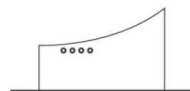




Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea



Nautika eta Itsasontzi-Makineria  
Goi Eskola Teknikoa

Escuela Técnica Superior  
de Náutica y Máquinas Navales

# Euskal Herriko Unibertsitatea / Universidad del País Vasco

## ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁ- QUINAS NAVALES

GRADO EN MARINA

### TÍTULO: DISEÑO DE INTERCAMBIADOR ACUMU- LADOR DE ENERGÍA TÉRMICA BASADO EN ME- TALES FUNDIDOS

Curso 2015-2016

Trabajo Fin de Grado TFG

*Presentado por:*

IÑAKI LANDA MARTINEZ

*El lunes 05 de septiembre de 2016 en Portugalete*

**Director:**

IÑAKI LOROÑO LUCENA

.....CIENCIAS Y TÉCNICAS DE LA NAVEGACIÓN, MÁQUINAS Y CONSTRUC-  
CIONES NAVALES.

**Codirector:**

JAVIER RODRÍGUEZ ASEGUINOLAZA

.....DPTO. FÍSICA APLICADA I.

Copyright

Versión 1.0

## RESUMEN

Este trabajo, propone un diseño innovador de un dispositivo almacenador-intercambiador de calor que opere con un metal y que sea capaz de suministrar suficiente potencia térmica como para mantener en marcha una turbina de 50Mw durante un periodo de 900 segundos con un salto térmico de 200 grados en el fluido de transferencia de calor o HTF.

Palabras clave: *Almacenador de Energía Térmica (TES), Material Cambio de Fase (PCM), Sales Fundidas.*

# TABLA DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	<b>III</b>
<b>TABLA DE CONTENIDOS</b> .....	<b>IV</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>X</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Tipos de centrales solares</b> .....	<b>3</b>
1.1.1 Centrales solares fotovoltaicas .....	3
1.1.2 Centrales solares de energía concentrada (CSP) .....	5
<b>1.2 Principales problemas de las centrales solares</b> .....	<b>9</b>
1.2.1 Factores que limitan la obtención de energía solar. ....	10
1.2.2 Factores limitantes tecnológicos.....	11
<b>1.3 Principales ventajas para la implementación de centrales solares</b> .....	<b>12</b>
1.3.1 Potencial de este tipo de energía. ....	13
<b>1.4 Tecnologías de almacenamiento de energía térmica</b> .....	<b>14</b>
1.4.1 El acumulador de vapor .....	15
1.4.2 Almacenamiento con sales fundidas. ....	15
1.4.3 Sistemas de almacenamiento con materiales cambio de fase.....	18
1.4.3.1 Materiales cambio de fase de baja temperatura.....	19
1.4.3.2 Materiales cambio de fase de alta temperatura.....	21
1.4.3.3 Estado actual de la investigación de PCM.....	23
<b>1.5 Estudios realizados sobre modelos que utilizan pcm.</b> .....	<b>24</b>
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>29</b>
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>31</b>

<b>3.1</b>	<b>Bases de la herramienta de CFD .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Metodología de la CFD.....</b>	<b>32</b>
3.2.1	Métodos de discretización. ....	33
3.2.2	Modelos de turbulencia.....	34
3.2.3	Flujo de doble fase.....	35
3.2.4	Algoritmos de solución.....	36
<b>4.</b>	<b>EL MODELO TEÓRICO.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelo de solidificación/fusión.....</b>	<b>40</b>
4.1.1	Ecuación de la energía. ....	40
4.1.2	Ecuación del momento. ....	42
4.1.3	Ecuación de turbulencia.....	44
4.1.4	Ecuación de especies. ....	44
4.1.5	Ecuación ``Back Diffusion``. ....	48
4.1.6	Velocidades de empuje en el material.....	49
4.1.7	Resistencia al contacto en las paredes. ....	50
4.1.8	Fenómenos de flotación o ``Buoyancy effects``. ....	52
<b>5.</b>	<b>VALIDACIÓN MODELO FUSIÓN/SOLIDIFICACIÓN FLUENT.....</b>	<b>55</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelo en 2D .....</b>	<b>56</b>
5.1.1	Puntos de referencia en el modelo en 2D. ....	58
5.1.2	Gráficas de temperatura respecto a tiempo en el modelo en 2D.....	60
5.1.3	Contornos del frente de fusión en el modelo en 2D. ....	63
5.1.4	Análisis de los datos obtenidos en el modelo en 2D. ....	66
<b>5.2</b>	<b>Modelo en 3D .....</b>	<b>67</b>
5.2.1	Puntos de referencia en el modelo en 3D. ....	68
5.2.2	Gráficas de temperatura respecto a tiempo en el modelo en 3D.....	70
5.2.3	Contornos del frente de fusión en el modelo en 3D. ....	73
5.2.4	Análisis de los datos obtenidos en el modelo en 3D. ....	77
<b>6.</b>	<b>DISEÑO DEL ACUMULADOR-INTERCAMBIADOR .....</b>	<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Descripción del modelo.....</b>	<b>79</b>
<b>6.2</b>	<b>Metodología de diseño .....</b>	<b>82</b>
<b>6.3</b>	<b>Modelado del dispositivo .....</b>	<b>88</b>

<b>6.4</b>	<b>Configuración del caso.....</b>	<b>92</b>
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>97</b>
<b>7.1</b>	<b>Gráficas obtenidas .....</b>	<b>97</b>
7.1.1	Temperatura de entrada y salida del tubo número 6.....	97
7.1.2	Presión de entrada y salida del tubo número 6. ....	100
<b>7.2</b>	<b>Contornos de temperatura .....</b>	<b>101</b>
7.2.1	Contornos sentido longitudinal inferior. ....	101
7.2.2	Contornos sentido longitudinal medio.....	105
7.2.3	Contornos sentido radial inferior. ....	107
<b>7.3</b>	<b>Contornos de fusión .....</b>	<b>110</b>
7.3.1	Contornos sentido longitudinal.....	111
7.3.2	Contornos sentido longitudinal medio.....	113
7.3.3	Contornos sentido radial inferior. ....	116
<b>8.</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>119</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>123</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Módulo de energía solar fotovoltaica de doble placa (Wikipedia). .....	5
Figura 1.2: Cilindro parabólico (Themorningstar G2). .....	6
Figura 1.3: Reflector lineal de Fresnel (Energy.gov). .....	7
Figura 1.4: Plato solar Stirling. ....	8
Figura 1.5: Esquema funcionamiento torre energía solar (Microsiervos). ....	9
Figura 1.6: Distribución de obtención de la energía actual. (Datos de Renewable Energy Magazine). .....	14
Figura 1.7: Planta de energía solar de Torresol (Torresolenergy). .....	17
<i>Figura 1.8: Esquema de funcionamiento de la central con sales fundidas (elcomercio.es)</i> . .....	18
Figura 3.1: Simulación VOF (54). .....	35
Figura 3.2: Esquema ciclos Multigrad (55). .....	36
Figura 4.1: Logo de programa (ANSYS Fluent). .....	39
Figura 4.2: En la transición de color se aprecia la zona pastosa o mushy region (ANSYS Fluent). .....	44
Figura 4.3: Empuje en el material. Imagen propiedad de ANSYS Fluent. ....	50
Figura 4.4: Circuito de resistencia al contacto (ANSYS Fluent). .....	52
Figura 5.1: Portada Gambit. ....	56
Figura 5.2: Modelo en 2D creado utilizando el Design Modeler. ....	58
Figura 5.3: ubicación de los puntos situados en el modelo en 2D. ....	59
Figura 5.4: Resultado datos obtenidos en el punto T10 .....	60
Figura 5.5: Resultado datos obtenidos en el punto T11. ....	60
Figura 5.6: Resultado datos obtenidos en el punto T12. ....	61
Figura 5.7: Resultado datos obtenidos en el punto T13. ....	61
Figura 5.8: Resultado datos obtenidos en el punto T14 .....	62
Figura 5.9: Creación inicial del frente de fusión. ....	63
Figura 5.10: propagación del frente de fusión .....	64
Figura 5.11: Frente de fusión pasadas 3 horas. ....	64

<i>Figura 5.12:Transmisión de calor inicial en el modelo.....</i>	65
Figura 5.13:Propagación de la transferencia de calor en el modelo.....	65
Figura 5.14:Propagación de calor pasadas 3 horas. ....	66
Figura 5.15:Modelo creado con el uso del Design Modeler. ....	68
Figura 5.16: Ubicación de los puntos T10, T11, T12, T13 y T14. ....	69
Figura 5.17: Resultados obtenidos en el T10.....	70
Figura 5.18: Resultados obtenidos en el T11.....	71
Figura 5.19: Resultados obtenidos en el T12.....	71
Figura 5.20: Resultados obtenidos en el T13.....	72
Figura 5.21: Resultados obtenidos en el T14.....	72
Figura 5.22: Frente de fusión inicial. ....	73
Figura 5.23: Frente de fusión a los 15 minutos. ....	74
Figura 5.24: Frente de fusión después de 2 horas.....	74
Figura 5.25: Frente de fusión después de 4 horas.....	75
Figura 5.26: transferencia de calor inicial en el modelo. ....	75
Figura 5.27: transferencia de calor a los 20 minutos.....	76
Figura 5.28: transferencia de calor al de 2 horas de simulación.....	76
Figura 6.1: Modelo de simulación de frente. ....	90
Figura 6.2: Modelo de simulación vista de perfil.....	90
Figura 6.3: Modelo de simulación en 3D.....	91
Figura 6.4: Launcher o inicio del programa.....	92
Figura 7.1: Temperatura de entrada.....	98
Figura 7.2: Temperatura de salida de la sal a la salida del dispositivo.....	99
Figura 7.3: Presión de entrada.....	100
Figura 7.4: Presión de salida.....	100
Figura 7.5: Contornos de temperatura sentido longitudinal inferior 20s. ....	101
Figura 7.6: Contornos de temperatura sentido longitudinal pasados 780s.....	102
Figura 7.7: Contornos de temperatura sentido longitudinal pasados 1330 segundos.....	102
Figura 7.8: Contornos de temperatura sentido longitudinal final de la descarga.	103
Figura 7.9: Contornos de temperatura sentido longitudinal medio todo líquido..	105
Figura 7.10: Contornos de temperatura sentido longitudinal medio a los 720s..	105
Figura 7.11: Contornos de temperatura sentido longitudinal medio a los 1250 s. .....	106



Figura 7.12: Contornos de temperatura sentido longitudinal medio final de la descarga. ....	106
Figura 7.13: Contornos de temperatura sentido radial inferior al inicio. ....	107
Figura 7.14: Contornos de temperatura sentido radial inferior a los 140 s. ....	107
Figura 7.15: Contornos de temperatura sentido radial inferior a los 300s. ....	108
Figura 7.16: Contornos de temperatura sentido radial inferior a los 370 s. ....	108
Figura 7.17: Contornos de temperatura sentido radial inferior al final. ....	109
Figura 7.18: Contorno de fusión en sentido longitudinal inferior todo líquido. ....	111
Figura 7.19: Contorno de fusión sentido longitudinal inferior pasados 340 s. ....	111
Figura 7.20: Contorno de fusión sentido longitudinal inferior a los 1010s. ....	112
Figura 7.21: Contorno de fusión sentido longitudinal inferior a los 1270 s. ....	112
Figura 7.22: Contorno de fusión sentido longitudinal medio al inicio. ....	113
Figura 7.23: Contorno de fusión sentido longitudinal medio a los 480s. ....	113
Figura 7.24: Contorno de fusión sentido longitudinal medio a los 910 s. ....	114
Figura 7.25: Contorno de fusión sentido longitudinal medio a los 1210s. ....	114
Figura 7.26: Contorno de fusión sentido longitudinal medio al final, todo sólido. ....	115
Figura 7.27: Contornos de fusión sentido radial al comienzo. ....	116
Figura 7.28: Contornos de fusión sentido radial a los 40s. ....	116
Figura 7.29: Contornos de fusión sentido radial a los 200 s. ....	117
Figura 7.30: Contornos de fusión sentido radial al final. ....	117

## LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1: propiedades del Dodecanoid Acid.....	57
Tabla 6.1: propiedades del HTF Nitrato de sal a 427°C. ....	80
Tabla 6.2: propiedades del PCM Al-Si12. ....	81
Tabla 6.3: parámetros de diseño del acumulador. ....	89
Tabla 6.4: Parámetros correspondientes a los materiales. ....	93

## 1.INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente demanda de energía eléctrica que se tiene hoy en día, y teniendo en cuenta el riesgo que supone la utilización de fuentes no renovables de energía para la producción de electricidad, son muchas las investigaciones que se encuentran abiertas en el ámbito de las energías renovables. Los frutos de estas investigaciones, pueden ser perfectamente aplicables al ámbito marino una vez analizadas en tierra.

Existen distintos tipos de recursos que nos proporciona la naturaleza, por esta razón, podemos enumerar que las fuentes de energía más apreciadas son las de la siguiente lista:

- Energía Hidráulica.
- Energía Geotérmica.
- Energía Eólica.
- Energía Solar.

En este proyecto, se valorarán las ventajas y desventajas de la utilización de la energía solar en centrales que utilicen sales fundidas. Una vez explicados los distintos métodos de obtención de energía solar y los problemas que pueden acarrear los sistemas, se propondrá un dispositivo innovador.

Este dispositivo, será capaz de suplementar el salto térmico que se pueda sufrir en una central que funciona con un intercambiador de calor de sales fundidas a causa de una nube o cualquier otro obstáculo que pueda acarrear una pérdida térmica de unos 200°C durante un rango de tiempo de aproximadamente 900 segundos.

Este diseño, será innovador por los motivos que se enumeran a continuación:

- Se utilizará un metal eutéctico como material cambio de fase o PCM. Este podrá suplementar la pérdida térmica descrita anteriormente. La utilización de un metal constituye la principal ventaja de que la conductividad térmica, es mucho mayor que en cualquier otro material suponiendo una ventaja clara a la hora de diseñar el intercambiador. Esto reduce notablemente el número de tubos necesarios para la transferencia de calor y se puede aumentar la distancia entre las paredes.
- Se crea un almacenador de energía térmica y al mismo tiempo un intercambiador de calor muy eficiente y de coste reducido. El cual, podrá aumentar el rendimiento de las centrales solares que utilicen sales fundidas como fluido de transferencia de calor o HTF.

Ya que el dispositivo está pensado en principio para su uso en centrales solares que utilicen sales fundidas, se explican brevemente los distintos métodos de explotación de la energía solar, varios sistemas innovadores que se han ido sumando a la producción de energía eléctrica y las ventajas y desventajas de estos sistemas.

Finalmente, se propondrá un modelo innovador mediante cálculos validados con software de dinámica de fluidos computacional o CFD una vez demostrada mediante la primera validación, que es correcto el modelo de fusión solidificación que integra esta innovadora herramienta.

## **1.1 TIPOS DE CENTRALES SOLARES**

La energía solar es la conversión de luz solar en electricidad, ya sea directamente a través de la energía fotovoltaica (PV), o indirectamente mediante la energía solar concentrada (CSP).

Los sistemas de energía solar concentrada utilizan lentes o espejos y sistemas de rastreo para enfocar un área grande de la luz solar en un pequeño haz.

La energía fotovoltaica convierte la luz en corriente eléctrica mediante el efecto fotovoltaico [1].

La Agencia Internacional de la Energía predijo en el año 2014 que, para el año 2050, la energía solar fotovoltaica y la energía solar concentrada aportarían alrededor del 16 y el 11 por ciento, respectivamente, del consumo de electricidad en todo el mundo, y la energía solar sería la fuente más grande de producción de electricidad. Por otro lado, la misma agencia ha establecido que la mayoría de las instalaciones solares estarán ubicados en países como China e India, ya que son sitios donde se está haciendo una inversión sustancial para el desarrollo de distintas técnicas de aprovechamiento de energía solar [2].

### **1.1.1 Centrales solares fotovoltaicas**

Una central de energía fotovoltaica, también conocido como un parque solar, es una instalación fotovoltaica a gran escala diseñado para el suministro de energía eléctrica para la red comercial.

Se diferencian de la mayoría de las demás aplicaciones de energía solar debido a que suministran energía para la utilización en servicios públicos, en lugar de a un particular o usuario privado.

La fuente de la energía solar es a través de los módulos fotovoltaicos que convierten la luz directamente en electricidad. Sin embargo, esto no debe confundirse con la energía solar concentrada, la otra tecnología de generación solar a gran escala, que utiliza calor para conducir una gran variedad de sistemas generadores convencionales.

Ambos enfoques tienen sus propias ventajas y desventajas, pero hasta la fecha, por una serie de razones, la tecnología fotovoltaica ha tenido un uso mucho más amplio en el campo. A partir de 2013, los sistemas fotovoltaicos superan en número a los concentradores de alrededor de un 40 a 1.

Entre sus ventajas, destaca, no poseer partes móviles o propensas a romperse. Por esto, resulta ideal para los lugares poco accesibles o en los que no existe personal constantemente.

Por otro lado, cabe destacar, que los sistemas basados en paneles fotovoltaicos pueden crecer de forma modular con modificaciones muy sencillas a la estación existente previamente. De este modo pueden pasar de un solo panel a varios cientos para instalaciones a gran escala.

Aun así, existen unos inconvenientes relacionados con los sistemas fotovoltaicos, a continuación, se comentan algunos de esos inconvenientes.

Por un lado, es sabido que el silicio (material utilizado para su construcción) es barato, pero el proceso de creación de las obleas finales es muy complejo y caro.

Por otra parte, el rendimiento obtenido de la luz solar no es muy elevado si se le compara con el terreno que ocupa, aproximadamente un 13% de la energía solar recibida es aprovechable.

