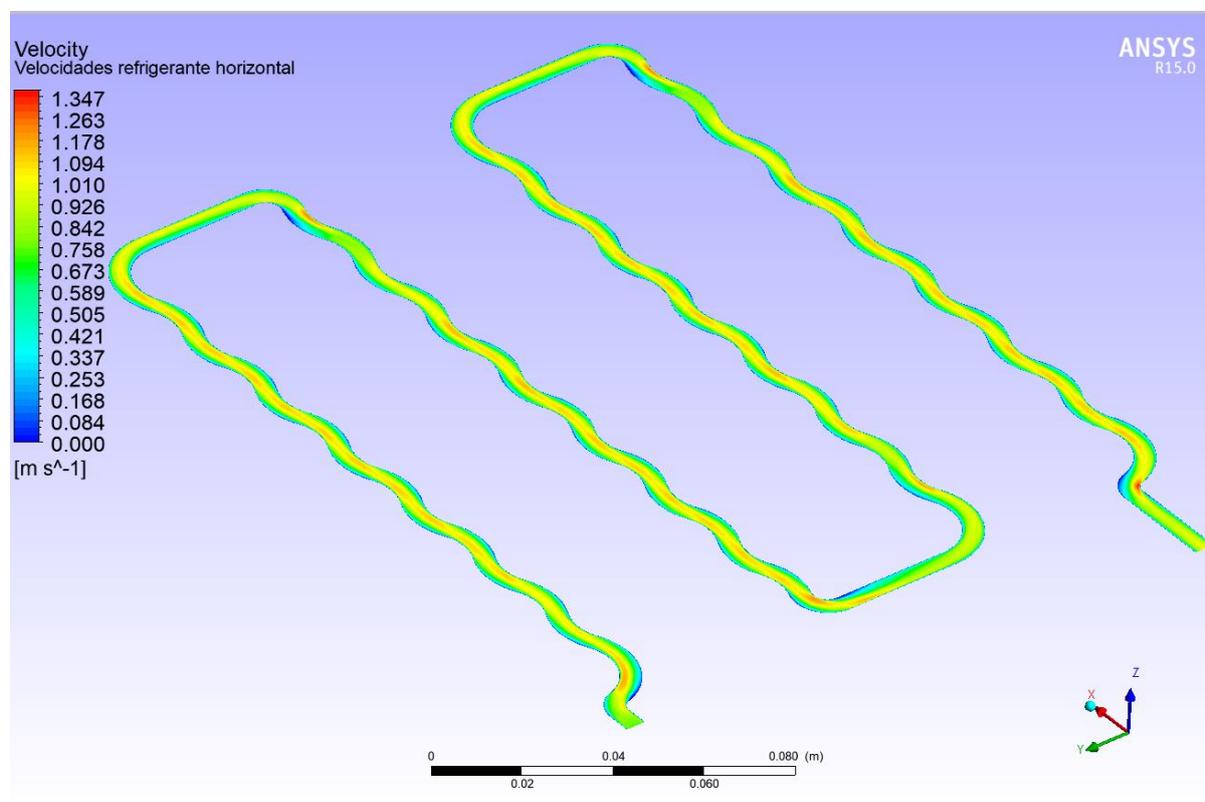
En el último tramo, se observa una misma progresión lineal a medida que se avanza por el tubo de refrigeración. En cambio, la diferencia de temperatura es de 0,88 K, aproximándose a los 295 K de temperatura de salida.

En este caso, los aumentos de temperatura en la Figura 43 es provocado por el paso de la recta por la capa limite térmica. A pesar de este suceso, la temperatura en esta zona se estabiliza, como se había mencionado previamente, y el decremento existente es de un valor pequeño, en torno a 0,25 K en cada segmento intermedio



*Figura 45: Distribución de temperaturas del líquido de refrigeración, en un plano vertical.*

En la Figura 45, se puede apreciar claramente la presencia de la capa límite térmica, explicada en el Apartado 6.2.3. Se observa cómo las temperaturas máximas se encuentran en la periferia, que se sitúan cerca de las baterías, y cómo va disminuyendo hasta alcanzar el centro del canal, donde se encuentra el flujo libre.



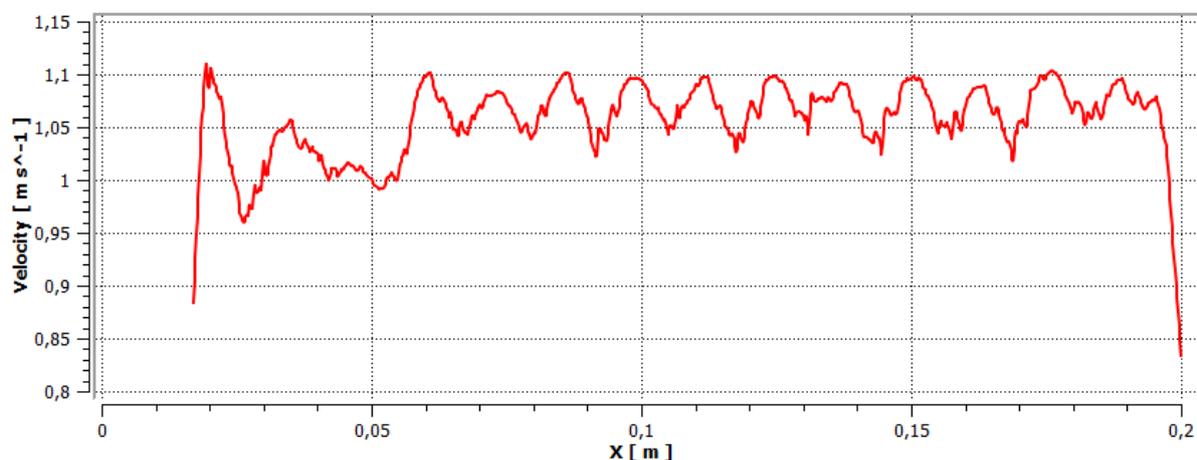
*Figura 46: Campo de velocidades del líquido de refrigeración, en un plano horizontal.*

Por otro lado, si se representa la velocidad del líquido refrigerante se puede estudiar su comportamiento en el interior del tubo de refrigeración. El rango de velocidades se encuentra entre 0 m/s y 1,347 m/s, siendo 0,75 m/s la velocidad inicial en los 7 canales y de manera homogénea por toda la sección.

En la Figura 46, se ve como a medida que avanza el refrigerante comienzan a actuar los fenómenos turbulentos, y el campo de velocidades se vuelve más heterogéneo. También, se puede observar cómo el flujo que se encuentra en el centro del canal, alcanza velocidades cercanas al 1 m/s. Este flujo central se mantiene a una velocidad relativamente constante hasta la salida de la refrigeración (Figura 45).

Se puede utilizar la recta 1 (Figura 41) para estudiar el comportamiento de la velocidad en un tramo del tubo (Figura 47). Se observa una primera zona con unas variaciones de velocidades más pronunciadas en comparación con las siguientes. Esta situación

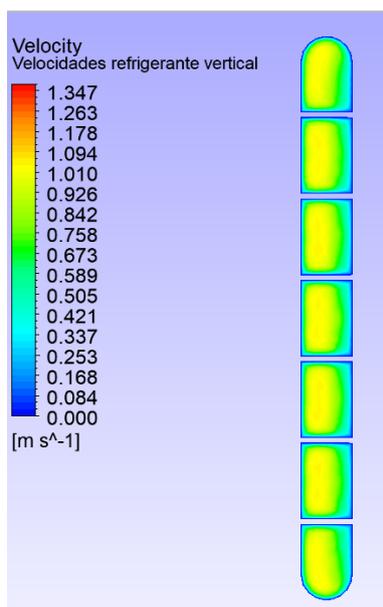
es provocada por que existe una geometría distinta en la entrada y salida del tubo. Estos aumentos son coincidentes en las zonas donde el tubo se adapta a la forma de la batería.



*Figura 47: Campo de velocidades del líquido de refrigeración de la recta 1.*

Cabe destacar las zonas posteriores a los segmentos intermedios y, en la parte final, ya que se producen velocidades máximas de 1.347 m/s. Enfrente de estos puntos, se generan zonas de estancamiento donde el flujo llega a detenerse por completo. Esta situación puede ser solventada si se modifica el diseño del tubo de refrigeración en esas zonas.

Identificar la capa límite, mencionada en el apartado 6.2.2, es posible si se muestran las velocidades mediante un plano de corte vertical en el tubo de refrigeración. En las zonas cercanas al tubo la velocidad es nula, coincidente con la temperatura máxima del fluido, y va aumentando la velocidad hasta llegar a la velocidad de flujo libre.



*Figura 48: Campo de velocidades del líquido de refrigeración, en un plano vertical.*

A partir del estudio del modelo, se puede dimensionar otros elementos del sistema de refrigeración, como la bomba, y, por tanto, conocer las características que tiene que cumplir para alcanzar las condiciones establecidas.