Si se mira a la capacidad que tienen este tipo de centrales, se puede ver que, en algunos países, la capacidad nominal de las centrales fotovoltaicas se define en megavatios pico (MW), que se refiere a la potencia de salida de Corriente continua del panel solar. Sin embargo, Canadá, Japón, España y algunas partes de los Estados Unidos suelen especificar utilizando la menor potencia de salida nominal convertido en MWAC; una medida directamente comparable a otras formas de generación de energía. Una tercera y menos común calificación es la mega voltios-amperios (MVA).

Atendiendo a la potencia, hoy en día hay centrales que tienen una capacidad de cerca de 600 megavatios y hay proyectos de centrales que piensan producir hasta 1 gigavatio. A finales de 2015, cerca de 3.400 proyectos eran parques solares de más de 4 MW con una capacidad combinada de 60 GWAC [3].



Figura 1.1: Módulo de energía solar fotovoltaica de doble placa (Wikipedia).

### **1.1.2 Centrales solares de energía concentrada (CSP)**

La energía solar concentrada (CSP), también llamada "concentrado de energía solar térmica", utiliza lentes o espejos y sistemas de rastreo para enfocar la luz solar en un pequeño haz. Al contrario de la energía fotovoltaica, el cual convierte la luz en electricidad, el CSP utiliza el calor de la radiación solar para generar electricidad a partir de turbinas a vapor convencionales.

Existe una amplia gama de tecnologías de concentración. Entre los más conocidos están los colectores cilindro-parabólicos, el reflector compacto Fresnel lineal, el disco Stirling y la torre de la energía solar.

Aunque todos los diseños son distintos, no obstante, en todos estos sistemas se calienta un fluido de trabajo (HTF) mediante la energía solar concentrada y, a continuación, este fluido que se ha calentado, se utiliza para la generación de energía [4]. Los concentradores solares más comunes son los siguientes:

- El cilindro parabólico. Consiste en un reflector parabólico lineal que concentra la luz en un receptor colocado a lo largo de la línea focal del reflector. El receptor es un tubo situado justo encima de la mitad del espejo parabólico y se llena con un fluido de trabajo. El reflector está hecho para seguir el sol durante el día mediante el seguimiento a lo largo de un solo eje. Los sistemas de colectores cilindro-parabólicos proporcionan el mejor factor de uso del suelo de cualquier tecnología solar. [5] Las plantas SEGS de California y de Acciona Nevada son representantes de esta tecnología [6] [7].



Figura 1.2: Cilindro parabólico (Themorningstar G2).



- Los reflectores lineales de Fresnel. Son las que utilizan muchas tiras delgadas tipo espejo en lugar de espejos parabólicos para concentrar la luz solar en dos tubos con el fluido de trabajo. Esto tiene la ventaja de que se pueden usar espejos planos en vez de espejos parabólicos, siendo estos últimos mucho más caros. También se pueden colocar más reflectores en el mismo espacio, lo que permite más luz solar disponible. Estos Reflectores de concentración se puede utilizar en plantas de grandes dimensiones o bien en plantas más compactas [8] [9].

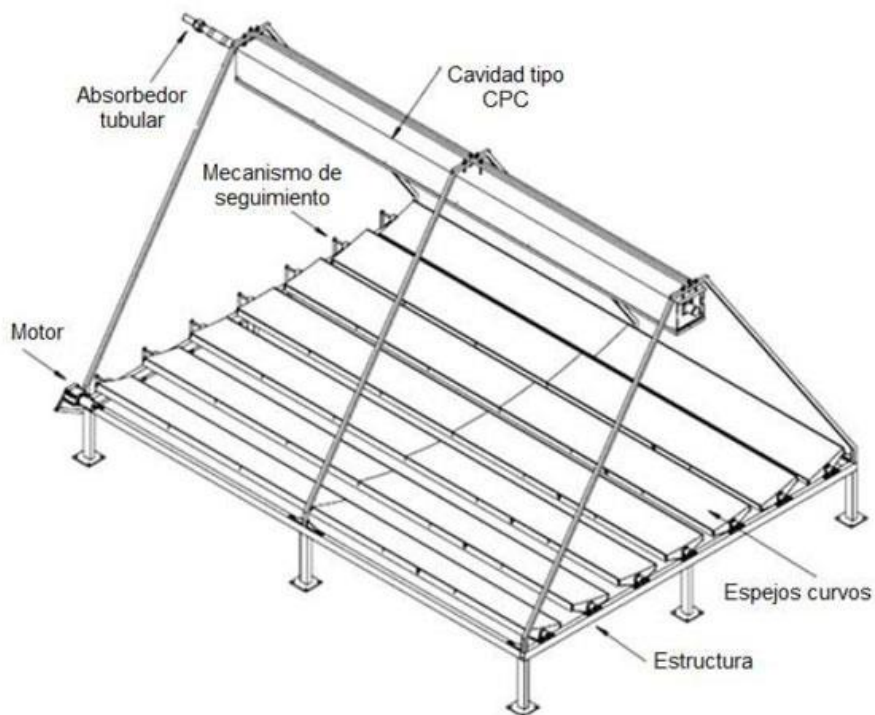


Figura 1.3: Reflector lineal de Fresnel (Energy.gov).

- El plato solar Stirling. Combina un plato parabólico para concentrarse con un motor Stirling que normalmente impulsa un generador eléctrico. Entre sus principales ventajas, se encuentran una mayor eficiencia de conversión de luz solar en electricidad y una vida útil más larga ya que los sistemas de disco parabólico dan la más alta eficiencia de las tecnologías CSP [10]. Como ejemplo, se puede tomar El Plato Grande en Canberra, Australia [11].

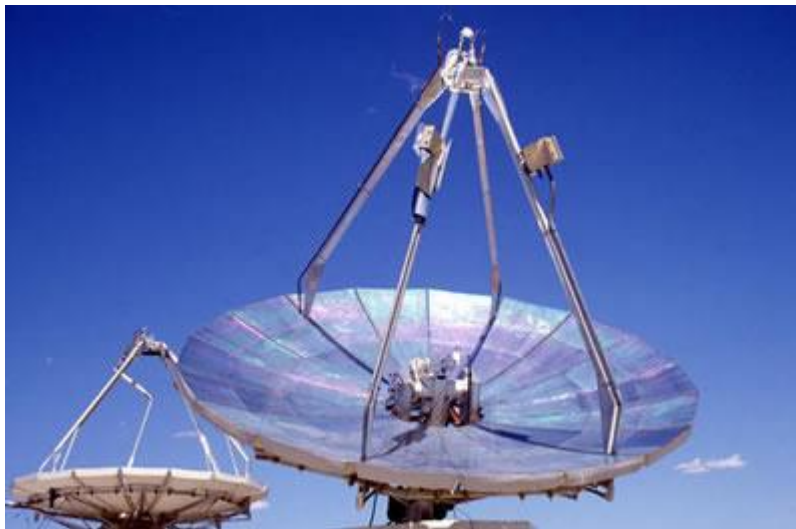


Figura 1.4: Plato solar Stirling (Canberra Gov).

- La torre de energía solar. Utiliza una matriz de reflectores de seguimiento (helióstatos) para concentrar la luz en un receptor central en lo alto de una torre. Las torres de energía, son más rentables, ofrecen una mayor eficiencia y una mejor capacidad de almacenamiento de energía entre las tecnologías CSP. La planta de energía solar PS10 y PS20 son ejemplos de esta tecnología [12].

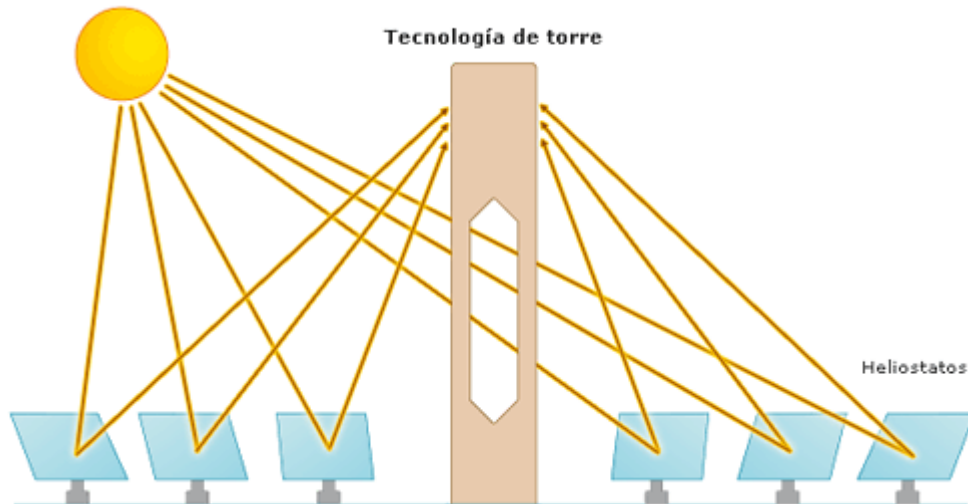


Figura 1.5: Esquema funcionamiento torre energía solar (Microsiervos).

## 1.2 PRINCIPALES PROBLEMAS DE LAS CENTRALES SOLARES

Mientras que las considerables ventajas que ofrece la energía solar se hacen notar, algunos defensores ignoran algunos de los defectos que tiene esta tecnología, estas imperfecciones se deben reconocer, para que no se estancuen las investigaciones.

Por ello, se tienen que analizar ordenada y realistamente las desventajas del sistema y tratar de encontrar soluciones. En la actualidad, los sistemas de energía solar son una verdadera alternativa respetuosa para el medio ambiente y un sistema muy eficaz para paliar el alto consumo de energía que se tiene, ya sea en procesos a nivel industrial o bien domésticos.

A continuación, se exponen los principales problemas que tiene este tipo de utilización de energía.

### 1.2.1 Factores que limitan la obtención de energía solar.

- La latitud. Aunque la energía solar se puede obtener en casi cualquier lugar del planeta en más o menos proporción, la eficacia cae bruscamente cuando aumenta la distancia al ecuador. Por eso, los residentes de lugares como Vancouver, Canadá, y en San Petersburgo, por ejemplo, están en desventaja solar significativa.
- Las nubes. las nubes disminuyen la potencia de los paneles solares, especialmente en regiones habitualmente nublados o cubiertos. Según el Laboratorio Nacional de Energía Renovable, " El recurso solar en condiciones de niebla o baja en la nube es de aproximadamente el 10 % del valor en condiciones de cielo despejado". Sin embargo, los paneles solares situados en Denver, Colorado, por ejemplo, rara vez se ven oscurecidos por las nubes, ya que la ciudad permanece nublada una media de entre 30 y 40 días al año. Tomando otro ejemplo, Hawái, a pesar de su proximidad al ecuador, recibe lluvia con un promedio de 277 días al año. Por otro lado, existen los denominados transitorios, los cuales, son producidos por nubes pasajeras que pueden reducir el rendimiento del sistema, ya sea en centrales de energía fotovoltaica como en centrales que utilizan torres.
- La noche. Por último, la misma Tierra es un gran obstáculo para la obtención de la energía solar, ya que actúa todas las noches para perturbar el flujo de fotones a los paneles solares.

### 1.2.2 Factores limitantes tecnológicos.

- El tamaño. Para alimentar un edificio entero, se requiere una gran serie de paneles solares. Este es un hecho desafortunado proveniente de que la tecnología fotovoltaica se encuentra todavía en sus comienzos, por eso, por ahora, se tienen que construir grandes conjuntos para compensar las ineficiencias de los paneles individuales. Lo mismo ocurre con el sistema de concentración de energía solar, ya que se requiere de un espacio amplio para su construcción.
- Deterioro de los paneles y reflectores. Como todo lo que sufre las inclemencias del tiempo por estar en el exterior, los paneles solares poco a poco se dañan por la radiación ultravioleta, la lluvia, la nieve, la suciedad, las fluctuaciones de temperatura, el granizo y el viento también plantean riesgos graves para el deterioro de estos paneles.
- El coste económico. El coste para la construcción de un parque que aproveche la energía solar no es precisamente bajo, aunque comparada con el coste que supone la construcción de una central de cualquier otro tipo es perfectamente asumible. El coste económico principal que supone la implantación de este tipo de tecnología se encuentra perfectamente compensado después por el pequeño mantenimiento que suponen este tipo de centrales. Es indiscutible por otro lado el alto rendimiento que ofrecen en comparación con otro tipo de sistemas que se están sometiendo hoy en día a investigación.

- Baja conductividad térmica. En el caso de las centrales de concentración solar o CSP, los materiales que se utilizan para el almacenamiento de la energía térmica proveniente del sol, tienen una muy baja conductividad térmica, por lo que, en los intercambiadores de calor, la distancia entre los tubos o el pitch, tiene que ser muy reducida para que haya una transferencia eficiente entre el material almacenador de energía y el fluido de trabajo en la turbina.
- Degradación de los materiales. Este factor también es un limitante tecnológico, ya que la utilización de sales por ejemplo en las centrales tipo CSP, supone que estas sales se pueden utilizar por un número limitado de ciclos. Una vez sobrepasados el número de ciclos, se debe proceder a cambiar estas sales por unas nuevas
- Productos contaminantes en los sistemas. Algunas de las sustancias incluidas en los paneles y equipos asociados sobre todo con las centrales de energía fotovoltaica incluyen sustancias tales como el plomo y el cadmio que como bien se sabe son igualmente contaminantes para el medio ambiente como para el cuerpo humano.

### **1.3 PRINCIPALES VENTAJAS PARA LA IMPLEMENTACION DE CENTRALES SOLARES.**

La energía solar es un recurso que no sólo es sostenible para el consumo de energía, sino que es renovable indefinidamente (al menos hasta que el sol se agote dentro de miles de millones de años).

Otra utilidad de la energía solar, es que se puede utilizar para generar electricidad o para calentar el agua (calentadores de agua solares).

Cabe resaltar a su vez, que los parques solares también requieren poco mantenimiento. Después de la instalación y optimización, son muy fiables, por su alta eficiencia y porque no requieren de ningún tipo de piezas mecánicas que pueden fallar.

### **1.3.1 Potencial de este tipo de energía.**

Si se observan los datos, se ve que la Tierra recibe 174.000 Teravatios (TW) de la radiación solar entrante (insolación) en la atmósfera superior [13].

Aproximadamente, el 30% es reflejada de vuelta al espacio, mientras que el resto es absorbido por las nubes, océanos y masas de tierra. El espectro de la luz solar en la superficie de la Tierra, se extiende sobre todo a través de las gamas visibles y del infrarrojo cercano con una pequeña parte en el ultravioleta cercano [14]. Por otro lado, es destacable que la mayor parte de la población mundial vive en zonas con niveles de insolación de 150-300 vatios / m<sup>2</sup>, o 3,5 a 7,0kWh / m<sup>2</sup> por día.

Resumiendo, la energía solar total absorbida por la atmósfera, los océanos de la Tierra y la masa de la Tierra es de aproximadamente 3.850.000 EJ por año [15]. En 2002, por ejemplo, se percibió más energía en una hora de la que se utiliza en el mundo entero durante un año [16] [17].

La cantidad de energía solar que llega a la superficie del planeta, es tan grande que en un año se podría obtener el doble de la energía que se obtiene de los recursos no renovables tales como el carbón, petróleo, gas natural y uranio [18].

A continuación, se expone la procedencia de la energía consumida en España el mes de abril y su comparación con el intervalo correspondiente del mes de enero a abril.

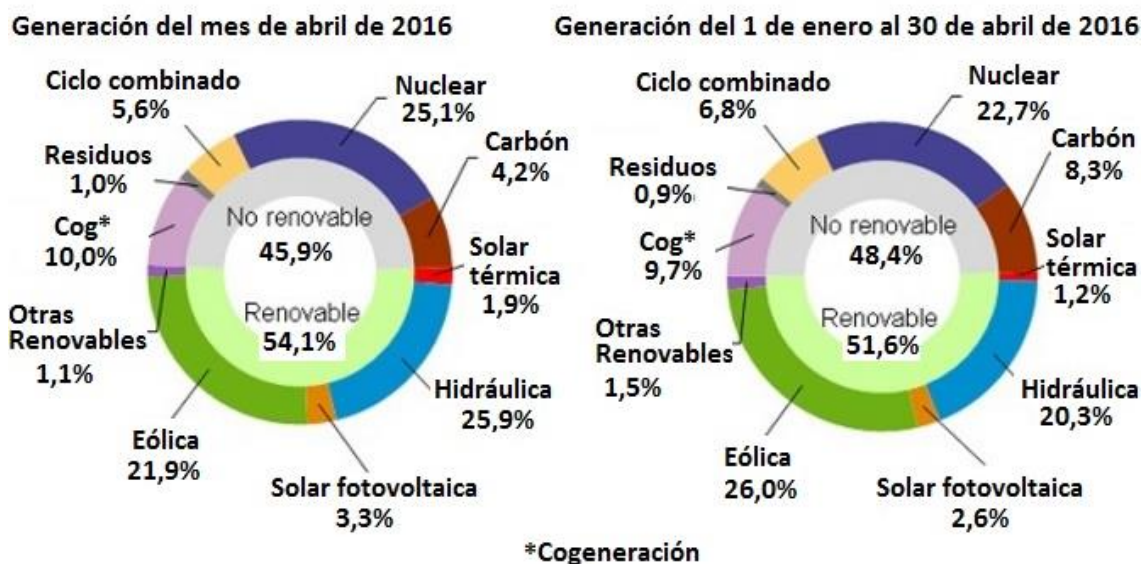


Figura 1.6: Distribución de obtención de la energía actual. (Datos de Renewable Energy Magazine).

#### 1.4 TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA

El almacenamiento de energía térmica, permite que una planta de energía solar térmica pueda producir electricidad por la noche y en días nublados.

Esto permite el uso de la energía solar para la generación de carga base, así como para la generación de la potencia máxima, teniendo así el potencial necesario para desplazar a las plantas eléctricas de gas, tanto de carbón o gas natural.

En este tipo de sistemas, el calor se transfiere a un medio de almacenamiento térmico en un depósito aislado durante el día, y se retira para la generación de energía por la noche.



Algunos medios de almacenamiento térmico incluyen vapor, hormigón y una variedad de materiales de cambio de fase, y las sales fundidas tales como calcio, sodio y nitrato de potasio presurizado [ 19] [ 20].

A continuación, se hace una descripción de los distintos sistemas de almacenamiento térmico que existen en la actualidad.

#### **1.4.1 El acumulador de vapor**

El acumulador de vapor o el PS10 de energía solar acumula el calor en tanques a modo de vapor a una presión a 50 bar y 285°C. Después el vapor se condensa y se pasa de nuevo a vapor, cuando se baja la presión.

Este tipo de almacenamiento, es factible aproximadamente para un periodo de una hora.

Hay que decir que este sistema todavía está en fase experimental y de hecho, todavía no se ha implementado en ningún tipo de central. Algunos expertos, sugieren que el almacenamiento mediante este tipo de sistema no es posible o mejor dicho que no es rentable, por eso no se ha demostrado todavía en una planta de energía [21].

#### **1.4.2 Almacenamiento con sales fundidas.**

Se han probado una variedad de fluidos para almacenar la energía térmica proveniente del sol, incluyendo el agua, aire, aceite, y sodio, pero instituciones como Rockwell International [22] seleccionan la sal fundida como la mejor opción para poder aprovechar esa energía térmica [23].

Comúnmente, hoy en día, la sal fundida se utiliza en sistemas de torres de energía solar, ya que se usa el fluido a presión atmosférica, proporcionando un medio de bajo costo para almacenar energía térmica.

Por otro lado, las temperaturas de operación son compatibles con las turbinas de vapor de hoy en día, y no es inflamable ni tóxico.

Por otro lado, dichas sales fundidas se utilizan a su vez en las industrias químicas y metalúrgicas para el transporte de calor, por lo que la industria tiene experiencia con estos materiales.

En sus comienzos, la primera mezcla de sal fundida comercial era una forma común de salitre, nitrato de sodio 60% y nitrato de potasio 40%. El salitre funde a 220°C y se mantiene líquido a 290°C en un tanque de almacenamiento aislado. El nitrato de calcio puede reducir el punto de fusión a 131°C, lo que permite extraer más energía antes de la solidificación de la sal.

Debido al avance que se ha dado en la actualidad hay varios grados de nitrato de calcio técnicos estables a más de 500°C.

Entre las ventajas de este sistema de almacenamiento de energía solar, se encuentra que puede generar energía en días nublados o por la noche usando el calor en el tanque de sales calientes. Los tanques, los cuales están aislados, son capaces de almacenar calor para una semana.

Para hacerse una idea del tamaño que suelen tener los recipientes de estas sales, se estima que los tanques necesarios para accionar por ejemplo una turbina de 100 megavatios durante cuatro horas serían de unos 9m de altura y 24m de diámetro.

La planta de energía ``Andasol`` en España, es la primera central térmica solar comercial mediante sales fundidas para el almacenamiento y la generación de energía durante la noche. Esta central, se puso en marcha en marzo de 2009 [24].

Por otro lado, El 4 de julio de 2011, otra empresa en España celebró un momento histórico para la industria solar. La planta termosolar de Torresol de 19,9 MW se convirtió en la primera en generar electricidad de forma ininterrumpida durante 24 horas seguidas, con un dispositivo de almacenamiento térmico de sales fundidas [25].



Figura 1.7: Planta de energía solar de Torresol (Torresolenergy).

Hoy en día esta central es un enclave muy importante para la producción de electricidad e incluso de investigación a escala mundial.

A continuación, se detalla un esquema simple del funcionamiento de una central de este tipo.

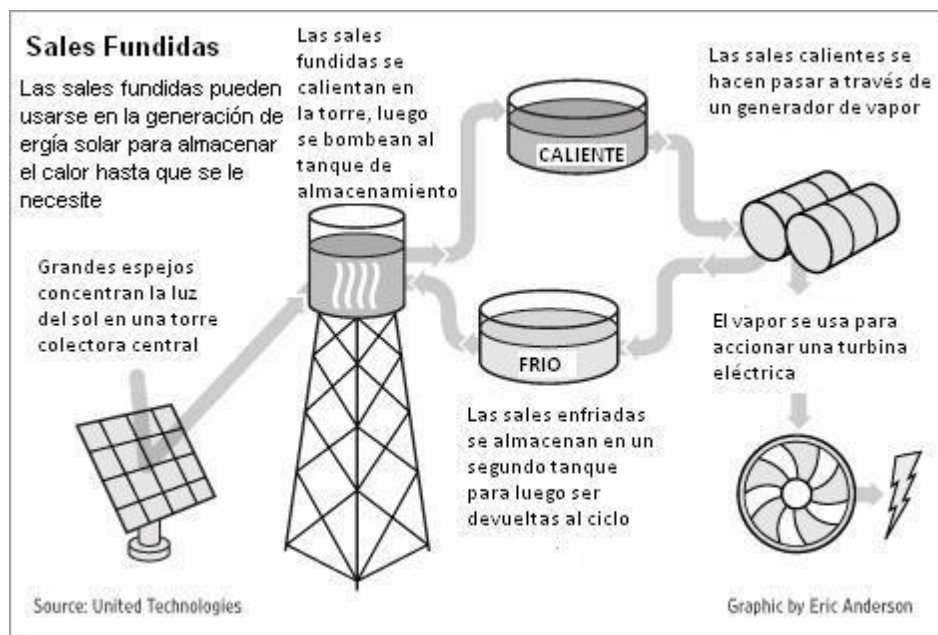


Figura 1.8: Esquema de funcionamiento de la central con sales fundidas (elcomercio.es).

### 1.4.3 Sistemas de almacenamiento con materiales cambio de fase

Los materiales de cambio de fase o también denominados (PCM) ofrecen una solución alternativa para el almacenamiento de energía térmica.

El uso es parecido al de una infraestructura de transferencia de calor similar al intercambiador de calor utilizado con las sales fundidas, pero los PCM tienen el potencial de proporcionar un medio más eficiente de almacenamiento de la energía proveniente del sol.

Estos PCM, pueden ser materiales orgánicos o inorgánicos. Entre las ventajas de los orgánicos se tiene que no son corrosivos, no tienen el problema del subenfriamiento y tienen una estabilidad química y térmica que no tienen otro tipo de

materiales. Entre las desventajas se encuentra la baja entalpía de cambio de fase, baja conductividad térmica, y la inflamabilidad.

Las características de los materiales inorgánicos son más ventajosas, ya que tienen una mayor entalpía de cambio de fase. Aun así, presentan inconvenientes tales como el subenfriamiento, la corrosión, la separación de fases, y la falta de estabilidad térmica.

A continuación, se extiende la información acerca de este sistema de almacenamiento de energía analizando anteriores investigaciones.

#### **1.4.3.1 Materiales cambio de fase de baja temperatura.**

Teniendo en cuenta que se elige el cambio de fase del material como medio para almacenar la energía, la primera restricción en el material para proceder a la selección es la temperatura de fusión.

La gama de temperaturas de fusión aceptable era determinada a través de un sistema de análisis preliminar de la capacidad de retención y de descarga de calor de los sistemas propuestos.

Dado que las investigaciones en los inicios, estudiaron las aplicaciones que se encuentran por debajo de generación de vapor, los datos que se encuentran de esa época se centran en intervalos de temperatura de aproximadamente de 50 a 90°C.

Ya que la segunda ley de la termodinámica, establece que la diferencia de temperatura es el determinante para dar el valor de la transferencia de calor, se fijó la temperatura de fusión del PCM con un valor por debajo de la temperatura de entrada del fluido de captura para eliminar la mayor cantidad de energía térmica,

pero también suficientemente por encima de la temperatura final deseada del fluido de recuperación para garantizar un tiempo de almacenamiento razonable en la batería térmica.

A su vez, se observó que cuanto más largo es el canal que debe atravesar el fluido, las pérdidas asociadas con la bajada de presión, bajadas de temperatura etc. se hacen mucho más notables y afectan al rendimiento del sistema.

El siguiente criterio conocido para poder determinar un material de cambio de fase, fue la estabilidad química de los materiales propuestos, es decir, se establece un número de ciclos predeterminado que está directamente relacionado con el número de ciclos que puede sufrir un material hasta que sus propiedades cambian y dejan de ser útiles para el almacenamiento de calor.

Sabiendo que el calor se almacena durante el proceso de captura durante la noche, se utiliza cada día en el proceso de recuperación y que el producto debe tener una vida útil de al menos 30 años sin tener que reemplazarlo, el número requerido de ciclos térmicos era de 10950. Esto es más de diez veces los 1000 ciclos de ensayo recomendados por Kenisarin y Mahkamov (2007) [26]. Por consiguiente, era difícil determinar si un material puede soportar esta cantidad de ciclos de datos disponibles en la actualidad.

Estudios de este tipo, dejaron claro que era necesario hacer un mayor estudio sobre estos tipos de materiales, por otro lado, se recomendó la investigación para la posible rehabilitación de estas substancias que podrían ser utilizadas en sectores tales como el transporte o la construcción. Hasta el momento se disponía de información limitada.

Por otro lado, se cambiaron los parámetros considerados en la elección de un material de cambio de fase, como se describe a continuación (Kenisarin y Mahkamov, 2007) [26], ya que fueron criterios en lugar de limitaciones y se encontró

un equilibrio entre ellos para lograr un sistema optimizado. Los criterios utilizados en el estudio fueron los siguientes:

- Alto calor de fusión, calor específico por unidad de volumen y la masa del PCM.
- Baja presión de vapor a temperatura de funcionamiento para evitar la evaporación.
- Compatibilidad con otros materiales en contacto.
- Peligrosidad, inflamabilidad y toxicidad.
- Pequeño grado de sub-enfriamiento y alta tasa de crecimiento de los cristales.
- Variación de volumen bajo en la solidificación.
- Alta conductividad.
- Bajo coste y abundancia.

Son dos de esta lista las propiedades más importantes que se pueden utilizar para evaluar los materiales de cambio de fase, el calor latente de fusión y el costo.

#### **1.4.3.2 Materiales cambio de fase de alta temperatura.**

Los PCM de alta temperatura, ofrecen la posibilidad de una alta densidad y alta temperatura de almacenamiento de energía térmica [27]. Por otro lado, también tienen alta difusividad térmica, lo que elimina la necesidad de tener que aportar una cantidad de calor grande en las superficies de intercambio. Estos factores pueden conducir a reducciones significativas, tales como, el coste normalizado de la electricidad.

Como se ha señalado por Kenisarin [28] en su artículo de revisión sobre pasadas investigaciones y los materiales propuestos, las dos propiedades más importantes de un PCM son la temperatura de fusión y el calor de fusión del material de que se trate.

Mediante el trazado de la temperatura de fusión y el calor de fusión de cada material en un gráfico, es posible seleccionar un PCM con las características más favorables para el diseño.

Se puede señalar, por ejemplo, la utilización del AlSi12 (o cualquier otra aleación) como PCM.

Para su utilización, se necesita un fluido intercambiador de calor o HTF (Heat Transfer Fluid) adecuado para la transferencia primaria del ciclo de generación de energía.

El HTF debe tener las siguientes propiedades:

- Capacidad de calor específico razonable.
- Baja presión de vapor.

Normalmente, todos los HTF metálicos tienen buenas propiedades, pero el NaK fue identificado como uno de los mejores candidatos para su uso en las centrales tipo CSP.

Esta sustancia tiene las siguientes propiedades [29]:

- Composición: 22% de Na, K 78%.
- Punto de fusión: 12,8°C
- Punto de ebullición @ 101 kPa: 785°C
- Densidad: 724 kg / m<sup>3</sup>
- capacidad de calor específico: 0.879 kJ / kg K
- Viscosidad: 0.000176 Pas
- Seguridad: Reacciona violentamente con el agua.



Aunque el NaK es muy reactivo con el agua, el concepto ha sido desarrollado en una forma de asegurar que el agua y NaK no estarán en estrecha proximidad.

#### **1.4.3.3 Estado actual de la investigación de PCM.**

Una revisión de la literatura sobre el estado actual de la investigación sobre el almacenamiento térmico muestra que la mayor parte de la reciente investigación se centra en la conversión de la energía solar y materiales de construcción [30].

Se ha hecho especial hincapié en la preparación de una forma estable en estado sólido para materiales de cambio de fase que no requieren de encapsulación adicional, sino que tienen una matriz estructural que rodea el material de modo que no cambia de forma a medida que se funde. Ejemplo de ello tenemos los estudios realizados por Sari, 2004 y Xiao et al., 2002 [31].

Es importante subrayar, que la anterior propiedad es particularmente valiosa para los materiales de construcción. Por otro lado, un subgrupo interesante de esta investigación es el uso de espumas de grafito expandido como una matriz de forma estable para la retención de la parafina basada en los materiales de cambio de fase mencionados en los estudios realizados por Sari y Karaipekli [32].

Por otro lado, Mills et al. (2006) [33] han investigado el uso de piezas de tubo de metal, alineados al azar compuestas de fibras de grafito y espumas de grafito. Así, han logrado aumentos de conductividad térmica.

La investigación sobre materiales de cambio de fase térmicamente estables ha producido muchos materiales y mezclas que pueden soportar un gran número de ciclos de cambio de fase. Por ejemplo, una categoría de materiales que fue particularmente relevante para estos estudios fueron los ácidos grasos.

Estos productos químicos se producen en las plantas y los animales y tienen química y térmica favorables propiedades, incluyendo una buena estabilidad en el cambio de fase.

Las actuales investigaciones, se centran principalmente en materiales de construcción y almacenamiento de energía solar debido a la demanda actual en estas áreas, pero es relevante para una gama mucho más amplia de aplicaciones.

### **1.5 ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE MODELOS QUE UTILIZAN PCM.**

Del estudio del potencial de distintos materiales para el almacenamiento térmico se ha derivado a la investigación sobre estos materiales aplicados en distintos modelos con distintas características y diseños.

Desde que se empezó con el modelo unidimensional conocido como la solución de Stefan-Neumann indicada en Carslaw y Jaeger (1959) [34], se han realizado diversos modelos y simulaciones para determinar las características de los materiales y optimizar el diseño de los modelos para un rendimiento óptimo durante el almacenamiento de calor.

Existen muchos autores, que han informado de los resultados de las investigaciones sobre distintos PCM, en cuanto a especificaciones térmicas durante los procesos de fusión y de solidificación en sistemas de almacenamiento de energía. A continuación, se da a conocer muy resumidamente los avances propuestos por algunos de ellos.

Como primer ejemplo, en los artículos de Farid et al. [35] se presenta una revisión sobre el análisis del PCM, encapsulación hermética, y la aplicación de los materiales.

Khodadadi y Zhang [36] estudiaron numéricamente el efecto de la convección y la flotabilidad impulsada en la fusión restringida de PCM en un recipiente esférico. Sus resultados mostraron que la tasa de fusión en la región superior de la esfera es más rápida que en la zona del fondo debido al efecto de la conducción.

Duan et al. [37] han investigado experimentalmente en los procesos de solidificación del n-hexadecano como PCM, dentro de una caja rectangular sobre la base de una formulación de la entalpía dentro de la ecuación de energía. Analizaron los efectos del frío, temperatura de la pared, la relación de aspecto de sobrecalentamiento y líquida inicial del recinto. Se encontró que, para un recinto con una ratio de aspecto más grande, la pendiente del frente de cambio de fase se limita solamente al extremo superior del recinto.

Khillarkar et al. [38] estudió el proceso de fusión numéricamente con un material de cambio de fase en dos geometrías de tubo diferentes. Por un lado, un tubo externo cuadrado con un tubo circular en el interior y por otro lado el opuesto, es decir, un tubo externo circular con un tubo cuadrado interior. Sus resultados mostraron que, debido a la convección natural, la estratificación térmica se manifiesta en la sección superior de la cavidad.

Assis et al. [39] llevando a cabo un estudio experimental y numérico de un proceso de fusión en una cáscara esférica, proporcionan una correlación de la fracción de fusión del frente del material a una combinación apropiada de los números de Grashof, Stefan y Fourier. Además, llevaron a cabo otra combinación experimental-numérica del estudio sobre la solidificación de PCM dentro de una cáscara esférica con varios diámetros [40].

Tan et al. [41] realizando experimentalmente y estudiando computacionalmente la fusión del PCM dentro de una cápsula esférica, compararon las temperaturas calculadas y medidas en la mitad superior de una esfera. Los resultados mostraron que los resultados numéricos tendían a desviarse de los resultados experimenta-

les. De esto, dedujeron que este hecho podía venir relacionado con la estratificación térmica dentro del baño a temperatura constante en la que se encuentra sumergida la cápsula.

Medrano et al. [42] analizaron la caracterización de transferencia de calor de forma experimental. Lo hicieron estudiando cinco pequeños intercambiadores de calor latentes (LHTES) como sistemas de almacenamiento durante los procesos de carga y descarga. En los resultados se indica que el intercambiador de calor de doble tubo con el PCM incrustado en una matriz de grafito tenía los valores más altos de almacenamiento térmico.