Las dos principales especificaciones que definen una bomba son el caudal y la presión a la que trabajan. La primera de ellas se puede conocer a partir de la velocidad y la sección establecida, en este caso:

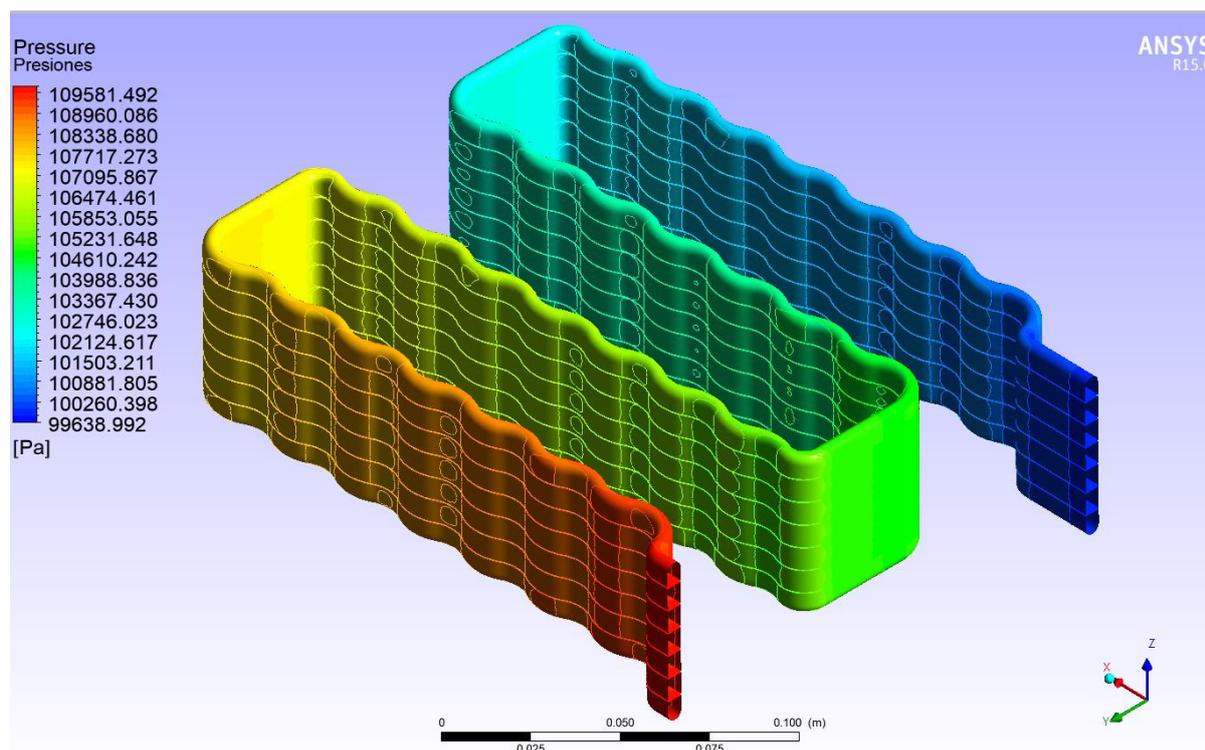
$$Q = \text{Velocidad} \cdot \text{Area} = 0,75 \cdot 254,635 \cdot 10^{-6} = 19,097 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 687,514 \text{ l/h}$$

En consecuencia, la bomba de ser capaz de aportar un caudal de 700 l/h (valor normalizado) para satisfacer las condiciones del modelo.

Por otro lado, la presión de la bomba implica una gran complejidad de cálculos, pero puede ser determinada por ANSYS.

El sistema de refrigeración se trata de un sistema cerrado, donde la bomba compensa las pérdidas de presión. El programa es capaz de calcular las pérdidas producidas por la fricción interna del fluido y el rozamiento con las paredes de los canales internos y, consecuentemente, la presión que debe aportar la bomba.

Al tratarse de un único tramo el circuito, es necesario determinar una presión de salida que se verá influenciada por la disposición del sistema de refrigeración entre modulas, en serie o en paralelo. En este caso, se establece una presión de salida alrededor de 100000 Pa.



*Figura 49: Distribución de presiones en el interior del tubo de refrigeración.*

Se observa en la Figura 49, como la presión va disminuyendo a medida que avanza por el tubo de refrigeración hasta llegar a una presión final de 99638,992 Pa. Esta reducción de presión se produce de manera paralela entre los 7 canales del tubo, generando unas pérdidas:

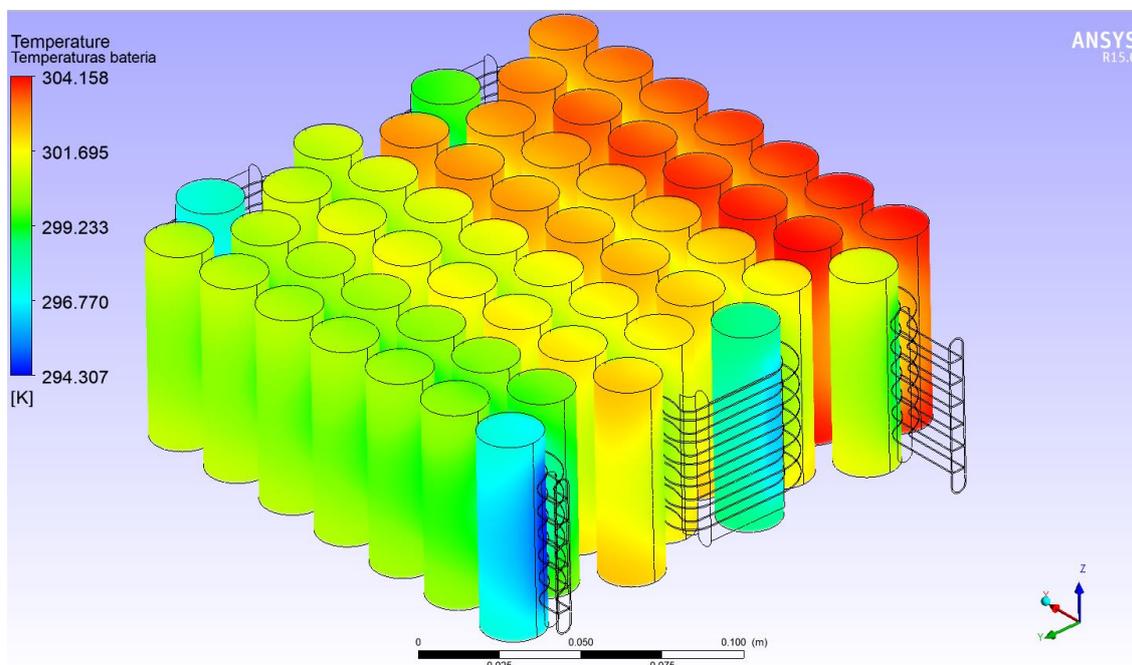
$$J = P_{inicial} - P_{final} = 109581,492 - 99638,992 = 9942,5 \text{ Pa} = 0,099425 \text{ bar}$$

Por lo tanto, la bomba deberá tener una presión de 0,1 bar (valor normalizado) y un caudal de 700 l/h, quedando totalmente definida.

Esto supone un gran ahorro en tiempo y en el aspecto económico, ya que los programas de CFD evitan la realización de modelos físicos con distintos dispositivos para estudiar su comportamiento y de esta manera, encontrar el idóneo.

## 8.6.1 CELDAS DE BATERÍA

Mediante el estudio de las temperaturas de las baterías, se estudia principalmente la temperatura máxima alcanzada por estas durante el funcionamiento y la variación de temperaturas existente entre distintas celdas.



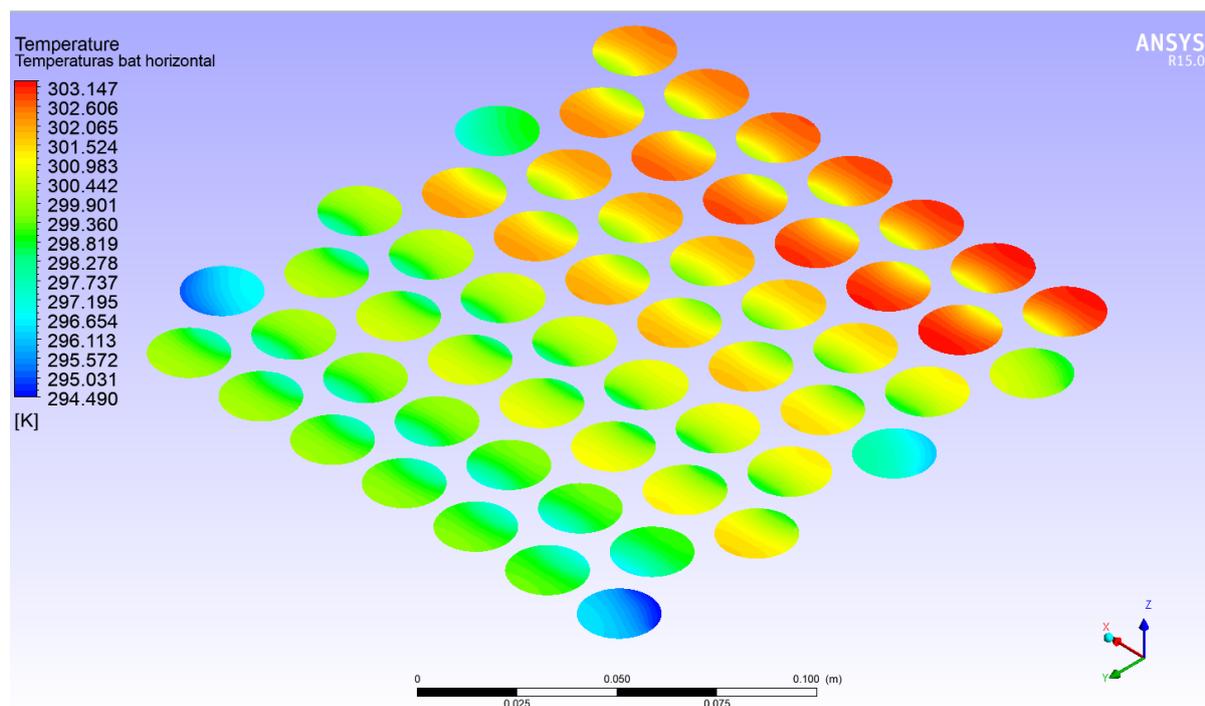
*Figura 50: Distribución de temperaturas en las celdas de baterías.*

Se mantienen los valores de referencia del análisis del líquido de refrigeración, con el objetivo de realizar un primer estudio sobre la distribución de temperaturas de las baterías. Las condiciones de referencia son un líquido refrigerante a 0,75 m/s a 291 K (Figura 49).