Seeniraj et Alabama. [43] investigaron el comportamiento transitorio de un PCM de alta temperatura de almacenado en un intercambiador de calor de carcasa y tubos. Observaron que, si se utiliza una configuración de tubo sin aletas, una importante cantidad de PCM cerca de la salida del tubo permanecía en estado sólido. Esto se debe, a que cuanto más se acerca a la salida, la diferencia entre la temperatura de fusión del HTF y el PCM es más pequeña.

I. Castell et al. [44] experimentalmente han investigado el comportamiento de los módulos de PCM en una configuración para proveer de agua caliente sanitaria (ACS) en un tanque interno. Encontraron que el uso externo de aletas en módulos PCM suscitan un aumento de la frecuencia de la transferencia de calor al agua que se encuentra alrededor. Asimismo, se informó que cuanto más grandes eran las aletas, más rápido era el proceso de transferencia de calor, no obstante, el coeficiente de transferencia de calor era reducido.

Sari y Kaygusuz [45] llevaron a cabo un estudio experimental de fusión y solidificación en un dispositivo de almacenamiento de energía de doble tubo vertical. Observaron, que el coeficiente de transferencia de calor y la velocidad media de flujo de calor era mayormente afectada durante el proceso debido a la fusión por el efecto de la convección natural.

Con el fin de investigar el aprovechamiento de energía térmica producida en procesos de combustión de un motor Diésel, Pandiyarajan et al diseñaron y probaron un sistema de recuperación de calor con un sistema que consistía en una carcasa de aletas, un tubo intercambiador de calor y un tanque de almacenamiento de energía térmica con parafina como material de almacenamiento térmico [46]. Compararon el rendimiento del motor con y sin el dispositivo intercambiador y los resultados mostraron que casi el 10-15% del calor total puede ser recuperado con este sistema.

Liu et al. [47] han investigado experimentalmente las características térmicas y de transferencia de calor del ácido esteárico durante el proceso de solidificación en un sistema de almacenamiento de energía de anillo vertical. Así estudiaron el movimiento de la inter-fase sólido-líquido en la dirección radial, y el efecto del número de Reynolds en los parámetros de transferencia de calor. Además, se analizaron los efectos que producían distintos grosores de aleta. Sus resultados indicaron que la aleta puede mejorar tanto la conducción como la transferencia de calor por convección natural del PCM.

Ettouney et al. [48] llevó a cabo un estudio experimental para investigar la solidificación y fusión en una carcasa según la disposición del tubo por donde circula el PCM. Los resultados, mostraron que los procesos de fusión y de solidificación están dominadas por la convección natural y la conducción, respectivamente.

Vyshak y Jilani [49] Presentaron un estudio comparativo del tiempo de fusión total de un material de cambio de fase (PCM) envasado en tres envases de diferentes configuraciones geométricas: rectangular, cilíndrica y carcasa y tubos. Los resultados obtenidos, mostraron que la carcasa cilíndrica necesita de menor tiempo para almacenar la misma cantidad de energía. Este efecto, debido a la geometría, es más pronunciado con un aumento de la masa de PCM.

Con el fin de mejorar el intercambio de transferencia de calor durante el proceso de fusión, Adine y Qarnia [50] estudiaron el efecto de múltiples PCM con diferentes temperaturas de fusión en el intercambiador de calor de carcasa y tubos. Utilizaron dos sistemas de PCM (LHSU2) y el (LHSU1) durante el proceso de carga y compararon los resultados de almacenamiento de energía térmica. Sus resultados mostraron que cuando aumenta el caudal, el sistema compuesto por dos PCM era eficiente sólo para una temperatura de entrada de HTF baja. Por lo tanto, la unidad de PCM múltiples es más eficiente para bajos valores de caudal y baja temperatura de entrada del HTF.

## 2.OBJETIVO

A continuación, se expone, qué se quiere conseguir con la elaboración de este trabajo.

Ya que se ha dado un repaso a las investigaciones que se han hecho en lo referente a los materiales de cambio de fase, a los distintos sistemas que están implantados en la actual industria de generación de electricidad a partir de sistema de aprovechamiento de la energía solar y sus ventajas y desventajas, se pasa a comentar los principales puntos que pretendemos cubrir:

- Verificación del modelo de solidificación/fusión que utiliza el programa de simulación que se va a utilizar mediante el análisis de un modelo experimental propuesto en un artículo.
- Diseño de un intercambiador-almacenador de energía térmica.

Para el primer apartado, se ha procedido a realizar una búsqueda bibliográfica completa sobre el tema utilizando buscadores de artículos científicos. Algunos de estos buscadores son Science Direct, Springers o Researchgate.

Una vez se ha seleccionado el artículo, se procede a su posterior verificación. La verificación, consiste en coger un experimento descrito en el artículo e intentar realizar un modelo exacto al que se ha utilizado en el artículo para intentar reproducir exactamente las gráficas de temperatura respecto al tiempo que se describen en la experiencia. Esto, demuestra, que el programa Ansys Fluent es capaz de describir con éxito situaciones reales, y que su modelo de cambio de fase es adecuado para el posterior diseño de nuestro almacenador-intercambiador.

A continuación, una vez se tiene la certeza de que el modelo que hemos reproducido y simulado es completamente correcto y valido, procedemos a modelar nuestro propio modelo para obtener datos de su funcionamiento.

Los objetivos que se pretenden cubrir con el modelo son los enumerados a continuación:

- Suplementar la pérdida de carga característica en las centrales solares por factores temporales como nubes pasajeras. Un transitorio.
- Construir un intercambiador de calor que permita a la vez almacenar la energía térmica.
- Demostrar las ventajas que tiene la utilización de un material de cambio de fase de alta temperatura para el almacenaje de energía en forma de calor.
- Proponer un sistema totalmente innovador que puede ser aplicado en procesos reales en la actualidad para mejorar el rendimiento de las centrales que utilicen sales fundidas.
- Aprender a manejar la correcta herramienta de simulación, en este caso el CFD (Computational Fluid Dynamics).

En los siguientes apartados se dará una descripción de los pasos que se han seguido para la correcta modelización. A su vez, se describirán las características de la herramienta que se ha utilizado para el trabajo y se expondrán y compararán los resultados que se han ido obteniendo.



### 3.METODOLOGÍA

Para explicar la metodología que utiliza la herramienta, primero se va a citar por definición qué es en términos generales la dinámica de fluidos computacional:

“La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza el análisis y algoritmos numéricos para resolver y analizar problemas que implican flujos de distintos tipos de fluidos”.

Dicho esto, se puede afirmar que esta herramienta es apta para simular cualquier situación en la que intervengan procesos que impliquen transferencias de calor por contacto o presencia de sustancias, ya estén en estado sólido, líquido o gaseoso.

Por esta utilidad, en la actualidad esta herramienta es usada mucho dentro de numerosas sub-disciplinas de la ingeniería, así como en el campo de la arquitectura moderna.

A continuación, se relatará de forma concisa el proceso o secuencia que se completa a la hora de utilizar esta herramienta.

#### 3.1 BASES DE LA HERRAMIENTA DE CFD

La base del software, consiste en utilizar las computadoras para realizar los cálculos necesarios para simular la interacción de sólidos, líquidos y gases con superficies definidas por las condiciones de contorno.

Es obvio que, con la ayuda de los superordenadores de alta velocidad, se pueden lograr mejores soluciones, pero esta herramienta plantea una solución eficaz y fiable para cualquier usuario que pueda utilizar una computadora corriente.

Por la anterior razón, ahora mismo están disponibles muchos softwares para su utilización en la investigación para mejorar la precisión y la velocidad de escenarios de simulación complejos, tales como los flujos supersónicos o turbulentos.

Se puede resaltar a su vez, que es una herramienta muy útil para la validación experimental inicial para después invertir más acertadamente en una validación final que acarrea pruebas a gran escala. Como ejemplo, podemos señalar que esta herramienta se utiliza mucho en centros que invierten en I+D, para poder simular cualquier interacción entre distintas sustancias en cualquier estado, ya sean en régimen estacionario o en régimen transitorio. Por eso es muy utilizado en industrias como la aeronáutica o centros de ingeniería energéticas para poder realizar las respectivas pruebas de vuelo, comportamientos de fluidos etc.

A continuación, se comenta la metodología que utiliza esta herramienta para la correcta resolución de los problemas.

### **3.2 METODOLOGÍA DE LA CFD**

En todos estos enfoques, se sigue el mismo procedimiento básico. durante el pre-procesamiento. A continuación, se desglosará el procedimiento.

- Se define la geometría (límites físicos) del problema.
- El volumen ocupado por el fluido se divide en células discretas (la malla).
- Se define el modelado físico, por ejemplo, las ecuaciones de movimiento, entalpía y conservación de especies
- Se definen las condiciones de contorno. Esto implica especificar el comportamiento de los fluidos y las propiedades en los límites del problema. Para los problemas transitorios, también se definen las condiciones iniciales y las temporales.

- Se inicia la simulación y las ecuaciones se resuelven de forma iterativa en estado estable o de forma transitoria.
- Por último, se utiliza un post-procesador para el análisis y visualización de la solución resultante.

Debajo de esta simple metodología, se esconden las sub-secuencias que se comentan de manera muy breve en los siguientes apartados.

### **3.2.1 Métodos de discretización.**

Como es sabido, la discretización se define como un proceso matemático que tiene el objetivo de obtener resultados aproximados a partir de la ecuación diferencial del problema.

Dentro de los métodos de discretización se puede señalar que el método de volúmenes finitos (FVM). Este es un enfoque común utilizado en todos los softwares de CFD, ya que supone una ventaja para el uso de la memoria y la velocidad de obtención de una solución [51].

En el método de volúmenes finitos, las ecuaciones diferenciales parciales se rigen por lo general por las ecuaciones de Navier -Stokes, las ecuaciones de conservación de masa y energía y las ecuaciones turbulencia se combinan de nuevo y luego se resuelven por volúmenes de control discretos.

Esta discretización, garantiza la conservación de los flujos a través de un volumen de control en particular.

Aunque el método de volumen finito o FVM, es muy utilizado en los procesos de CFD a continuación se exponen los métodos de discretización más comunes.

- Método de volumen finito.
- Método de elemento finito.
- Método finito diferencial.
- Método elemento espectral.
- Método de elemento de límites.
- Esquemas de discretización de alta resolución.

### **3.2.2 Modelos de turbulencia.**

En la dinámica de fluidos computacional, en casos de flujos turbulentos, un objetivo común es obtener un modelo que puede predecir magnitudes, tales como la velocidad del fluido, para su uso en los diseños de ingeniería.

Para flujos turbulentos, la incertidumbre de los fenómenos que intervienen en la turbulencia, convierten a la mayoría de los métodos de modelización en complicados. Por este motivo, el enfoque principal en tales casos es la de crear modelos numéricos para aproximar los fenómenos de la forma más convincentemente posible.

A continuación, en esta sección se comentan brevemente algunos modelos computacionales utilizados comúnmente para flujos turbulentos.

- Hipótesis de Boussinesq.
- Modelo de Reynolds.
- Ampliación de la simulación de Foucault.
- Independiente de la simulación de Foucault.
- Simulación numérica directa.
- Simulación vórtice coherente.

- Método de la función de probabilidad de la densidad.
- Método de vórtice.
- Método de confinamiento de la vorticidad.
- Modelo lineal de Foucault.

### 3.2.3 Flujo de doble fase.

El modelado de flujo de dos fases está todavía en periodo de desarrollo. Pero de momento, se han propuesto algunos métodos diferentes como se puede demostrar en las siguientes referencias [52] [53].

Para comentarlas brevemente se señala que, por un lado, se tiene el (VOF) o El método de Volumen de Fluidos. Este método puede resultar una solución adecuada para los problemas en los que no se encuentran partículas dispersas.

Por otro lado, está el método de configuración de nivel y seguimiento frontal que tiene que a su vez presenta algunos valiosos enfoques. Aunque no se entrará en detalles ya que estos dos métodos no resultan relevantes para el estudio.

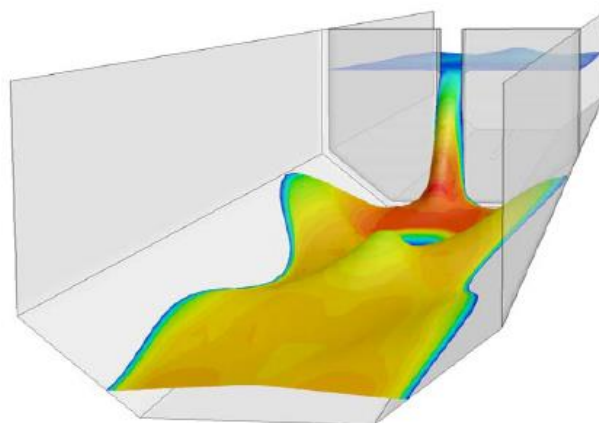


Figura 3.1: Simulación VOF (54).

### 3.2.4 Algoritmos de solución.

Es sabido, que la discretización en el espacio, produce un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias para los problemas inestables y ecuaciones algebraicas para los problemas de equilibrio.

Es por ello que los métodos implícitos o semi-implícitos se utilizan generalmente para integrar las ecuaciones diferenciales ordinarias y para la producción de un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales.

La aplicación de una iteración de Newton o Picard, produce un sistema de ecuaciones lineales que no es simétrica. Tales sistemas, particularmente en 3D, son con frecuencia demasiado grandes para resolverlos directamente, por ello se utilizan métodos de modo iterativo, ya sean métodos estacionarios tales como la sobre-relajación sucesiva o métodos de Krylov.

Por ejemplo, los métodos de Krylov como el GMRES (Generalized Minimized Residual Method), se usan típicamente con el pre-acondicionamiento, operando mediante la minimización del residuo sobre los sub-espacios sucesivos generados.

Otro caso importante, es el caso de Multigrid, este, tiene la ventaja de un rendimiento asintóticamente óptimo en muchos problemas. Al operar en múltiples escalas, Multigrid reduce todos los componentes del residuo por factores similares, lo que lleva a un número de malla independiente respecto a las iteraciones.

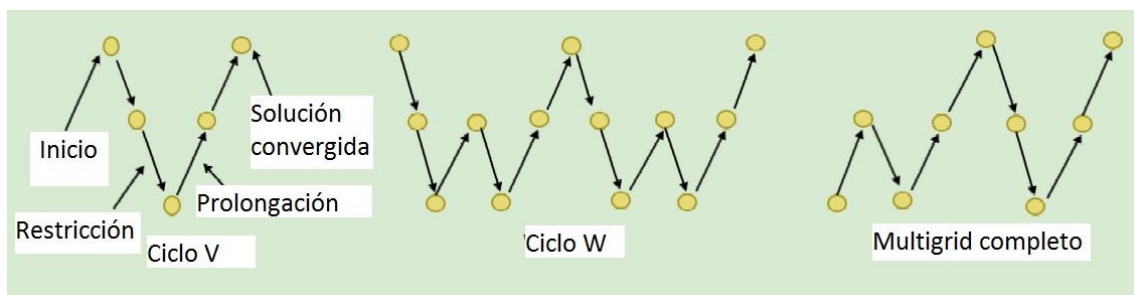


Figura 3.2: Esquema ciclos Multigrid (55).

No obstante, en los sistemas indefinidos, pre-acondicionadores como la factorización LU incompleta, métodos como el Multigrid realizan mal su labor o fallan completamente. Por este motivo, la estructura del problema debe ser sometido a un acondicionamiento previo eficaz [53].

Aun así, hoy en día, los métodos utilizados más comúnmente en CFD, son los algoritmos SIMPLE y el Uzawa que dejan libre la malla de tasas dependientes de la convergencia.





## 4.EL MODELO TEÓRICO

En este caso, se ha optado por el paquete de programas que incorpora Ansys Fluent, más concretamente se ha utilizado la versión 16.2.

Dentro, se encuentran una serie de paquetes de programas que son necesarios para cubrir la secuencia de todo el proceso de la dinámica de fluidos computacional. Esta secuencia, se ha explicado en la sección de la metodología por lo que no se volverá a repetir.

Los programas que han sido necesarios para completar todas las secuencias comentadas, son las siguientes:

- Ansys Workbench.
- Design Modeler.
- Mesh.
- Fluent Launcher.



Figura 4.1: Logo de programa (ANSYS Fluent).

A continuación, se exponen de manera detallada, las distintas ecuaciones que han sido necesarias utilizar para la resolución de nuestro modelo que involucra el

cambio de fase de un material. Para ello, lógicamente se ha utilizado el modelo "Cambio de fase" dentro de la herramienta.

#### 4.1 MODELO DE SOLIDIFICACIÓN/FUSIÓN

En Ansys Fluent, se utiliza, una técnica de entalpía-porosidad para modelar el proceso de solidificación y de fusión. En esta técnica, no se realiza un seguimiento de la interfaz de fusión de forma explícita. En lugar de ello, se asocia a cada célula en el dominio la llamada fracción líquida, la cual indica la fracción del volumen celular que está en fase líquido. A su vez, la fracción líquida se calcula en cada iteración, basándose en un equilibrio de entalpía.

La zona blanda o "mushy region" es una región en la que la fracción líquida se encuentra entre 0 y 1. En cuanto a la zona pastosa, se modela como un "pseudo" medio poroso en el que la porosidad disminuye 1-0 cuando el material se va solidificando. Por esto, cuando el material se ha solidificado completamente en una célula, la porosidad se convierte en cero y por lo tanto las velocidades también caen a cero [56].

En esta sección, se dará una visión general de la metodología utilizada por el programa en procesos de solidificación y de fusión.

##### 4.1.1 Ecuación de la energía.

La entalpía del material se calcula como la suma de entalpía sensible, y el calor latente,  $\Delta H$ :

$$H = h + \Delta H \quad (1)$$

Donde,

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (2)$$

Y

$h_{ref}$ = entalpía de referencia.

$T_{ref}$ = temperatura de referencia.

$c_p$ = calor específico a presión constante.

La fracción líquida  $\beta$  se puede definir como:

$$\begin{aligned} \beta &= 0 && \text{if } T < T_{solidus} \\ \beta &= 1 && \text{if } T > T_{liquidus} \\ \beta &= \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} && \text{if } T_{solidus} < T < T_{liquidus} \end{aligned} \quad (3)$$

Ahora, se puede escribir la cantidad de calor latente en términos de calor latente del material,  $L$ :

$$\Delta H = \beta L \quad (4)$$

La cantidad de calor latente, puede variar desde 0 (para un estado sólido) hasta  $L$  (para un líquido).

Para problemas que necesitan de un modelo de solidificación/fusión, la ecuación de energía se escribe de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dT}(\rho H) + \nabla(\rho v H) = \nabla(k \nabla T) + S \quad (5)$$

Donde,

$H$ =entalpía.

$\rho$  = densidad.

$v$ =velocidad de fluido.

$S$ = Término fuente.

La solución para la temperatura, es esencialmente una iteración entre la ecuación de energía (Ecuación 1) y la ecuación fracción líquida (Ecuación 3). Directamente a través de la Ecuación 3 [56] para actualizar la fracción líquida.

Por lo general, en algunos métodos como resultado, se podría encontrar una mala convergencia de la ecuación de energía, es por eso por lo que en ANSYS Fluent, se utiliza el método sugerido por Voller y Swaminathan para actualizar la fracción líquida.

En el caso de los metales puros, donde las temperaturas de solidificación y fusión son iguales, se utiliza un método basado en el calor específico, dado por Voller y Prakash [56].

#### 4.1.2 Ecuación del momento.

El método de entalpía/porosidad, trata la región blanda (región parcialmente solidificada) como un medio poroso

La porosidad en cada celda, se establece igual que la fracción líquida en cada celda. Por eso, como se ha indicado con anterioridad, en las regiones completamente solidificadas, la porosidad es igual a cero. Por otro lado, el disipador de impulso debido a la reducida porosidad en la zona pastosa o mushy region tiene la siguiente forma:

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} Amush(v - vp) \quad (6)$$

Donde  $\beta$  es el volumen de fracción líquida,  $\epsilon$  es un número pequeño (0.001) para prevenir el posible cociente con 0,  $Amush$  es el constante de la zona pastosa,  $vp$  es la velocidad del sólido debido al empuje del material en estado sólido fuera del dominio.

Las constantes en la zona pastosa, miden la amplitud de la amortiguación. Cuanto mayor sea este valor, es más pronunciada la transición de la velocidad del material a cero. Unos valores muy grandes pueden hacer que la solución oscile.

Por otro lado, la velocidad de extracción, se incluye para explicar el movimiento del material solidificado, ya que se mueve continuamente desde el inicio hasta el final.

La presencia de este término en la Ecuación 6, permite que el material recién solidificado pueda moverse a la velocidad de extracción.

En el caso de que el material solidificado no esté siendo retirado del dominio, se computan otros detalles acerca de la velocidad de arrastre y para la velocidad de extracción.

En el hipotético caso de que el programa no encuentre una solución lógica para la retirada del dominio del material, puede informar mediante un error o bien dando un resultado erróneo por lo que se tiene que tener muy en cuenta la lectura de las soluciones que se reciben.

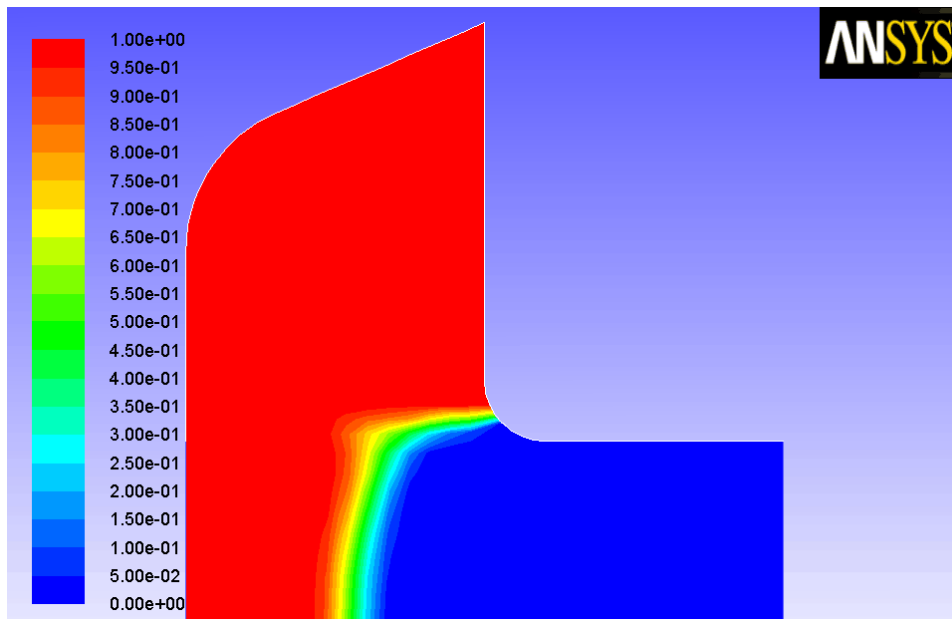


Figura 4.2: En la transición de color se aprecia la zona pastosa o mushy region (ANSYS Fluent).

#### 4.1.3 Ecuación de turbulencia.

El momento de disipación, se añade a todas las ecuaciones de turbulencia en las zonas blandas para que se pueda informar de la presencia de la materia sólida. El término del impulso que se ha comentado con anterioridad en la ecuación 6:

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} Amush\Phi \quad (7)$$

Donde  $\Phi$ , representa la cantidad de turbulencia que se está resolviendo ( $k, \varepsilon, \omega$  y así sucesivamente), y la constante de la zona pastosa constante,  $Amush$ , es el mismo que el utilizado en la Ecuación 6.

#### 4.1.4 Ecuación de especies.

La solidificación y la fusión para una sustancia pura, se produce a una temperatura de fusión distinta, denotada como  $T_{melt}$ .

Para una mezcla de varios componentes, sin embargo, existe en el mushy region un estado de transición entre un solidus inferior y una temperatura de licuefacción superior. Cuando se solidifica un líquido de múltiples componentes, los solutos se transfieren desde la fase sólida a la fase líquida. Este efecto se cuantifica por el coeficiente de partición del soluto  $i$ , denotado como  $k_i$ , el cual es la relación de la fracción de masa en el sólido referente en el líquido en el emplazamiento de la interfase.

ANSYS Fluent computa las temperaturas de solidificación y de fusión en una mezcla de especies como:

$$T_{solidus} = T_{melt} + \sum_{solutes} m_i Y_i / K_i \quad (8)$$

$$T_{liquidus} = T_{melt} + \sum_{solutes} m_i Y_i \quad (9)$$

Donde,  $K_i$  es el coeficiente de partición del soluto,  $i$ ,  $Y_i$  es la fracción de masa de soluto, y  $m_i$  es la pendiente de la superficie del liquidus respecto a  $Y_i$ . Si el valor de la fracción de masa  $Y_i$  excede el valor de la fracción de masa eutéctica,  $Y_{i, eut}$  entonces  $Y_i$  se adjunta al término  $Y_{i, eut}$ , a la hora de calcular las temperaturas de solidus y liquidus. Se asume, que el último material de especies de la mezcla es el disolvente y que las otras especies son los solutos.

ANSYS Fluent, espera que se quiere establecer un valor negativo de la pendiente de licuefacción de especies  $i(m_i)$ . Si se ingresa una pendiente positiva para, ANSYS Fluent no lo tendrá en cuenta y en su lugar se calculará utilizando la temperatura eutéctica  $T_{eut}$  y la fracción de masa eutéctica  $Y_{i, eut}$ .

$$m_i = \frac{T_{eut} - T_{melt}}{Y_{i, eut}} \quad (10)$$

Actualizando la fracción líquida mediante la ecuación 3, puede derivar en errores y dificultades de convergencia en mezclas de multi-componentes, por esta razón, la fracción líquida es actualizada tal y como se indica a continuación:

$$\beta^{n+1} = \beta^n - \lambda \frac{ap(T - T^*)\Delta t}{\rho VL - ap\Delta t L \frac{\partial T^*}{\partial \beta}} \quad (11)$$

Donde el superíndice  $n$  indica el número de iteración,  $\lambda$  es el factor de relajación con un valor de 0.9,  $ap$ , es el coeficiente de matriz de celdas,  $\Delta t$  es el paso del tiempo,  $\rho$  es la densidad,  $V$  es el volumen de celda,  $T$  es la temperatura de celda y  $T^*$  es la temperatura de la interface.

Por otro lado, ANSYS Fluent ofrece dos modelos para las segregaciones de especies en una micro-escala. Estos dos modelos se llaman la regla de Lever y la regla de Scheil. El primero, asume que la difusión del soluto en el sólido es infinita, mientras que el segundo asume el mismo valor como 0.

Para la regla de Lever, la temperatura de la interfase  $T^*$ , se calcula como:

$$T^* = T_{melt} + \sum_{i=0}^{Ns-1} m_i \left( \frac{Y_i}{K_i + \beta(1 - k_i)} \right) \quad (12)$$

Donde  $N_s$ , es el número de especies.

La regla de Scheil por otro lado, define  $T^*$  como se dicta a continuación:

$$T^* = T_{melt} + \sum_{i=0}^{Ns-1} m_i Y_i \beta^{k_i-1} \quad (13)$$



Del mismo modo, el "Back diffusion" (el cual, es el número finito de difusión de la especie del sólido) se puede incorporar a la formulación tal y como se indica a continuación.

Para la regla de Lever, las ecuaciones de transporte de especies se resuelven con la fracción de masa completa de las especies  $i$ ,  $Y_i$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} = (\rho Y_i) + \nabla(\rho[\beta v_{liq} Y_{i, liq} + (1 - \beta) v_p Y_{i, sol}]) = -\nabla J_i + R_i \quad (14)$$

Donde  $R$  es la ratio de reacción y  $J_i$  se define como:

$$J_i = -\rho[\beta D_{i, m, liq} \nabla Y_{i, liq} + (1 - \beta) D_{i, m, sol} \nabla Y_{i, sol}] \quad (15)$$

$v_{liq}$  es la velocidad del líquido y  $v_p$  es la velocidad del sólido.  $v_p$  se define como 0 si no se incluyen las velocidades de empuje en la computación. La velocidad del líquido, se puede determinar por otro lado mediante la ecuación de flujo, tal y como se muestra a continuación:

$$v_{liq} = \frac{(v - v_p(1 - \beta))}{\beta} \quad (16)$$

Las fracciones de masa del líquido ( $Y_i, liq$ ) y el sólido ( $Y_i, sol$ ) están relacionadas entre ellas mediante la partición del coeficiente  $k_i$ :

$$Y_{i, sol} = k_i Y_{i, liq} \quad (17)$$

Cuando se selecciona el modelo de Scheil en ANSYS Fluent, la ecuación se resuelve para  $Y_i, liq$  como un valor dependiente [56].

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i, liq) + \nabla(\rho[\beta v_{liq} Y_i, liq + (1 - \beta) v_p Y_i, sol]) \\
 = R_i + \nabla(\rho \beta D_{i, m, liq} \nabla Y_i, liq) - k_i Y_i, liq \frac{\partial}{\partial t}(\rho(1 - \beta)) \\
 + \frac{\partial}{\partial t}(\rho(1 - \beta) Y_i, liq)
 \end{aligned} \quad (18)$$

#### 4.1.5 Ecuación "Back Diffusion".

Como se ha indicado, la regla Scheil asume la difusión de solutos como cero en la zona sólida, mientras que la regla de momentos supone la difusión de solutos infinita en el sólido.

Los modelos de Back diffusion establecen una difusión sólida finita en el micro nivel usando un parámetro adimensional denotado entre 0 (sin difusión, como en la regla Scheil) y 1 (difusión infinita, como en la regla de la palanca).

Se destaca que siempre depende de las condiciones de solidificación, como la difusividad sólida, el tiempo de solidificación local y la separación de los brazos dendríticos secundaria. La temperatura de la interface se calcula como se indica:

$$T_* = T_{melt} + \sum_{i=0}^{N_s-1} m_i Y_i (1 - (1 - \gamma k_i)(1 - \beta))^{\frac{k_i-1}{(1-\gamma k_i)}} \quad (19)$$

Cuando el Back diffusion se incluye en la formulación de la regla de Scheil, la ecuación del transporte de especies se resuelve con la masa de especies líquidas como una variable dependiente:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho Y_i, liq)}{\partial t} + \nabla(\rho[\beta v_{liq} Y_i, liq + (1 - \beta) v_p Y_i, sol]) \\
 = R_i + \nabla(\rho \beta D_{i, m, liq} \nabla Y_i, liq) - k_i Y_i, liq \frac{\partial(\rho(1 - \beta))}{\partial t} \\
 + \frac{\partial(\rho(1 - \beta) Y_i, liq)}{\partial t} - \gamma(1 - \beta) \frac{\partial(\rho Y_i, liq)}{\partial t}
 \end{aligned} \quad (20)$$

La fracción total de la masa de especies y la fracción total de masa de especies líquidas, se definen como sigue:

$$Y_{i, sol} = k_i Y_i [1 - (1 - \gamma k_i)(1 - \beta)]^{\frac{k_i - 1}{(1 - \gamma k_i)}} = K_i Y_{i, liq} \quad (21)$$

#### 4.1.6 Velocidades de empuje en el material.

En los procesos continuos, la materia solidificada, es continuamente empujada fuera del dominio computacional como se muestra en la imagen que viene a continuación. Por esta razón, el material sólido tendrá una velocidad finita que se tendrá que tener en cuenta en el método de entalpía-porosidad.

Como se ha mencionado en las ecuaciones de momento, el enfoque del método de entalpía-porosidad trata la zona pastosa de sólido-líquido como un medio poroso con una porosidad igual a la fracción líquida. Un término de difusión adecuado puede ser añadido en la ecuación de momento para tener en cuenta la caída de presión debido a la estructura porosa de la zona pastosa.

Para aplicaciones de procesos continuos, la velocidad relativa entre el líquido fundido y el sólido se utiliza en el término disipación de impulso (Ecuación 6) en lugar de la velocidad absoluta del líquido.

El cálculo exacto de la velocidad de empuje para el material sólido es dependiente de módulo de Young, la relación del sólido de Poisson y las fuerzas que actúan sobre él. ANSYS Fluent, utiliza una ecuación de Laplace para aproximarse a las velocidades de empuje en la región sólida, basada en las velocidades en los límites de la región solidificada:

$$\nabla^2 v_p = 0 \quad (22)$$

Por otro lado, ANSYS Fluent utiliza las siguientes condiciones de contorno cuando se calculan las velocidades de empuje:

- En una entrada de velocidad, una pared estacionaria, o una pared móvil, se utiliza la velocidad especificada.
- En todos los demás límites (incluyendo la interface líquido-sólido entre el material líquido y el solidificado), se utiliza una velocidad nula del gradiente.

Se tiene que tener en cuenta, que las velocidades de extracción se calculan sólo en la región sólida.

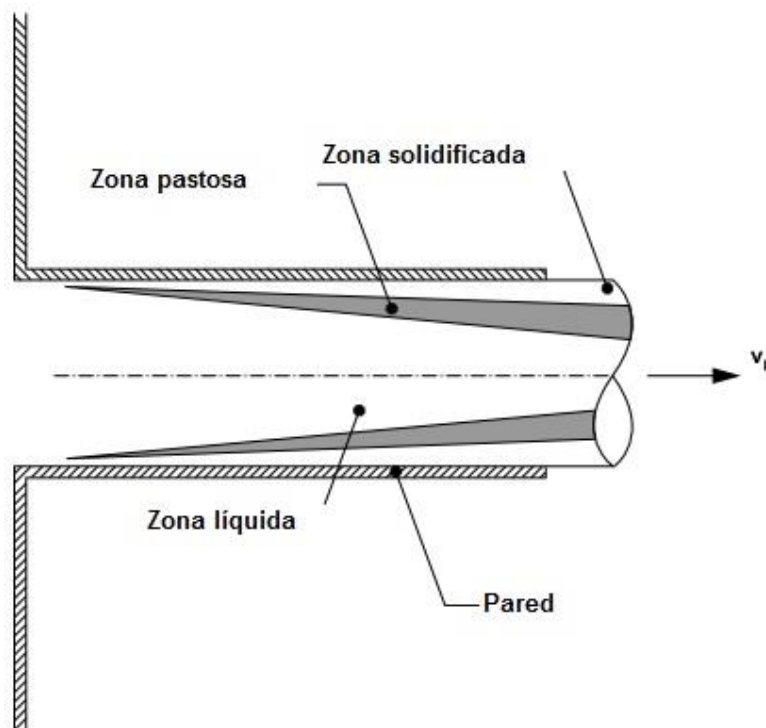


Figura 4.3: Empuje en el material. Imagen propiedad de ANSYS Fluent.

#### 4.1.7 Resistencia al contacto en las paredes.

Observando el modelo de solidificación/fusión de ANSYS Fluent, se puede ver que existe un espacio de aire entre las paredes y el material solidificado, por eso

se utiliza una resistencia a la transferencia de calor adicional entre las paredes y las partículas con fracciones líquidas de menos de 1.