Destaca la diferencia de temperaturas entre algunas celdas contiguas, que se encuentran al inicio, en la zona intermedia y al final. Estas celdas se encuentran a una menor temperatura que el resto, debido principalmente a la geometría.

La geometría de la parte inicial y final es distinta ya que posee una mayor superficie de contacto entre el tubo de refrigeración y las celdas. Lo mismo ocurre en las zonas intermedias, porque el tubo gira sobre la celda.

Por lo tanto, cuanto mayor es la zona de contacto entre el tubo y la batería mejor será la refrigeración de esta. Se trata de un factor importante en el diseño, porque si se consigue que el tubo se adapte a la curvatura de las celdas, la eficiencia de sistema de refrigeración se verá incrementada.



**Figura 51:** Distribución de temperaturas en las celdas de baterías, en un plano horizontal.

A la hora de comparar las distintas temperaturas entre las celdas, se tomará los datos del punto medio de las baterías (Figura 50). Existen puntos de mayor temperatura que se encuentran en la superficie más alejada de la refrigeración o más cercana, donde se alcanzarían variaciones de 10 grados. Pero el estudio se debe realizar sobre las temperaturas del interior de las celdas, ya que en esas zonas es donde se producen las reacciones químicas.

En este caso, existe una diferencia de 7,034 K, situándose ligeramente por encima del límite recomendado para que exista un correcto funcionamiento y no aparezcan descompensaciones (diferencia recomendada 5-7 K).

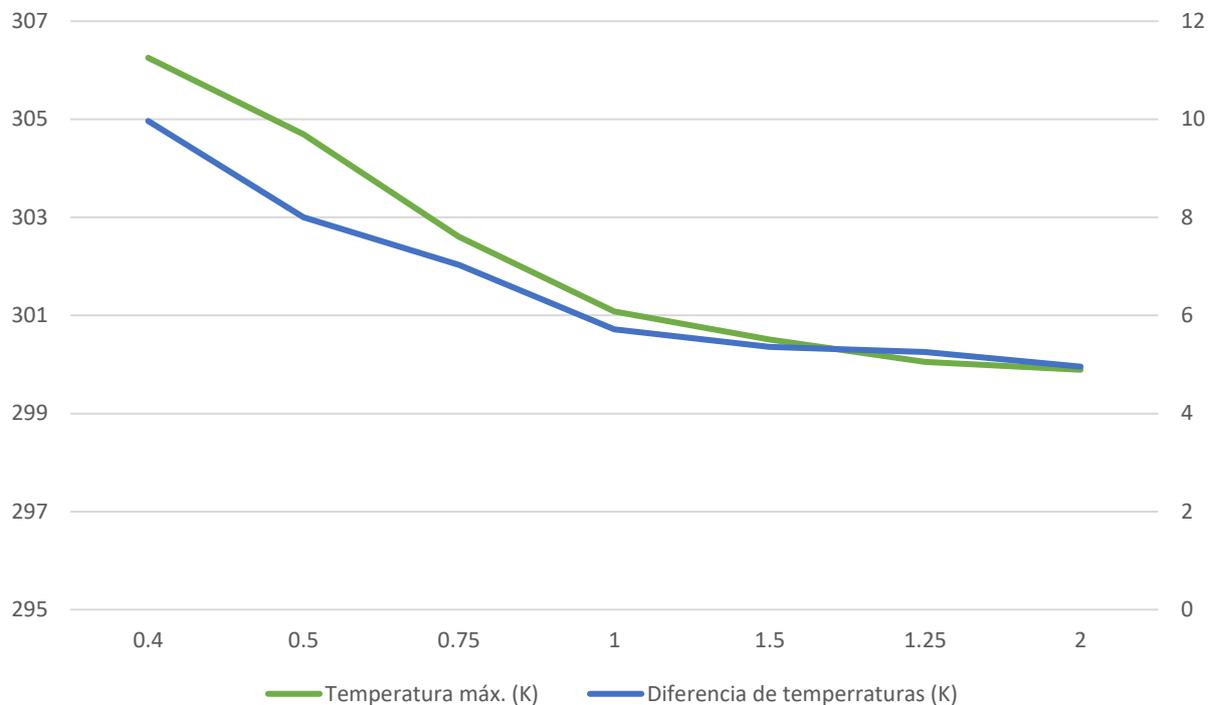
En cuanto la temperatura máxima, estas baterías mantiene su capacidad completa entre 23-30 °C (Apartado 8.1) y, por ello, es importante que se mantenga dentro de ese rango. Conservando los parámetros del refrigerante, la temperatura máxima es de 302,606 K (29,606 °C) siendo óptima para que las baterías desarrollen su capacidad máxima.

Uno de los parámetros que se pueden modificar con el objetivo de tanto las temperaturas máximas como las diferencias entre celdas, es la velocidad del líquido de refrigeración. Por ese motivo, se realizan simulaciones variando la velocidad entre 0,4-2 m/s, obteniendo los siguientes resultados:

<b>Velocidades (m/s)</b>	<b>Temperatura inicial refrigerante (K)</b>	<b>Temperatura final refrigerante (K)</b>	<b>Temperatura máxima baterías (K)</b>	<b>Temperatura mínima baterías (K)</b>	<b>Diferencia de temperaturas (K)</b>
0,4	291,000	299,400	306,254	296,289	9,965
0,5	291,000	297,500	304,696	295,983	8,713
0,75	291,000	295,700	302,606	295,572	7,034
1	291,000	294,700	301,082	295,364	5,718
1,5	291,000	293,500	300,507	295,150	5,357
1,25	291,000	293,400	300,053	294,800	5,253
2	291,000	293,000	299.892	294,936	4,956

*Figura 52: Tabla de las temperaturas de la batería a distintas velocidades del refrigerante.*

Para un mejor estudio, se mostrará los datos de temperatura máxima y diferencia de temperaturas en forma de gráfica.



**Figura 53:** Evolución de la temperatura máxima y variación de temperaturas a distintas velocidades del refrigerante.

En primer lugar, se estudia la evolución de la temperatura máxima de las baterías respecto a la velocidad.

En un primer tramo de velocidades, hasta 1 m/s, se produce un descenso considerable de la temperatura máxima, de 306,254 K (33,254 °C) hasta los 301,085 K (28,085 °C) (Figura 50). En cambio, no ocurre lo mismo en el segundo tramo, donde se aumenta la velocidad hasta 2 m/s y la temperatura únicamente decrece 1 grado.

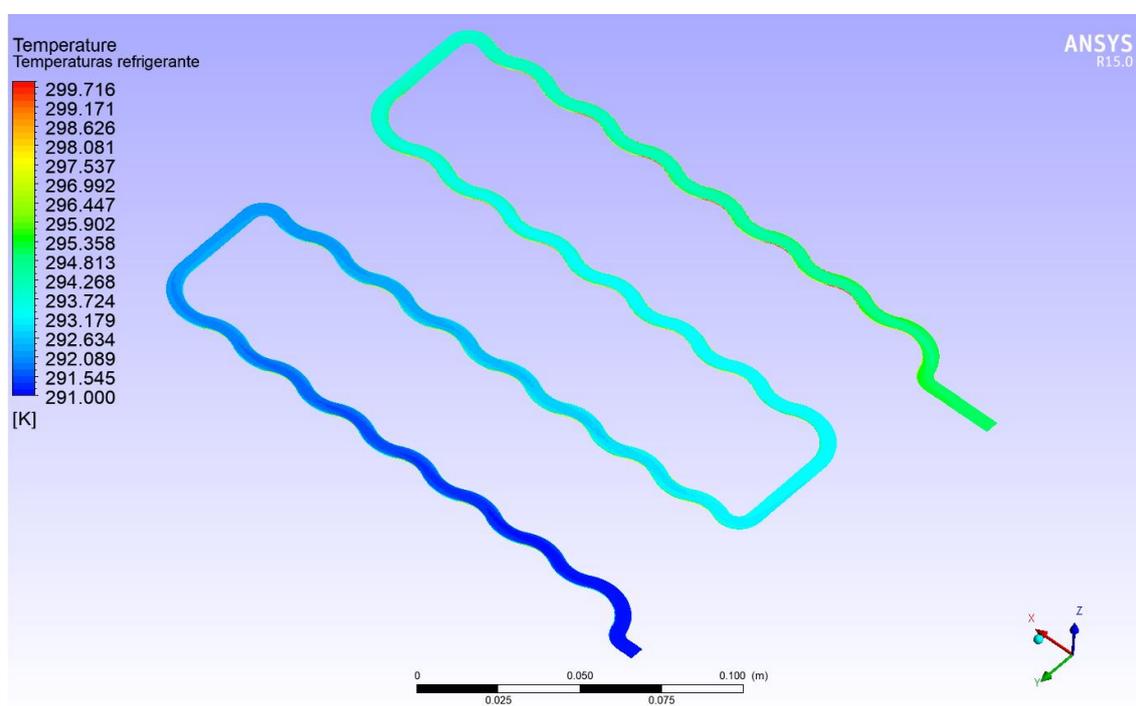
En consecuencia, en este módulo de baterías conseguiría una reducción en sus temperaturas máximas si se aumenta la velocidad del refrigerante hasta 1 m/s. Si se sigue aumentando la velocidad, la diferencia de temperaturas no sería significativa y encarecería el sistema de refrigeración, ya que se necesitaría una bomba de mayor potencia.