Esta resistencia de contacto se explica por la modificación de la conductividad del fluido cerca de la pared. Por lo tanto, se muestra el flujo de calor de la pared, y su posterior empuje en el material como se muestra en la Figura 4.3.

Por otro lado, el circuito para resistencia de contacto, se define como:

$$q = \frac{(T - Tw)}{\left(\frac{l}{k} + Rc(1 - \beta)\right)} \quad (23)$$

Donde  $T$ ,  $Tw$  y  $l$  se definen en la figura 4.4.  $k$  es la conductividad térmica del fluido,  $\beta$  es el volumen de fracción líquida y  $Rc$  es la resistencia al contacto, que tiene las mismas unidades, pero inversas que el coeficiente de transferencia de calor.

Este hecho se encuentra mostrado gráficamente en la Figura 4.4 donde se puede observar la interacción que se puede recrear en una célula cercana a la pared.

El programa utilizando la ecuación 23, aporta la información de este fenómeno automáticamente.

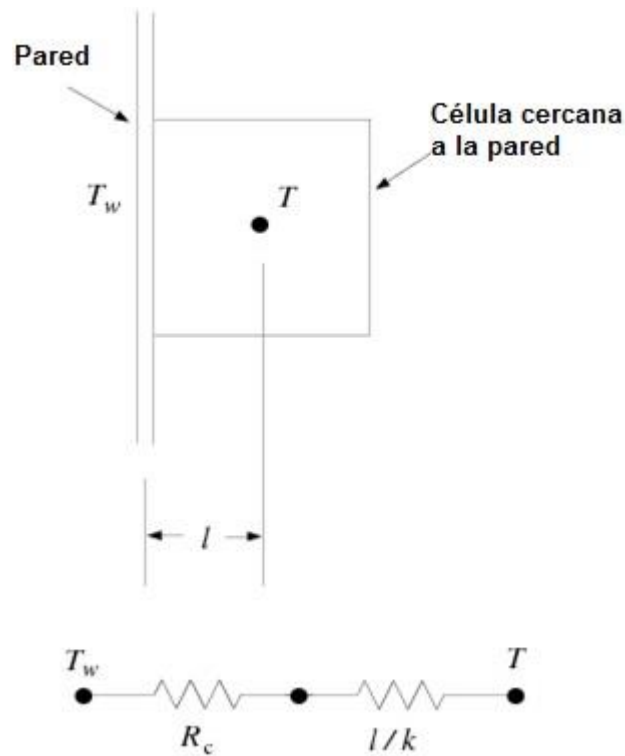


Figura 4.4: Circuito de resistencia al contacto (ANSYS Fluent).

#### 4.1.8 Fenómenos de flotación o "Buoyancy effects".

Cuando hay varias especies involucradas en el proceso de fusión/solidificación, la densidad de la masa líquida varía con la temperatura, así como la composición de especies.

En presencia de un campo gravitatorio, la flotabilidad se inducirá por dos mecanismos:

- Flotabilidad térmica: es el empuje de la gravedad debido a la variación de densidad con la temperatura.

- Flotabilidad del soluto: es el empuje de la gravedad debido a la variación de densidad con el cambio en la composición de las especies de la masa fundida.

En los problemas de solidificación de múltiples componentes, los solutos son rechazados continuamente cerca de la interfaz sólido-líquido, lo que conduce a la redirección al centro del sistema de los solutos. Este "enriquecimiento" de los solutos provoca un gradiente de concentración en la proximidad inmediata de la interfaz sólido-líquido, y por lo tanto un gradiente de densidad.

El modelado de la flotabilidad térmica y del soluto es a menudo importante para la predicción exacta del comportamiento global de la solidificación. El flujo debido a la flotabilidad térmica tiende a favorecer la mezcla y suaviza los gradientes de temperatura. Por lo tanto, si se excluye este factor, puede dar lugar a predicciones inexactas del tiempo de solidificación.

La flotabilidad del soluto, mueve el líquido "enriquecido" a una distancia desde la interfaz líquido-sólido y lo sitúa en el campo compuesto por el líquido.

Para los problemas de solidificación de múltiples componentes, los flujos de flotación inducida se modelan en ANSYS Fluent utilizando el método de Boussinesq.

La flotabilidad térmica se calcula como se describe en "Natural Convection and Buoyancy-Driven Flows Theory" y Las fuerzas de volumen debido a la flotabilidad del soluto se calculan utilizando este método:

$$F_s = \rho_{ref} g \sum_{i=0}^{N_s} \beta_{s,i} (y_{l,i} - y_{ref,i}) \quad (24)$$

Donde  $y_{l,i}$  es la fracción de masa del  $i$  soluto en la fase líquida y  $y_{ref,i}$  es la referencia a la fracción de masa de la  $i$  especie.  $\beta_{s,i}$  es la expansión del coeficiente de

especies  $i$  y  $N_s$  es el número total de especies soluto. Finalmente,  $g$  es el vector de gravedad y  $\rho_{ref}$  es la densidad de referencia.

La fuerza total del sistema, es la suma de la flotabilidad del soluto y la térmica, que puede tener el mismo o adverso signo.

Su relativa influencia, puede ir cambiando a medida que se va efectuando la simulación del modelo que se ha escogido.



## 5.VALIDACIÓN MODELO FUSIÓN/SOLIDIFICACIÓN FLUENT

En este apartado, se describe cómo se ha procedido para validar el modelo de fusión que utiliza Ansys Fluent para resolver casos de este tipo.

Los modelos que se muestran a continuación, han sido creados mediante distintas herramientas que incluye el paquete de Ansys. Dos de estos programas son:

- Design Modeler:
- Gambit.

Al ser los dos softwares gemelos, es decir, se utilizan para el mismo propósito, no es necesaria más explicación dado que se trata de una herramienta más de diseño asistido por ordenador. La única diferencia que se puede comentar es que el Design Modeler se incluye en el mismo paquete de ANSYS Fluent y que el Gambit, aunque sea un programa que en versiones anteriores de ANSYS Fluent estaba incorporado, para esta versión hay que descargarlo a parte ya que no es la herramienta por defecto del programa.

Una ventaja del Gambit sobre el DM (Design Modeler) es que en este programa es mucho más fácil la diferenciación de los distintos volúmenes que incluye el modelo, evitando así problemas con operaciones Booleanas. Por otro lado, Gambit es capaz de mallar el modelo, mientras que el DM necesita de una herramienta adicional que se llama Mesh.

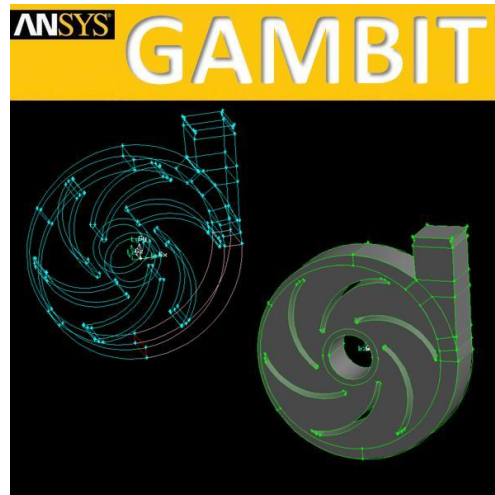


Figura 5.1: Portada Gambit.

A continuación, se procede a dar un resumen de lo que ha supuesto el proceso de validación, empezando desde un primer modelo del sistema en 2D e hasta el sistema en 3D. Por último, hay que destacar que las gráficas de temperatura respecto al tiempo que se quieren reproducir, proceden del artículo que se cita a continuación: [57].

## 5.1 MODELO EN 2D

En este apartado, se ha procedido a construir un modelo idéntico al modelo experimental del artículo [57]. Para ello, se han tomado en cuenta todas sus dimensiones, tanto del contenedor del material encargado del almacenamiento térmico o PCM, como el de las aletas, tubo interior etc. Como se describe en el mismo modelo del artículo, al ser un sistema de una longitud muy corta, el  $\Delta t$  se considera despreciable, y al ser también la resistencia de las paredes del tubo calentador despreciable a su vez, se ha procedido a construir un modelo muy simple que no tiene en cuenta el flujo de agua caliente que transcurre por el cilindro interior.

En este modelo, la transferencia de calor se simula directamente en las paredes de las aletas y el tubo por donde circula el agua caliente que es el HTF (Heat Transfer Fluid).

Ya que mediante la utilización de este sistema, el calor se propaga instantáneamente al material cambio de fase que se utiliza en el experimento, que en este caso es Dodecanoid Acid [57] un tipo de parafina, se ha optado por incluir las pérdidas de calor por el aislamiento exterior del sistema. A continuación, se exponen las propiedades de la parafina utilizada, tomados del artículo [57] pero que a su vez, han sido recogidos de [58] [59]:

Tabla 5.1: propiedades del Dodecanoid Acid.

Peso molecular	200.31 (kg/kmol)
Densidad a 20°C	950 (kg/m <sup>3</sup> )
Densidad a 45 °C	873 (kg/m <sup>3</sup> )
Temperatura fusión (°C)	44°C
Calor latente de fusión	182 (kJ/kg)
Calor específico sólido/líquido	2.4/2.0 (kJ/kgK)
Viscosidad dinámica	0.008 (Pa s)
Difusividad térmica de sólido	6.5 e-05 (m <sup>2</sup> /s)
Difusividad térmica de líquido	8.48e-05 (m <sup>2</sup> /s)

Por otro lado, se expone una figura del modelo que ha sido creado utilizando la herramienta que se ha citado al principio de este apartado el DM.

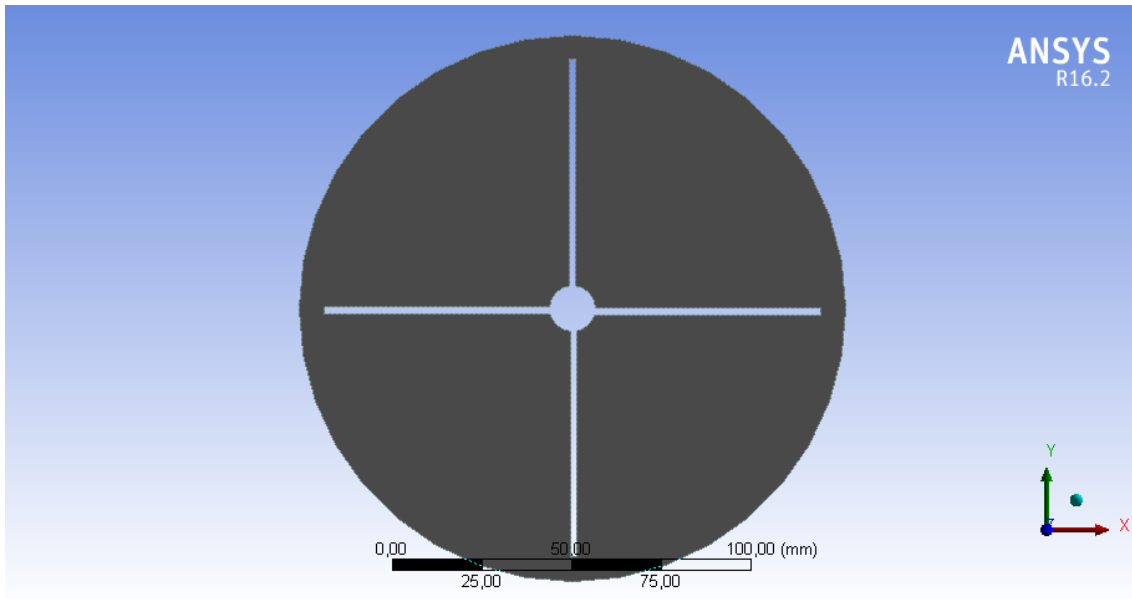


Figura 5.2: Modelo en 2D creado utilizando el Design Modeler.

### 5.1.1 Puntos de referencia en el modelo en 2D.

En este apartado, se exponen los puntos donde se han colocado las termoresistencias a la hora de realizar el experimento. Dichos puntos se describen en el artículo [57].

Dado que este modelo corresponde a un modelo en 2D, es imposible colocar los puntos de adquisición de datos en su lugar exacto. Aun así, debido a que se trata de un sistema homogéneo, los datos obtenidos tendrían que ser muy parecidos a lo largo de todo el volumen.

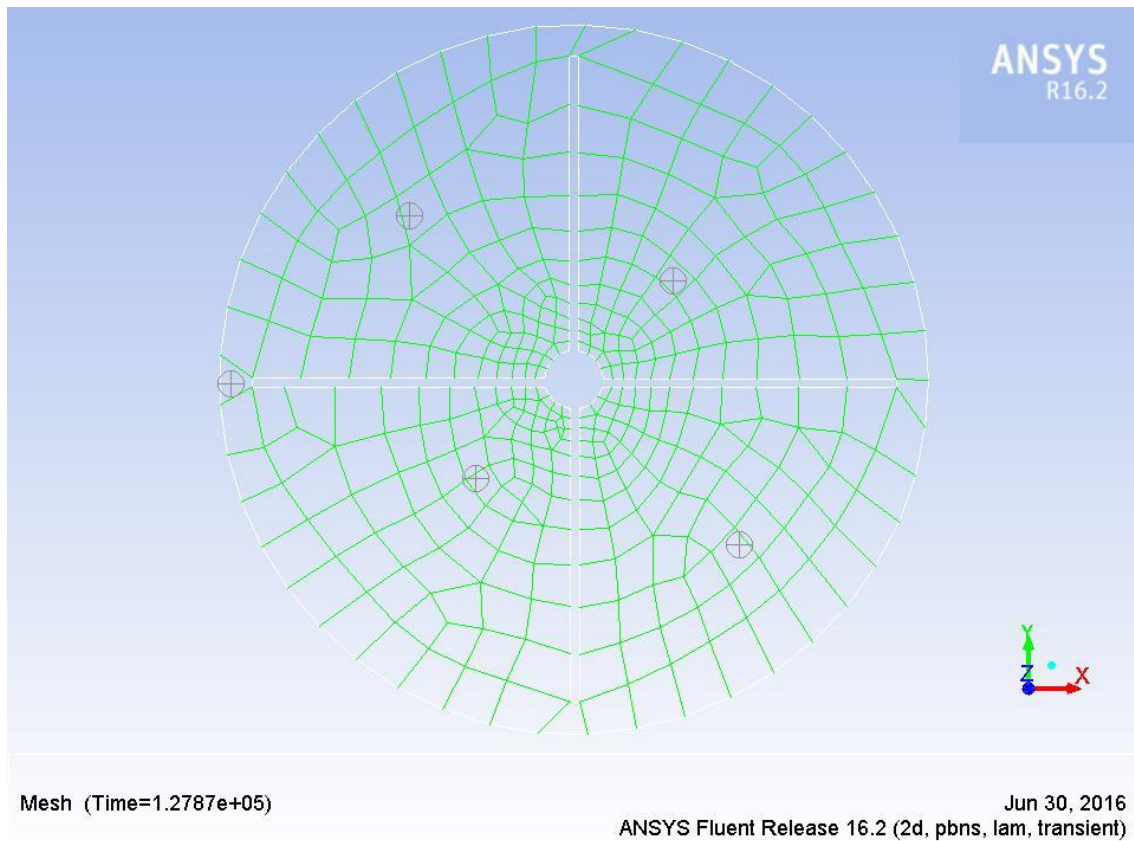


Figura 5.3: ubicación de los puntos situados en el modelo en 2D

Una vez se encuentran colocados todos los puntos correctamente, se procede a la simulación.

La simulación, se tiene que efectuar con un time-step y unas condiciones adecuadas para que las soluciones a las ecuaciones puedan converger y se puedan obtener buenos resultados.

En el siguiente apartado se muestran los datos obtenidos en la simulación.

### 5.1.2 Gráficas de temperatura respecto a tiempo en el modelo en 2D.

Para poder sacar las temperaturas respecto al tiempo en cada punto, se procede a crear un monitor para cada toma de datos. Estos monitores, que en este caso son cinco, el T10, T11, T12, T13 y T14 recogerán el historial del cambio de la temperatura en su correspondiente lugar.

A continuación, se muestran los resultados que se han obtenido. La línea roja representa la curva del experimento, la azul es la que se ha obtenido:

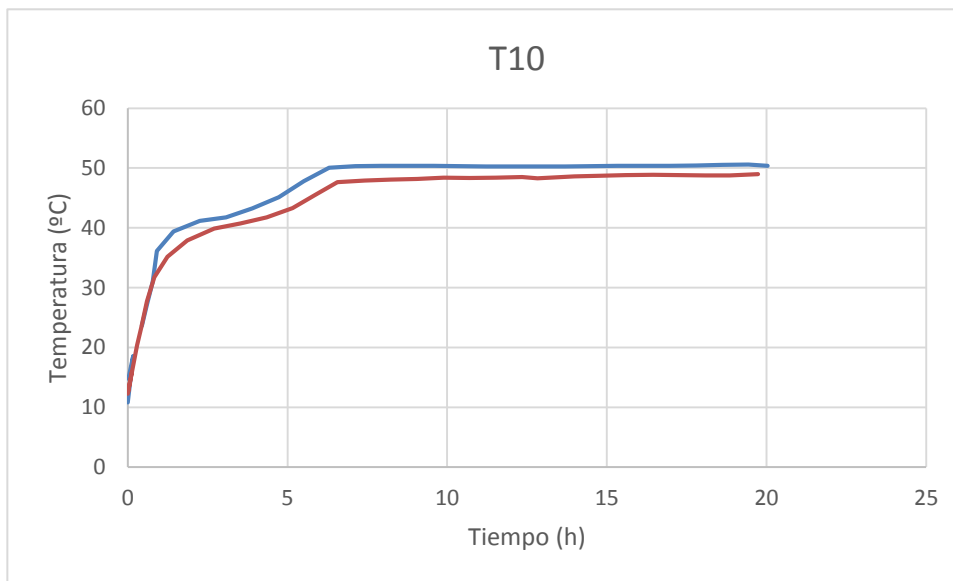


Figura 5.4: Resultado datos obtenidos en el punto T10

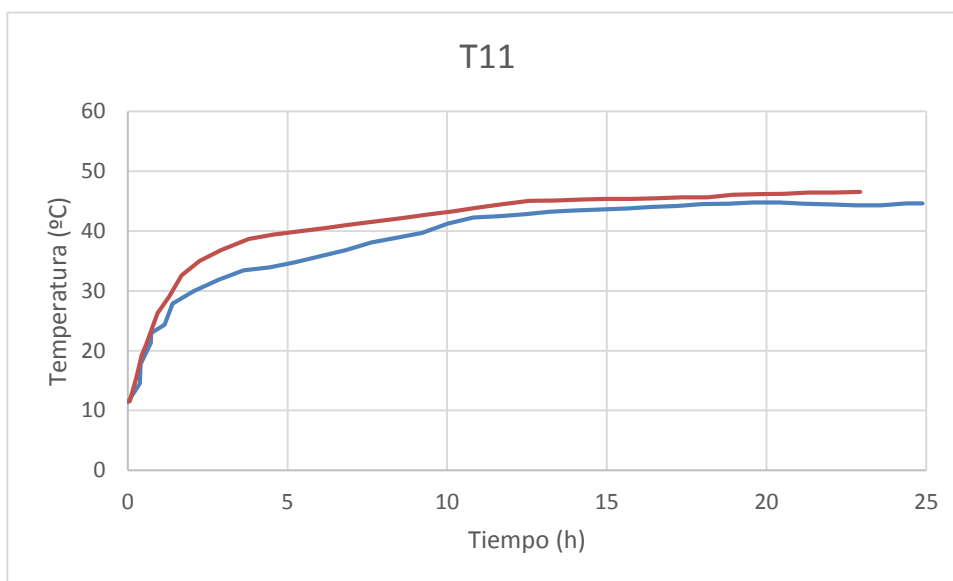


Figura 5.5: Resultado datos obtenidos en el punto T11.

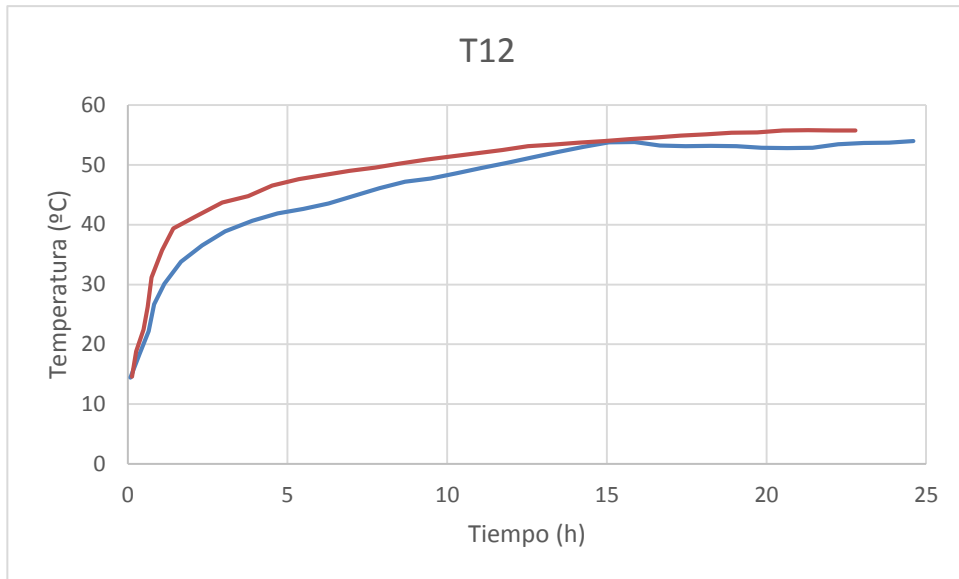


Figura 5.6: Resultado datos obtenidos en el punto T12.



Figura 5.7: Resultado datos obtenidos en el punto T13.

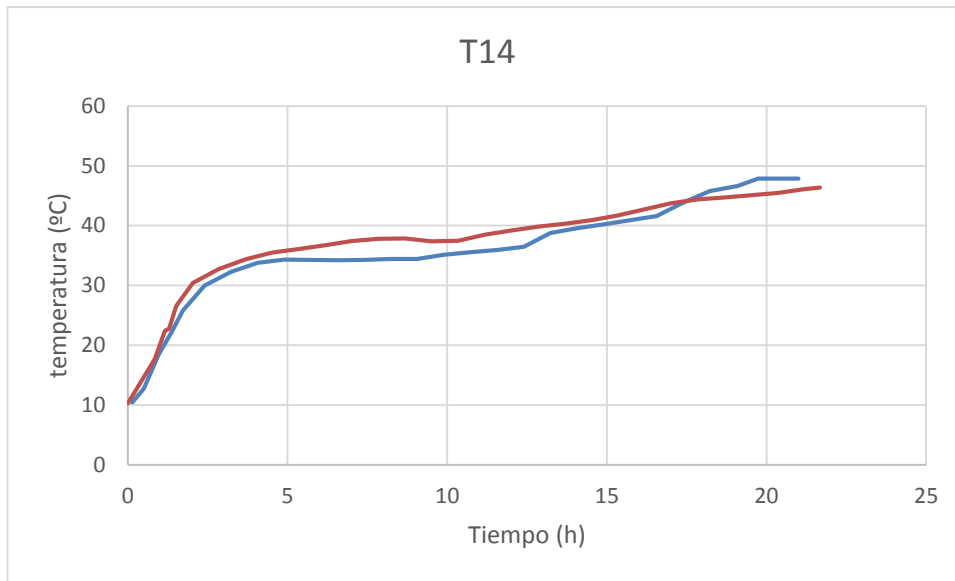


Figura 5.8: Resultado datos obtenidos en el punto T14

Como se puede apreciar, los puntos T11 y T12 son puntos simétricos al igual que los puntos T13 y T14, por lo que los resultados obtenidos son más que parecidos.

Aun así, a simple vista se ve que, aunque las curvas no están muy alejadas de la realidad, se nota que el modelo en 2D es muy simple, ya que, en la realidad, el calor no se transfiere de forma instantánea del tubo interior a las aletas. Por otro lado, en este modelo no se toma en cuenta el flujo del HTF por lo que es razonable que este modelo no cuadre con el modelo original.

Por estos motivos, se ha optado por crear un nuevo modelo en 3D para suplir las carencias de este modelo e intentar demostrar que Fluent es fiable para simular casos reales.



### 5.1.3 Contornos del frente de fusión en el modelo en 2D.

A continuación, se dejan unas imágenes del frente de fusión en el modelo en 2D para demostrar su correcto funcionamiento.

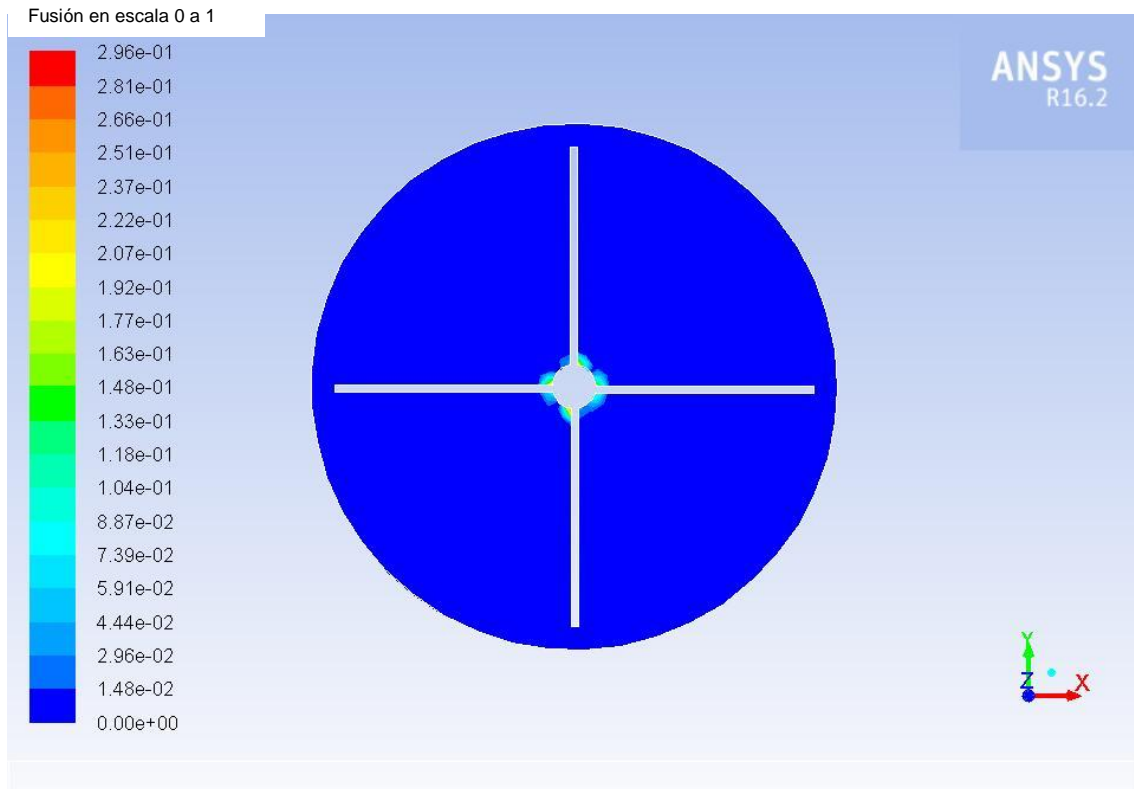


Figura 5.9: Creación inicial del frente de fusión

El fenómeno que se irá describiendo, será el mismo que se ha visto anteriormente en el modelo en 2 dimensiones. La diferencia entre el modelo en 2D y el actual modelo en 3D, es sobre todo que las aletas se encuentran en contacto con el tubo central en vez de ser de una sola pieza.

Este hecho, hace que el sistema describa de manera mucho más acertada el fenómeno de fusión que se está creando en la figura 5.9. A medida que avanza el tiempo, se observará como el pequeño frente de fusión que se muestra al comienzo va adquiriendo más superficie.

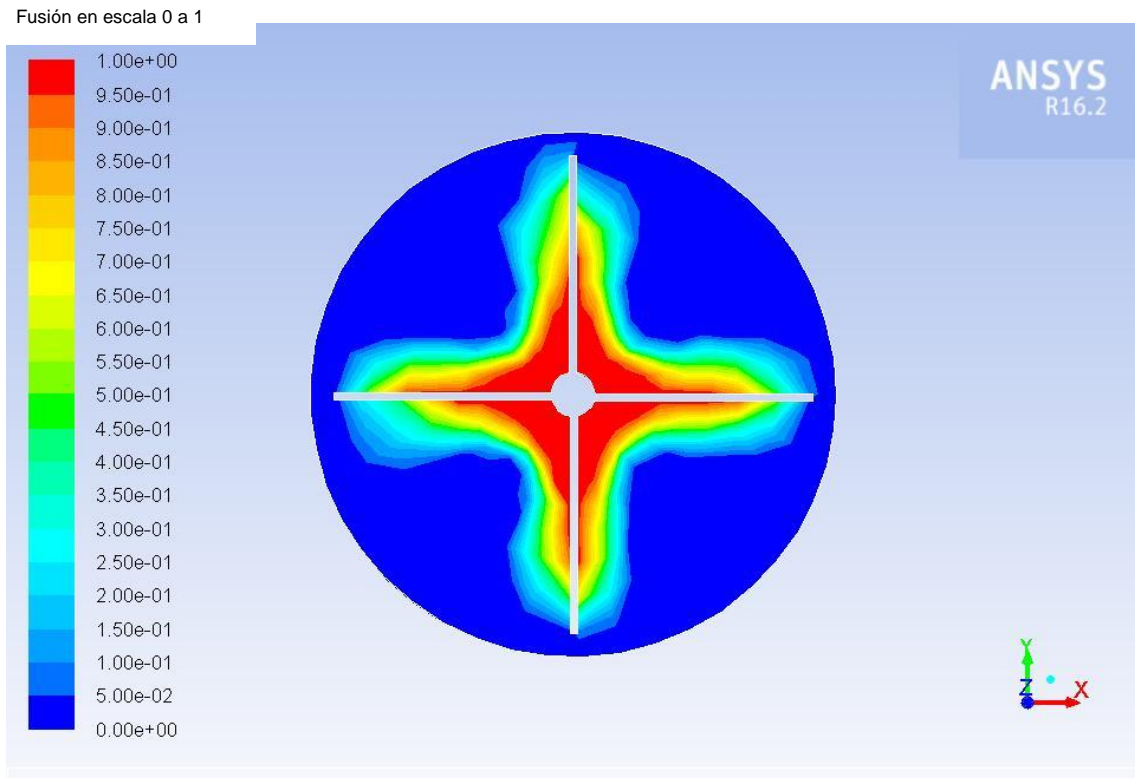


Figura 5.10: propagación del frente de fusión

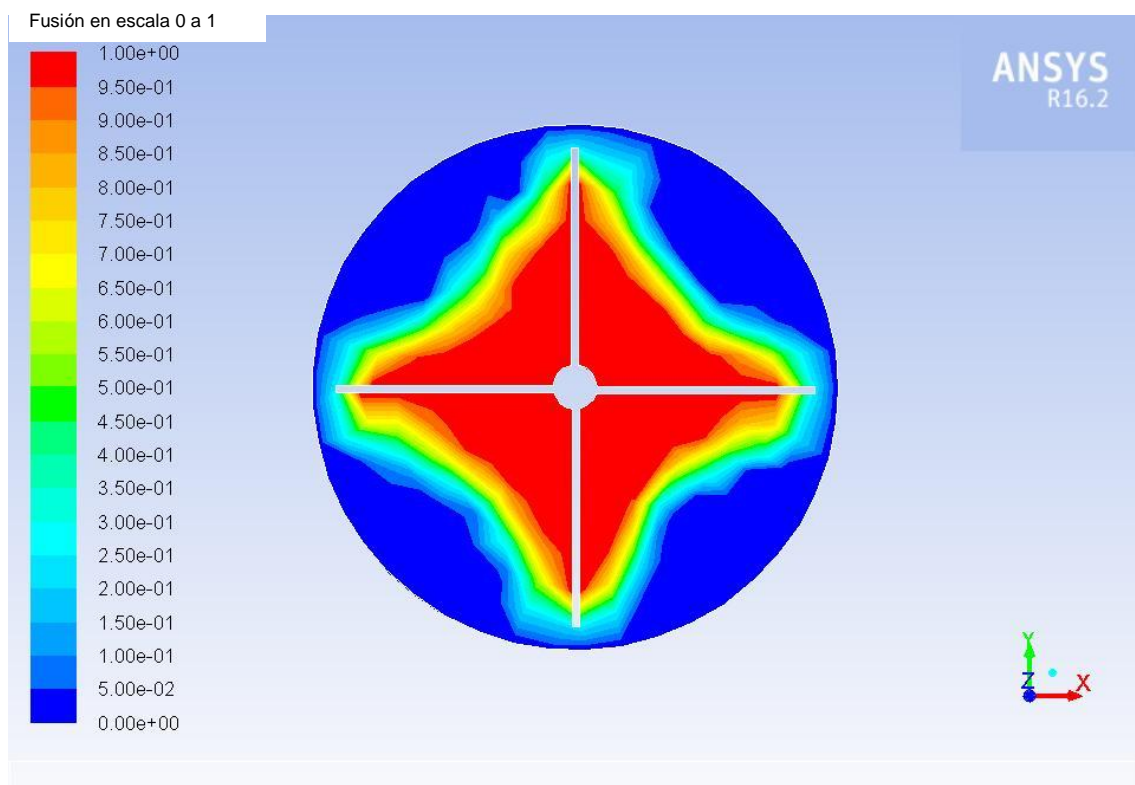


Figura 5.11: Frente de fusión pasadas 3 horas.

Por otro lado, se dejan imágenes de la transferencia de calor.