A pesar de que a velocidades bajas se supera el límite máximo de 30 °C, la diferencia sigue siendo aceptable y no supondría un descenso significativo en la eficiencia de las baterías del módulo.

Por otro lado, la diferencia de temperaturas desarrolla un comportamiento paralelo a las temperaturas máximas (Figura 52), como es lógico, sufriendo un descenso más pronunciado en un primer tramo y posteriormente se produce una estabilización.

Al contrario que en las temperaturas máximas, a velocidades bajas la diferencia es casi el doble (9,965 K) respecto lo recomendado, habilitando la posibilidad de que se produjesen fallos bajo esas condiciones de trabajo.

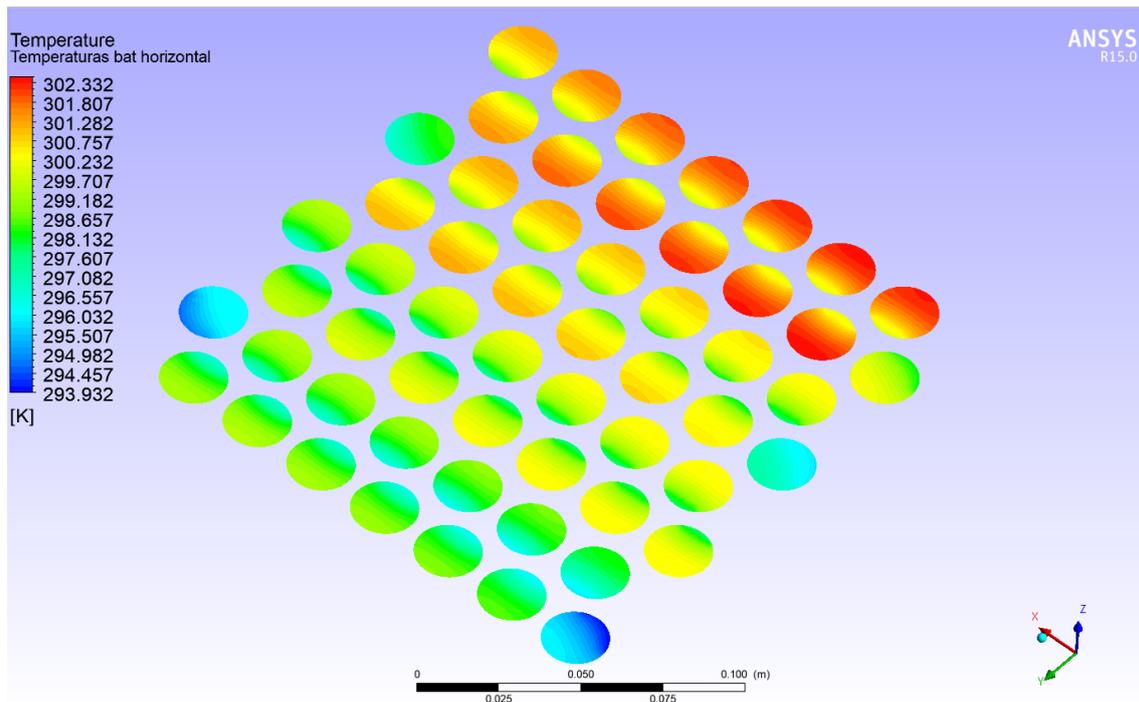
En último lugar, se estudiaría el modelo de referencia con una modificación en el material del tubo de refrigeración, por otro con mejores propiedades, como el cobre (Figura 17).



**Figura 54:** Distribución de temperaturas del líquido de refrigeración, en un plano horizontal (tubo de cobre).

La temperatura de salida del refrigerante se encuentra entorno a los 296,5 K. Si se compara con el modelo con tubo de aluminio, se observa que se producido un aumento de temperatura de 0,8 K.

En cambio, en el interior de las celdas las temperaturas bajas sitúan sobre 294,982 K y las altas en 301,282 K, existiendo una diferencia de 6,3 K. Por tanto, el cobre con una mayor conductividad (387.6 W/mK), permite una disminución en los tres datos estudiados de las celdas.



*Figura 55: Distribución de temperaturas en las celdas de baterías, en un plano horizontal (tubo de cobre).*

Es cierto que existe una ligera mejora en las condiciones de las baterías, en términos de temperaturas, pero un precio y un peso más elevado plantea dudas sobre la instalación en todo el conjunto del sistema de refrigeración. Esta situación podría encarecer de forma considerable tanto el coste como el peso del vehículo, sobre todo si se trata de un producto manufacturado.

## 8.7 CONCLUSIÓN

Durante el presente trabajo, se ha enfocado en el análisis del procedimiento para realizar el estudio de un módulo refrigerado de baterías mediante su modelización. Además, se han descrito las decisiones consideradas en el planteamiento, que han permitido llevar a cabo el desarrollo del problema.

Asimismo, ha permitido acercarse y conocer por primera vez las ventajas y posibilidades que aportan los programas de CFD, en este caso, mediante el estudio de un módulo de baterías. Posibilitando la disminución de tiempos y gastos en el diseño de los dispositivos, como en la determinación de las especificaciones de la bomba o detección de posibles fallos de diseño en la geometría del tubo de refrigeración. También, permite predecir el comportamiento térmico en condiciones críticas sin afectar a la seguridad, aunque durante este trabajo no se ha podido analizar por falta de tiempo.

De esta manera, no se ha centrado únicamente en el estudio de temperaturas del modelo, sino que se han analizado otras variables como la velocidad o las presiones debido al gran potencial de estos programas.

Por otro lado, se han observado aspectos teóricos de la Mecánica de Fluidos e Ingeniería Térmica, aplicados a un problema real. Cabe destacar, los conocimientos adquiridos en distintos softwares como CATIA y ANSYS Fluent, especialmente en los procesos de mallado y procesado dentro del programa.

Existen dos aspectos que precisan atención en futuros trabajos y que permiten una mayor fidelidad de la realidad modelizada.

- La consideración de una generación de calor uniforme en el interior de las celdas de las baterías. Esta situación podría solventarse mediante la obtención de datos experimentales, permitiendo definir la distribución de temperaturas en distintos puntos de carga. Además, permitiría el estudio del comportamiento del módulo en función del tiempo, transformándose en un problema transitorio y aumentando el número de datos resultantes.
- La realización de una validación experimental que corroboren los datos obtenidos y verifiquen el modelo creado. Para ello, sería necesario reproducir las condiciones determinadas en la simulación, como la materiales,

temperaturas o velocidades de refrigerante, y realizar una comparación entre los datos experimentales y los del modelo computacional.

En definitiva, el presente trabajo describe una parte de un proyecto mayor, donde se aplicarían una serie de recursos que permitan satisfacer la demanda de ciertos datos y, de esta manera, llevar a cabo un estudio completo y exhaustivo de la refrigeración de un módulo de baterías. Siendo el objetivo del proyecto la búsqueda de la distribución y condiciones más eficientes para conseguir un rendimiento óptimo de las baterías en todas las situaciones.



# ANEXOS

## ANEXO I: HOJAS DE ESPECIFICACIONES BATERIA INR21700-40T

*-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -*



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

### SPECIFICATION OF PRODUCT

**Lithium-ion rechargeable cell for power tools**

**Model name : INR21700-40T**

**December, 2017**

**Samsung SDI Co., Ltd.  
Energy Business Division**

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

### 1.0. Scope

This product specification has been prepared to specify the rechargeable lithium-ion cell ('cell') to be supplied to Customer by Samsung SDI Co., Ltd.

### 2.0. Description and model

2.1 Description	lithium-ion rechargeable cell
2.2 Model name	INR21700-40T
2.3 Site	Manufactured in Korea

### 3.0. Nominal specifications (\*)

Item	Specification
3.1 Standard discharge capacity	Min. 4,000mAh - Charge: 0.5C(2A), 4.20V, 0.05C(200mA) cut-off @ RT - Discharge: 0.2C(800mA), 2.5V cut-off @ RT
3.2 Rated discharge capacity	Min. 3,900 mAh - Charge: 1.5C(6A), 4.20V, 0.025C(100mA)cut-off @RT - Discharge: 10A, 2.5V cut-off @ RT
3.3 Nominal voltage	3.6V
3.4 Standard charge	CCCV, 2A, 4.20 V, 200mA cut-off
3.5 Rated charge	CCCV, 6A, 4.20 V, 100mA cut-off
3.6 Charging time	Standard charge : 180min / 200mA cut-off(@ RT) Rated charge: 70min / 100mA cut-off(@ RT)
3.7 Max. continuous discharge (Surface temperature)	35A(Without temperature cut) 45A(With 80 °C temperature cut)
3.8 Discharge cut-off voltage	2.5V (End of discharge)
3.9 Cycle life	Capacity $\geq$ 2,400mAh @ after 250cycles (60% of the standard capacity @ RT) - Charge : 6A, 4.20V, CCCV 100mA cut-off @ RT - Discharge: 35A , 2.5V cut-off @ RT
3.10 Retention characteristics	Capacity recovery(after the storage) $\geq$ 3,510 mAh (90% of the rated capacity @ RT) - Charge : 6A, 4.20V, CCCV 100mA cut-off @ RT - Storage : 30 days (@ 60 °C) - Discharge : 10A , 2.5V cut-off @ RT
3.11 Cell weight	70.0g max
3.12 Cell dimension	Height : Max 70.30mm Diameter : Max 21.22mm

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

#### 4.0 Outline dimensions

See the attachment (Fig. 1)

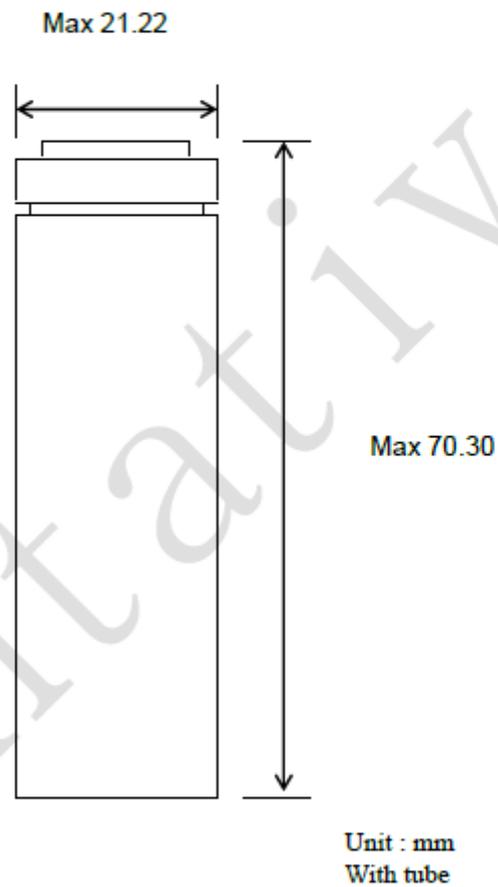


Fig.1. Outline dimensions of INR21700-40T

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

### 5.0. Appearance

There shall be no such defects as scratch, rust, discoloration, leakage which may adversely affect commercial value of the cell.

### 6.0. Standard test conditions

#### 6.1 Environmental conditions

Unless otherwise specified, all tests stated in this specification are conducted at temperature  $23 \pm 3^\circ$  and humidity under 65%.

#### 6.2 Measuring equipment

##### (1) Amp-meter and volt-meter

The amp-meter and volt-meter should have an accuracy of the grade 0.5mA and mV or higher.

##### (2) Slide caliper

The slide caliper should have 0.01 mm scale.

##### (3) Impedance meter

The impedance meter with AC 1kHz should be used.

### 7.0. Characteristics

#### 7.1 Standard charge

This " Standard charge" means charging the cell CCCV with charge current 0.5C (2,000mA), constant voltage 4.2V and 200mA cut-off in CV mode at 23°C for capacity.

#### 7.2 Rated charge

Rated charge means charging the cell CCCV with charge current 6A and 100mA cut-off at 23°C

#### 7.3 Standard discharge capacity

The Standard discharge capacity is the initial discharge capacity of the cell, which is measured with discharge current of 800mA(0.2C) with 2.5V cut-off at 23°C within 1hour after the Standard charge.

$$\text{Standard discharge capacity} \geq 4,000\text{mAh}$$

Which complying to the minimum capacity of IEC61960 standard

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

**7.4 Rated discharge capacity**

The rated discharge is the discharge capacity of the cell, which is measured with discharge current of 10A with 2.5V cut-off at 23°C within 1hour after the rated charge.

$$\text{Rated discharge capacity} \geq 3,900\text{mAh}$$

**7.5 Initial internal impedance**

Initial internal impedance measured at AC 1kHz after Rated charge

$$\text{Initial internal impedance} \leq 12\text{m}\Omega$$

**7.6 Temperature dependence of discharge capacity**

Capacity comparison at each temperature, measured with discharge constant current 10A and 2.5V cut-off after the rated charge is as follows.

Discharge temperature				
-20°C	-10°C	0°C	23°C	60°C
60%	75%	80%	100%	95%

Note: If charge temperature and discharge temperature is not the same, the interval for temperature change is 3 hours.  
Percentage index of the discharge at 23°C at 10A (=3,900mAh) is 100%.

**7.7 Temperature dependence of charge capacity**

Capacity comparison at each temperature, measured with discharge constant current 10A and 2.5V cut-off after the rated charge is as follows.

	Charge temperature					Discharge temperature
	0°C	5°C	23°C	45°C	50°C	
Relative capacity	80%	90%	100%	95%	95%	23°C

Note: If charge temperature and discharge temperature is not the same, the interval for temperature change is 3 hours.  
Percentage as an index of the rated discharge at 23°C at 10A (=3,900mAh) is 100%.

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

### 7.8 Charge rate capabilities

Discharge capacity is measured with constant current 10A and 2.5V cut-off after the cell is charged with 4.2V as follows.

	Charge condition	
	Standard 2.0A	Rated 6A
Current		
Cut-off	200mA	100mA
Relative Capacity	100%	100%

Note: Percentage index of the discharge at 23°C at 10A (=3,900mAh) is 100%.

### 7.9 Discharge rate capabilities

Discharge capacity is measured with the various currents in under table and 2.5V cut-off after the rated charge.

	Discharge condition			
	10A	20A	30A	40A
Current				
Relative Capacity	100%	95%	93%	90%

Note: Percentage index of the discharge at 23°C at 10A (=3,900mAh) is 100%.

### 7.10 Cycle life

With rated charge and maximum continuous discharge.

Capacity after 250cycles,

- Charge : 6A, 4.2V, 100mA cutoff
- Discharge : 35A, 2.5V cut off

Capacity  $\geq$  2,400mAh (60% of the standard capacity at 25°C)

### 7.11 Retention characteristics

Capacity after storage for 30 days at 60°C from the rated charge,  
Measured with discharge current 10A with 2.5V cut-off at 23°C

Capacity recovery(after the storage)  $\geq$  3,510 mAh (90% of the rated capacity at 23°C)

### 7.12 Status of the cell as of ex-factory

The cell should be shipped in 3.340V to 3.490V charging voltage range.

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

## 8.0. Mechanical Characteristics

### 8.1 Drop test

Test method: Fully rated charged Cells drop onto the concrete floor from 1.0m height at a random direction 3 times. The cells or batteries are dropped so as to obtain impacts in random orientations. After the test, the sample shall be put on rest for a minimum of one hour and then a visual inspection shall be performed.

Criteria: No fire, no explosion.

Drop test shall be performed with the IEC62133 standard

### 8.2 Vibration test

Test method: As to the UN transportation regulation(UN38.3), for each axis (X and Y axis with cylindrical cells) 7Hz→200Hz→7Hz for 15min, repetition 12 times totally 3hours, the acceleration 1g during 7 to 18Hz and 8g (amplitude 1.6mm) up to 200Hz.

Criteria: No leakage, with less than 10% of OCV drop

Vibration test shall be performed with the UN38.3 standard

## 9.0. Safety

### 9.1 Overcharge test

Test method: Cell is to be discharged at a constant current of 0.8A to 2.5V. The cell is then to be charged with a 20V and 18A. Charging duration is to be 7 h.

Criteria: No fire, and no explosion.

Overcharge test shall be performed with the UL1642 standard

### 9.2 External short-circuit test

Test method: Fully rated charged cell is to be short-circuited by connecting the positive and negative terminals of the battery with a circuit load having a resistance load of  $80 \pm 20 \text{ m}\Omega$ . The battery is to discharge until a fire or explosion is obtained, or until it has reached a completely discharged state of less than 0.2 V and the battery case temperature has returned to  $\pm 10^\circ\text{C}$  of ambient temperature. The return to near ambient of the battery (cell) casing in an indication of ultimate results.

Tests are to be conducted at  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  and at  $55 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Criteria: No fire, and no explosion

External short-circuit test shall be performed with the UL1642 standard

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

### 9.3 Forced discharge test

Test method: A discharged cell is subjected to a reverse charge at 1.0C (4.0A) for 90 min.

Criteria: No fire, and no explosion.

Forced discharge test shall be performed with the IEC62133 standard

### 9.4 Heating test

Test method: To heat up the standard charged cell at heating rate 5°C per minute up to 130°C and keep the cell in oven for 30 min.

Criteria: No fire, and no explosion.

Heating test shall be performed with the UL1642 standard(10 min) & GB31241 standard (30 min).

### 10.0. Warranty

Samsung SDI will be responsible for replacing the cell against defects or poor workmanship for 15months from the date of shipping. Any other problem caused by malfunction of the equipment or mix-use of the cell is not under this warranty.

The warranty set forth in proper using and handling conditions described above and excludes in the case of a defect which is not related to manufacturing of the cell.

### 11.0. Others

#### 11.1 Storage for a long time

If the cell is kept for a long time (3 months or more), It is strongly recommended that the cell is preserved at dry and low-temperature.

#### 11.2 Others

Any matters that specifications do not have, should be conferred with between the both parties.

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

## Proper use and handling of lithium ion cells

See before using lithium-ion cell

This document has been prepared to describe the appropriate cautions and prohibitions, which the customer should take or employ when the customer uses and handles the lithium ion cell to be manufactured and supplied by Samsung SDI Co., Ltd., in order to obtain optimum performance and safety.

### 1. Charging

#### 1.1 Charging current

Charging current should be less than maximum charge current specified in the product specification.

#### 1.2 Charging voltage

Charging should be done by voltage less than that specified in the product specification.

#### 1.3 Charging time

Continuous charging under specified voltage does not cause any loss of performance characteristics. However, the charge timer is recommended to be installed from a safety consideration, which shuts off further charging at time specified in the product specification.

#### 1.4 Charging temperature

The cell should be charged within a range of specified temperatures in the specification.

#### 1.5 Reverse charging

The cell should be connected, confirming that its poles are correctly aligned. Inverse charging should be strictly prohibited. If the cell is connected improperly, it may be damaged.

### 2. Discharging

#### 2.1 Discharging

2.1.1 The cell shall be discharged continuously at less than maximum discharge current specified in the product specification. In case of the higher discharge current should be set, it shall be discussed together with SDI.

#### 2.2 Discharging temperature

2.2.1 The cell should be discharged within a range of temperatures specified in the product specification.

2.2.2 Otherwise, it may cause loss of characteristics.

3.3.4 The charger should equip with a device to detect voltage of cell block and to determine recharging procedures.

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

### 2.3 Over-discharging

- 2.3.1 The system should be equipped with a device to prevent further discharging exceeding discharging cut-off voltage specified in the product specification.
- 2.3.2 Over-discharging may cause loss of performance, characteristics of battery function.
- 2.3.3 Over-discharging may occur by self-discharge if the battery is left for a very long time without any use.
- 2.3.4 The charger should be equipped with a device to detect cell voltage and to determine recharging procedures.

## 3. Storage

### 3.1 Storage conditions

- 3.1.1 The cell should be stored within a range of temperatures specified in the product specification.
- 3.1.2 Otherwise, it may cause loss of performance characteristics, leakage and/or rust.

### 3.2 Long-term storage

- 3.2.1 The cell should be used within a short period after charging because long-term storage may cause loss of capacity by self-discharging.
- 3.2.2. If long-term storage is necessary, the cell should be stored at lower voltage within a range specified in the product specification, because storage with higher voltage may cause more loss of performance characteristics.
- 3.2.3. Store the battery at 0 ~ 23°C, low humidity (below 65%), no dust and no corrosive gas atmosphere.

## 4. Cycle life

### 4.1 Cycle life performance

- 4.1.1 The cell can be charged/discharged repeatedly up to times specified in the produce specification with a certain level of capacity also specified in the product specification.
- 4.1.2 Cycle life may be determined by conditions of charging, discharging, operating temperature and/or storage.

## 5. Battery Pack Assembly

### 5.1 Prohibition of usage of damaged cell

- 5.1.1 The cell should be inspected visually before battery assembly.
- 5.1.2 The cell should not be used if sleeve-damage, can-distortion and/or electrolyte-smell is detected.

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

## 5.2 Terminals handling

5.2.1 Excessive force on the negative terminal should be avoided when external strip terminal is welded.

## 5.3 Transportation

5.3.1 If the cell is necessary to be transported to such as the battery manufacturer, careful precautions should be taken to avoid damage of cell.

## 6. Others

### 6.1 Disassembly

6.1.1 The cell should not be dismantled from the battery pack.

6.1.2 Internal short-circuit caused by disassembly may lead to heat generation and/or venting.

6.1.3 When the electrolyte is coming in contact with the skin or eyes, wash immediately with fresh water and seek medical advice.

### 6.2 Short-circuiting

6.2.1 Short-circuit results in very high current which leads to heat generation.

6.2.2 An appropriate circuitry should be employed to protect accidental short-circuiting.

### 6.3 Incineration

6.3.1 Incinerating and disposing of the cell in fire are strictly prohibited, because it may cause rupture and explosion.

### 6.4 Immersion

6.4.1 Soaking the cell in water is strictly prohibited, because it may cause corrosion and leakage of components to be damaged to functions.

### 6.5 Mixing use

6.5.1 Different types of cell, or same types but different cell manufacturer's shall not be used, which may lead to cell imbalance, cell rupture or damage to system due to the different characteristics of cell.

6.5.2 Do not mix use the cells from different batches/ranks even they are the same cell types from the same manufacturer.

### 6.6 Battery disposal

6.6.1 Although the cell contains no environmentally hazardous component, such as lead or cadmium. the battery should be disposed according to the local regulations when it is disposed.

6.6.2 The cell should be disposed with a discharged state to avoid heat generation by an inadvertent short-circuit.

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

## Pack Design Guideline for Lithium Ion Cells

**If a customer's battery pack cannot meet Pack Design Guideline, SDI cannot take responsibility for a quality issue about a battery cell.**

### 1. Electrical design

#### 1.1 Charge

- 1.1.1 Stop charging the battery if charging isn't completed within the specified time.
- 1.1.2 The battery can be used within the following temperature ranges.  
Don't exceed these ranges.  
Charge temperature ranges : 0°C ~ 50°C
- 1.1.3 Charge current must be controlled by specified value in Cell specification.
- 1.1.4 Cut-off Voltage of charging must be 4.2V.
- 1.1.5 Charger must stop charging battery by detecting either charging time or current specified in Cell's specification.
- 1.1.6 Recharge Voltage must be at least 0.1V lower than Max charging Voltage.
- 1.1.7 Do not charge the battery under 1.0V voltage.
- 1.1.8 Voltage range of the battery for pre-charge mode is 1.0 ~ 3.0V with a charging current of 0.1 ~ 0.5C

#### 1.2 Discharge

- 1.2.1 Discharge current must be controlled by specified value in Cell's specification.
- 1.2.2 Cut-off Voltage of discharging must be over 2.5V.
- 1.2.3 The battery can be used within the following temperature ranges.  
Don't exceed these ranges.  
Discharge temperature ranges : -20°C ~ 80°C

#### 1.3 Storage

Store the battery at low temperature (below 60°C, 20°C is recommended), low humidity (below 65%), no dust and no corrosive gas atmosphere.

#### 1.4 Design of positioning the battery pack in application and charger

To prevent the deterioration of the battery performance caused by heat, battery shall be positioned away from the area where heat is generated in the application and the charger.

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

### 1.5 Safety Device

Be sure adopting proper safe device such as PTC specified type or model in Cell Specification. If you intend to adopt different safety device which is not specified in Cell Specification, please contact Samsung SDI to investigate any potential safety problem. Be sure designing 2nd protective devices such as PTC & PCM at the same time to protect Cell just in case one protective device is fault.

## 2. Design of System

### 2.1 Connection between the cell and the battery

- 2.1.1 The cell should not be soldered directly with other cells. Namely, the cell should be welded with leads on its terminal and then be soldered with wire or leads to solder.
- 2.1.2 Otherwise, it may cause damage of component, such as separator and insulator, by heat generation.

### 2.2 Positioning the battery in the System

- 2.2.1 The battery should be positioned as possible as far from heat sources and high temperature components.
- 2.2.2 Otherwise, it may cause loss of characteristics.
- 2.2.3 The recommended spacing between the cells is more than 1mm.

### 2.3 Mechanical shock protection of the battery

- 2.3.1 The battery should be equipped with appropriate shock absorbers in the pack in order to minimize shock, which can damage the cells. .
- 2.3.2 Otherwise, it may cause shape distortion, leakage, heat generation and/or rupture and/or open circuit.
- 2.3.3 Ultrasonic should not be used when manufacturing battery packs as it can damage the connection between component parts.

### 2.4 Short-circuit protection of the cell

- 2.4.1 The cell is equipped with an insulating sleeve to protect short-circuit which may occur during transportation, battery assembly and /or system operation.
- 2.4.2 If the cell sleeve is damaged by some causes such as outside impact, it may cause short-circuit with some wiring inside the battery.

### 2.5 Connection between the battery and charger/system

- 2.5.1 The battery should be designed to be connected only to the specified charger and system.
- 2.5.2 A reverse connection of the battery, even in the specified system, should be avoided by employing special battery design such as a special terminals.

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

**2.6 Pack design**

2.6.1 The current consumption of the battery pack should be under 10uA after shut down.

2.6.2 Cell voltage monitoring system.

The system (charger or pack) should be equipped with a device to monitor each voltage of cell block to avoid cell imbalance which can cause damage to the cells.

2.6.3 The battery pack or system should have warning system such as over temperature, over voltage, over current, and so on.

2.6.4 Mechanical design

Item	Portable IT	Power-Tool	Medical	E-Bike	E-Scooter	EV/LEV	ESS/UPS
<input type="checkbox"/> Need partitions(separator) between BMS and a Cell	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
<input type="checkbox"/> Need to check if the pack is designed to be able to avoid thermal runaway (1KWh ↑)					⊙	⊙	⊙
<input type="checkbox"/> Need to analyze the battery pack's thermal distribution and its effect on the pack's life cycle					⊙	⊙	⊙
<input type="checkbox"/> Need to use a non-flammable (VO level) case	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
<input type="checkbox"/> Need to apply improved material (Steel) to the case						⊙	⊙
<input type="checkbox"/> Need to analyze the battery pack's structure, system, installation status and use environment						⊙	⊙

Ten

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

## Handling precaution and prohibitions of lithium rechargeable cells and batteries

Inaccurate handling of lithium ion and lithium ion batteries rechargeable battery may cause leakage, heat, smoke, an explosion, or fire.

This could cause deterioration of performance or failure. Please be sure to follow instructions carefully.

### 1. Safety precaution and prohibitions

To assure product safety, describe the following precautions in the instruction manual of the application.

### 2. Danger

#### 2.1 Electrical misusage

- 2.1.1 Use dedicated charger.
- 2.1.2 Use or charge the battery only in the dedicated application.
- 2.1.3 Don't charge the battery by an electric outlet directly or a cigarette lighter charger.
- 2.1.4 Don't charge the battery reversely.

#### 2.2 Environmental misusage

- 2.2.1 Don't leave the battery near the fire or a heated source.
- 2.2.2 Don't throw the battery into the fire.
- 2.2.3 Don't leave, charge or use the battery in a car or similar place where inside of temperature may be over 60°C.
- 2.2.4 Don't immerse, throw, wet the battery in water / seawater.

#### 2.3 Others

- 2.3.1 Don't fold the battery cased with laminated film such as pouch and Polymer.
- 2.3.2 Don't store the battery in a pocket or a bag together with metallic objects such as keys, necklaces, hairpins, coins, or screws.
- 2.3.3 Don't short circuit (+) and (-) terminals with metallic object intentionally.
- 2.3.4 Don't pierce the battery with a sharp object such as a needle, screw drivers.
- 2.3.5 Don't heat partial area of the battery with heated objects such as soldering iron.
- 2.3.6 Don't hit with heavy objects such as a hammer, weight.

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

- 2.3.7 Don't step on the battery and throw or drop the battery on the hard floor to avoid mechanical hock.
- 2.3.8 Don't disassemble the battery or modify the battery design including electric circuit.
- 2.3.9 Don't solder on the battery directly.
- 2.3.10 Don't use seriously scared or deformed battery.
- 2.3.11 Don't put the battery into a microwave oven, dryer ,or high-pressure container.
- 2.3.12 Don't use or assemble the battery with other makers' batteries, different types and/or models of batteries such as dry batteries, nickel-metal hydride batteries, or nickel-cadmium batteries.
- 2.3.13 Don't use or assemble old and new batteries together.

### 3. Warning

- 3.1 Stop using the battery if the battery becomes abnormally hot, order, discoloration, deformation, or abnormal conditions is detected during use, charge, or storage.
- 3.2 Keep away from fire immediately when leakage or foul odors are detected. If liquid leaks onto your skin or cloths, wash well with fresh water immediately.
- 3.3 If liquid leaking from the battery gets into your eyes, don't rub your eyes and wash them with clean water and go to see a doctor immediately.
- 3.4 If the terminals of the battery become dirty, wipe with a dry cloth before using the battery.
- 3.5 Cover terminals with proper insulating tape before disposal.

### 4. Caution

- 4.1 Electrical misuseage
  - Battery must be charge with constant current-constant voltage (CC/CV).
- 4.2 Others
  - 4.2.1 Keep the battery away from babies and children to avoid any accidents such as swallow.
  - 4.2.2 If younger children use the battery, their guardians should explain the proper handling method and precaution before using.
  - 4.2.3 Before using the battery, be sure to read the user's manual and precaution of its handling.
  - 4.2.4 Before using charger, be sure to read the user's manual of the charger.

*-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary -*



Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0
-----------	--------------	-------------	-----

- 4.2.5 Before installing and removing the battery from application, be sure to read user's manual of the application.
- 4.2.6 Replace the battery when using time of battery becomes much shorter than usual.
- 4.2.7 Cover terminals with insulating tape before proper disposal.
- 4.2.8 If the battery is needed to be stored for an long period, battery should be removed from the application and stored in a place where humidity and temperature are low.
- 4.2.9 While the battery is charged, used and stored, keep it away from object materials with static electric chargers.

## ANEXO II: PLANO TUBOS DE REFRIGERACIÓN MICROCANALES DE ALUMINIO

48*5-8 孔		48*9.4-8 孔	
49*6.1-9 孔		49*6.9-8 孔	
49.2*7-8 孔		49.5*4.5-12 孔	
53*5-15 孔		53*6.5-4 孔	
53*6.5-7 孔		53*7.5-16 孔	
54.7*8-12 孔		56*6-7 孔	
56*10.5-9 孔		56*10.5-10 孔	
57*6.6-9 孔		58*4.6-10 孔	
58*6.5-4 孔		58*6.5-7 孔	
60*4.5-15 孔		60*7-9 孔	
61*7-10 孔		62*6-8 孔	
62*6-10 孔		62*8-11/13 孔	

## ANEXO III: CARACTERÍSTICAS DEL LÍQUIDO DE REFRIGERACIÓN



AN090903\_c

APPLICATION NOTE

### CARACTERÍSTICAS DEL LÍQUIDO DE REFRIGERACIÓN

#### ANTECEDENTES

Cada vez existen mas aplicaciones con semiconductores de alta potencia, que necesitan sistemas de refrigeración de elevada capacidad, basados en la circulación de líquidos por el interior de cuerpos disipadores de diferentes formas y materiales.

Debido a ello se producen diversas consultas en referencia al tipo o calidad del líquido de refrigeración utilizado.



#### SELECCION DEL LÍQUIDO DE REFRIGERACIÓN.

En primer lugar, debemos indicar que el agua pura des-ionizada es el mejor medio de refrigeración para sistemas cerrados siempre que la misma se mantenga por encima de la temperatura de congelación.

Por otra parte, también se utiliza la combinación agua-etilenglicol en diversas proporciones, actuando el etilenglicol como anticongelante y anticorrosivo.

El rendimiento de los disipadores utilizando mezcla agua-etilenglicol disminuye respecto al del agua pura des-ionizada en diversos grados según la proporción de la mezcla, las proporciones de referencia normalmente utilizadas son del 30% y 50% de etilenglicol en agua.

Existen otros líquidos susceptibles de ser usados como refrigerantes, e incluso productos especialmente formulados para esta aplicación, pero su especificidad y limitado nivel de uso hace que escapen al objetivo de este texto.

En la práctica, muchos sistemas industriales utilizan también el agua corriente debido a su bajo coste inicial, y, en el caso de no llevar un control estricto de la calidad del agua, resulta en la producción de numerosas averías, en algunos casos catastróficas.

#### APLICACIÓN RECOMENDADA RESPECTO AL DISIPADOR.

Según el material del disipador (Aluminio, Cobre o Acero inoxidable) es recomendable utilizar uno u otro líquido, con el objeto de minimizar lo fenómenos de corrosión a medio y largo plazo. La tabla siguiente ofrece una orientación sobre las combinaciones utilizables.

Material del disipador	Agua corriente	Mezclas agua-glicol	Agua desionizada	Aceite	Fluidos dieléctricos
COBRE	OK	OK	OK	OK	OK
ALUMINIO	NO OK	OK	NO OK	OK	OK
ACERO INOXIDABLE	OK	OK	OK	OK	OK

RECTIFICADORES GUASCH, S.A.

Ciutat de Granada, 80  
08005 BARCELONA  
SPAIN

Se reserva el derecho de cambiar los límites, las condiciones de prueba y dimensiones indicadas en esta hoja sin previo aviso.  
Reserves the right to change limits, test conditions and dimensions given in this data sheet at any time without previous notice.

Tel.: +34 93 309 88 91  
Fax.: +34 93 300 18 41  
e-mail: info@e-guasch.com  
www.e-guasch.com

**APPLICATION NOTE**

**CARACTERÍSTICAS MÍNIMAS DEL AGUA CORRIENTE.**

Para que el agua corriente sea utilizable como medio refrigerante es recomendable que cumpla unos niveles mínimos de calidad, que se exponen en la siguiente tabla.

Valores mínimos de calidad de agua corriente		
	min.	max
Valor pH	7.0	9.0
Cloratos	0	20 p.p.m.
Nitratos	0	10 p.p.m.
Sulfatos	0	100 p.p.m.
Sólidos (total)	0	250 p.p.m.
Carbonato cálcico	0	250 p.p.m.

En la mayoría de los casos el análisis químico no es una opción disponible, en su lugar puede realizarse una medición de la resistividad del agua que ofrecerá una guía satisfactoria de la cantidad de sólidos disueltos.

Un valor mínimo de 2500 Ohmios/cm, medido a 25°C, es usualmente suficiente para la aplicación del agua corriente como líquido de refrigeración.

El contenido aproximado de sólidos disueltos puede calcularse por la fórmula:

$$\text{Sólidos (p.p.m.)} = 640000 / \text{Resistividad específica en Ohms-centímetro}$$



Salvo que el circuito sea eléctricamente aislado, las conexiones hidráulicas entre los disipadores y tierra (o entre ellos mismos) deben tener una longitud suficiente para mantener la corriente de pérdidas a valores aceptables, de otra manera, los efectos electrolíticos producirán la rápida corrosión de los disipadores, especialmente de los puntos de conexión.

La longitud mínima recomendada es de unos 600 mm. para aplicaciones a 400 V<sub>RMS</sub>.

Los tubos conductores deben ser de material aislante y esto debe ser verificado, ya que, lamentablemente, no es raro encontrar instalaciones con tubos de caucho negro conductor eléctrico.

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS LÍQUIDOS DE REFRIGERACIÓN HABITUALES.**

LÍQUIDO	Conductividad térmica (k)	Calor específico (C <sub>p</sub> )	Viscosidad dinámica (μ)	Densidad (ρ)	Numero de Prandtl (Pr)
Agua	0.61 W/mK	4072.71 J/kg K	0.000868 Pa s	996.58 kg/m <sup>3</sup>	5.78
Agua-etilenglicol 30%	0.49 W/mK	3729.95 J/kg K	0.001864 Pa s	1035.02 kg/m <sup>3</sup>	14.29
Agua-etilenglicol 50%	0.43 W/mK	3297.63 J/kg K	0.003367 Pa s	1053.25 kg/m <sup>3</sup>	25.82
Etilenglicol	0.25 W/mK	2408.62 J/kg K	0.017195 Pa s	1112.13 kg/m <sup>3</sup>	164.58

160527 Rev.:1

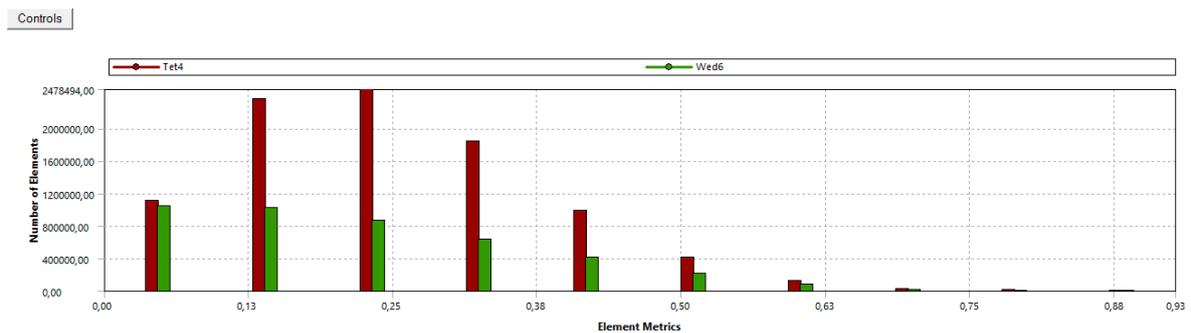
**RECTIFICADORES GUASCH, S.A.**  
Ciutat de Granada, 80  
08005 BARCELONA  
SPAIN

Se reserva el derecho de cambiar los límites, las condiciones de prueba y dimensiones indicadas en esta hoja sin previo aviso.  
Reserves the right to change limits, test conditions and dimensions given in this data sheet at any time without previous notice.

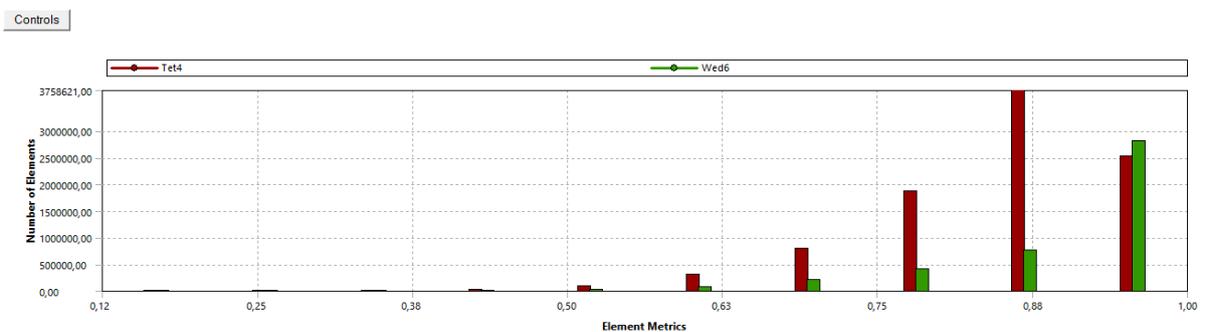
Tel.: +34 93 309 88 91  
Fax.: +34 93 300 18 41  
e-mail: info@e-guasch.com  
www.e-guasch.com

## ANEXO IV: GRÁFICAS SOBRE LA CALIDAD DEL MALLADO (ASIMETRÍA Y CALIDAD ORTOGONAL)

Histogramas sobre la distribución de los elementos de la malla según el parámetro de asimetría.



Histogramas sobre la distribución de los elementos de la malla según el parámetro de calidad ortogonal.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ó. López, «LaGuía,» 7 abril 2010. [En línea]. Available: <https://quimica.laguia2000.com/general/celdas-electroquimicas>. [Último acceso: abril 2021].
- [2] C. P. Ordoñez, «Estudio de baterías de para vehículos eléctricos,» Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [3] MIT Electric Vehicle Team, «A Guide to Understanding Battery Specifications,» December 2008. [En línea]. Available: [http://web.mit.edu/evt/summary\\_battery\\_specifications.pdf](http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf). [Último acceso: Abril 2021].
- [4] VARTA, La evolución de las baterías, 2012.
- [5] TodoSai, «Baterías-Tipos y usos,» 24 noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://todosai.com/blog/baterias-tipos-y-usos-b50.html>. [Último acceso: 2021 abril].
- [6] J. L. Iturbe, Depósito y caracterización de películas delgadas de materiales con aplicación en cátodos para microbaterías recargables de litio., 2007.
- [7] Richtek, «Li-ion Battery and Gauge Introduction,» [En línea]. Available: <https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN024#>. [Último acceso: abril 2021].
- [8] Wikipedia, «Tabla de calores específicos y sustancias,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Calor\\_espec%C3%ADfico](https://es.wikipedia.org/wiki/Calor_espec%C3%ADfico). [Último acceso: 2021 marzo].
- [9] DOBER, «Cooling Electric Vehicles,» [En línea]. Available: <https://www.dober.com/electric-vehicle-cooling-systems>. [Último acceso: abril 2021].
- [10] Universidad Politécnica de Valencia, «Convección,» [En línea]. Available: [http://personales.upv.es/vsoto/index\\_archivos/FTP/TC/Conveccion.pdf](http://personales.upv.es/vsoto/index_archivos/FTP/TC/Conveccion.pdf). [Último acceso: 2021 mayo].
- [11] «Ecuaciones de Navier-Stoker. Fenómenos Turbulentos,» [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4036/fichero/Cap%C3%ADtulo+3%252FCapitulo+3.pdf>. [Último acceso: 2021 abril].
- [12] L. F. D. Vinuesa, Análisis y desarrollo de la simulación termo-hidráulica de flujo multifase en CFG con ANSYS Fluent, Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [13] A. M. Domingo, Apuntes de Mecánica de Fluidos, 1997.

- [14] A. G. Muñoz, «Mecánica de Fluidos II,» [En línea]. Available: [http://www.dicis.ugto.mx/profesores/agallegos/documentos/Cap.%209\\_Flujo%20viscoso%20externo.pdf](http://www.dicis.ugto.mx/profesores/agallegos/documentos/Cap.%209_Flujo%20viscoso%20externo.pdf). [Último acceso: 2021 abril].
- [15] «Dinámica de Fluidos computacional (CFD),» [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+3.pdf>. [Último acceso: 2021 mayo].
- [16] Y. Lai, S. Du, L. Ai, L. Ai, Y. Cheng, Y. Tang y M. Jia, «Insight into heat generation of lithium ion batteries based on the electrochemical-thermal model at high discharge rates,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, 2015 mayo 2015.
- [17] ANSYS, ANSYS Fluent Battery Module Manual, 2013.
- [18] ANSYS, ANSYS Fluent Theory Guide, 2013.
- [19] ANSYS, ANSYS Fluent Meshing User's Guide, 2010.
- [20] ANSYS, ANSYS Fluent User's Guide, 2013.