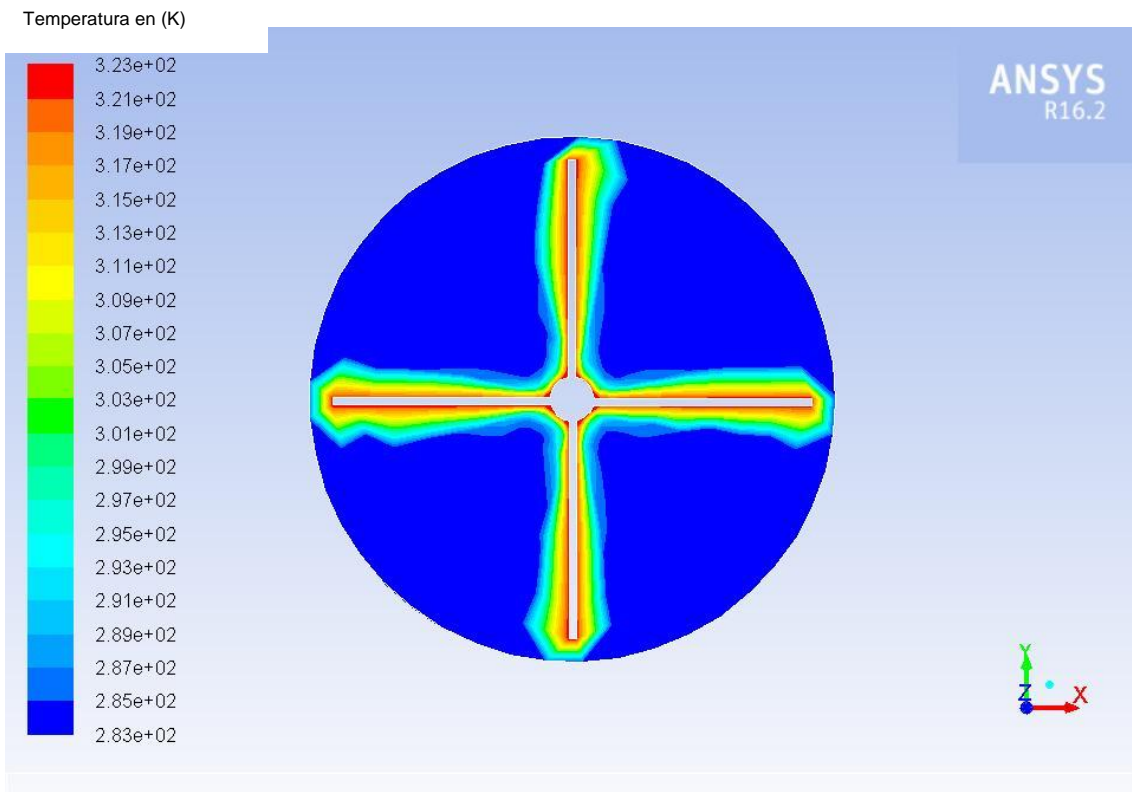


Figura 5.12: Transmisión de calor inicial en el modelo.

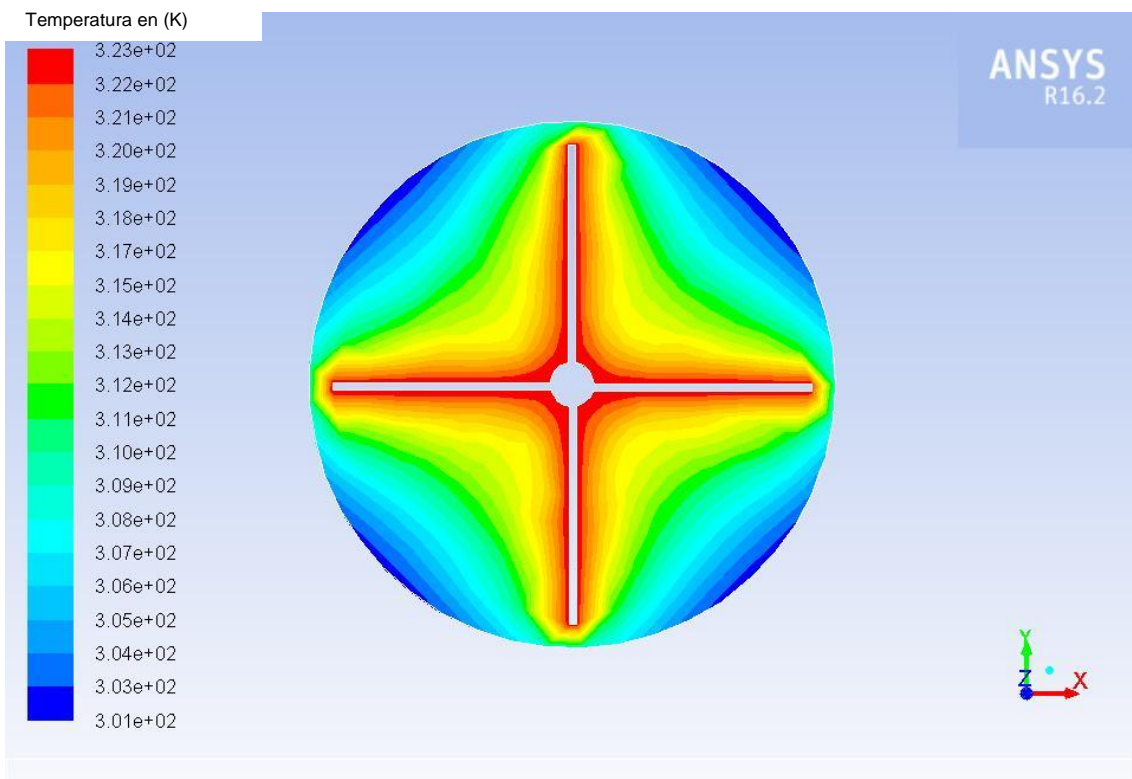


Figura 5.13: Propagación de la transferencia de calor en el modelo.

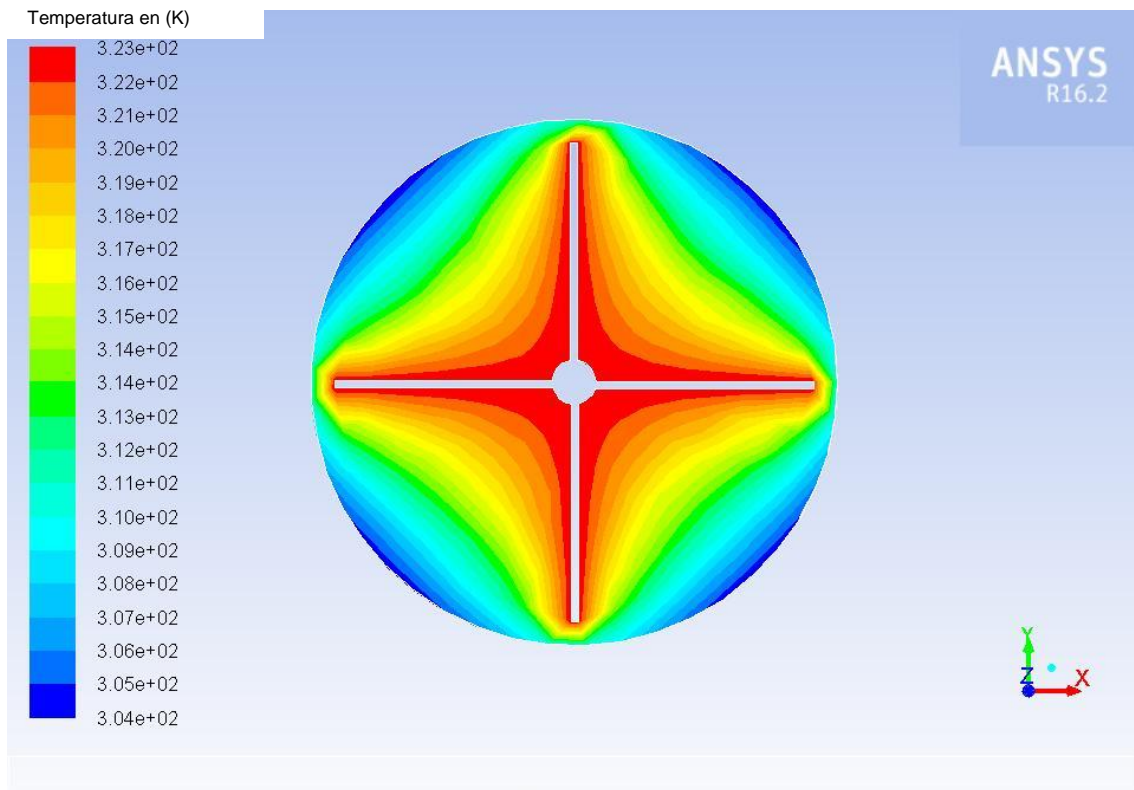


Figura 5.14: Propagación de calor pasadas 3 horas.

#### 5.1.4 Análisis de los datos obtenidos en el modelo en 2D.

Como se ha podido comprobar, el funcionamiento del modelo es sin lugar a dudas correcto según demuestran los datos obtenidos de fusión del PCM y los contornos de la transferencia de calor.

Aun así, como se ha indicado anteriormente en este modelo son inexistentes algunas magnitudes como la velocidad del fluido que fluye por el tubo.

Es por este motivo por lo que se ha procedido a la construcción de un modelo en 3D más completo, modelando el sistema igual que en la realidad con las aletas en contacto con el tubo interior, velocidad del fluido etc.

## 5.2 MODELO EN 3D

En este apartado, al igual que en el anterior, se ha procedido a construir un modelo idéntico al modelo experimental del artículo [57].

Para ello, además de tomar en cuenta todas sus dimensiones, tanto del contenedor del material cambio de fase, como el de las aletas, tubo interior etc. se ha tenido en cuenta que por las aletas no fluye ningún fluido, es decir, que las aletas están en contacto con el tubo interior.

En este modelo, la transferencia de calor se simula separadamente. Por el tubo central fluye agua a 50°C como se ha hecho en el modelo en 2D y las aletas constituidas por cobre están en contacto con el tubo calentador. Al ser un modelo en 3D también se ha incluido la velocidad del agua que circula por el tubo. Esta magnitud es de 1l/min.

Las pérdidas de calor, no se han tenido en cuenta en este caso, ya que el sistema al ser de unas dimensiones muy reducidas, se puede considerar como adiabático. La  $\Delta t$  del HTF también se considera nula debido al corto recorrido que efectúa el fluido.

A continuación, se expone una imagen tomada en el DM para poder presentar la forma que tiene el sistema una vez creado.

El sistema que se va a mostrar, es el que se ha utilizado a la hora de computar el proceso de fusión.

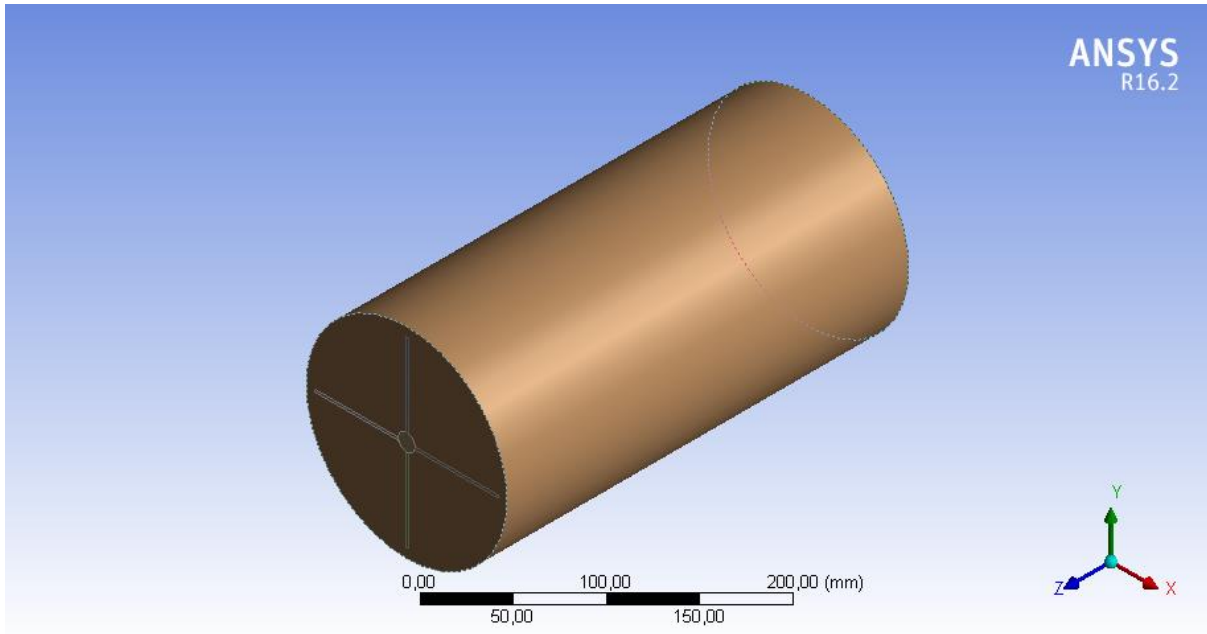


Figura 5.15:Modelo creado con el uso del Design Modeler.

### 5.2.1 Puntos de referencia en el modelo en 3D.

Al igual que se ha hecho en el modelo en 2D, en este apartado, se exponen los puntos donde se han colocado las termo-resistencias. Dichos puntos se describen en el artículo [57].

En este caso, por ser un sistema en 3D cada punto está en el lugar exacto. Aun así, el sistema al ser totalmente homogéneo y simétrico, se espera que los puntos T11 y T12 den resultados muy parecidos a la vez que los puntos T13 y T14.

A continuación, se exponen los puntos de adquisición de datos. Para poder obtener esta imagen, se ha suprimido el volumen donde se encuentra almacenado el material cambio de fase y se ha dejado solamente el tubo interior y las aletas.

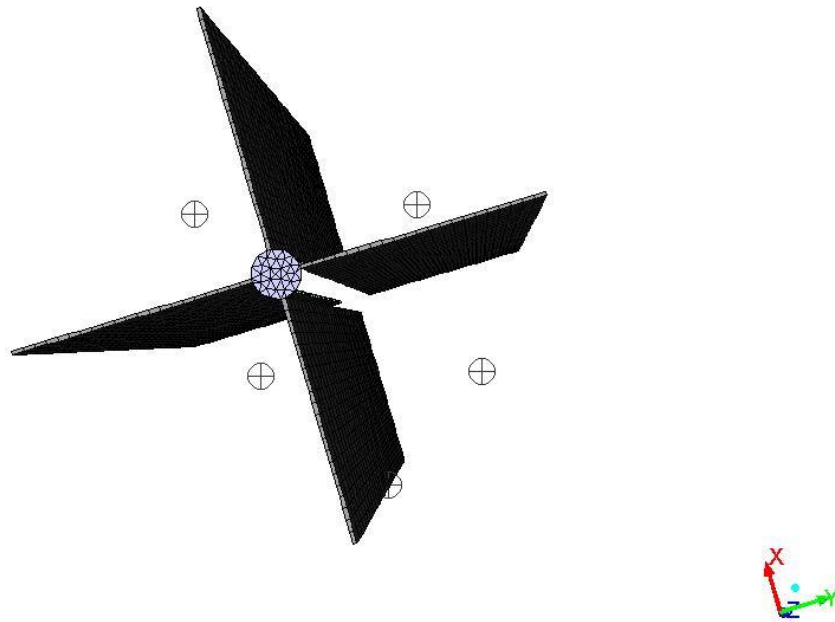


Figura 5.16: Ubicación de los puntos T10, T11, T12, T13 y T14.

Ya que los puntos están debidamente colocados, lo único que hay que hacer es introducir todos los datos que son necesarios para la correcta simulación.

Primero, se habilitan los modelos de energía y de cambio de fase que incorpora el Fluent.

Seguidamente, se introducen las propiedades de los materiales que interactúan en el sistema. En este caso, el tubo interior y las aletas son de cobre, mientras que dentro del contenedor tenemos el "Lauric Acid" cuyas propiedades han sido descritas anteriormente en el modelo 2D en la tabla 1.1.

Una vez establecidos estos parámetros, se introducen distintas magnitudes, tales como, temperatura del HTF, velocidad del HTF etc.

Finalmente, se opta por un modelo de turbulencia como es el k- $\epsilon$  y se deja que Fluent compute automáticamente los efectos de flotación o "buoyancies" que se pueden generar en el sistema a causa de la fusión del sólido. Por otro lado, se establece la temperatura inicial de la simulación y el time-step.

### 5.2.2 Gráficas de temperatura respecto a tiempo en el modelo en 3D.

Los resultados obtenidos en el T10 son los siguientes, en color rojo, tenemos los resultados obtenidos mediante Fluent, mientras que, en azul, tenemos los resultados que se han obtenido en el experimento del artículo. En el eje "y" se muestran las temperaturas en ( $^{\circ}\text{C}$ ) mientras que en el eje "x" se tiene el tiempo en horas.

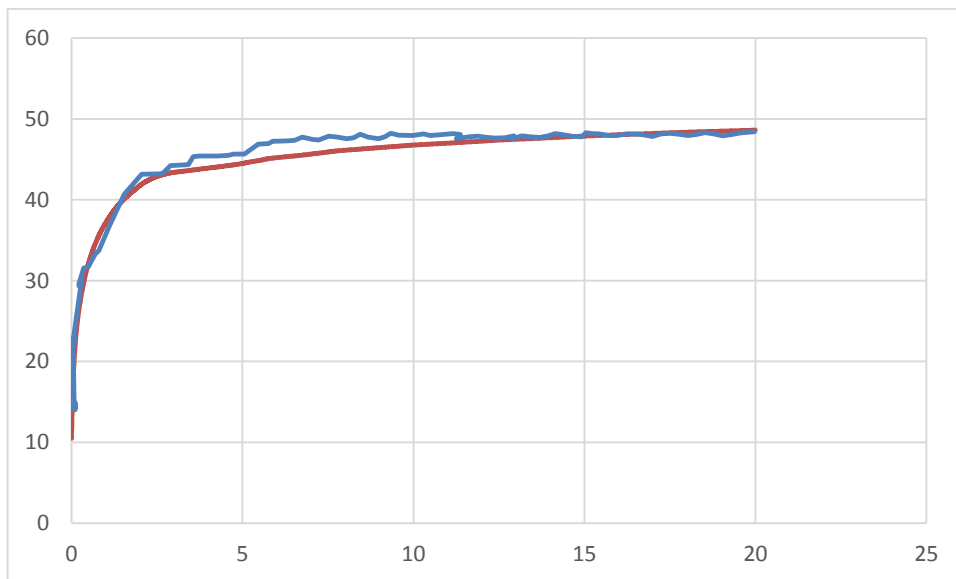


Figura 5.17: Resultados obtenidos en el T10.

Como se puede observar los resultados coinciden mejor que en el modelo en 2D.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los demás puntos. En rojo se mostrarán los resultados obtenidos en la simulación mientras que en azul se mostrarán los resultados obtenidos experimentalmente.



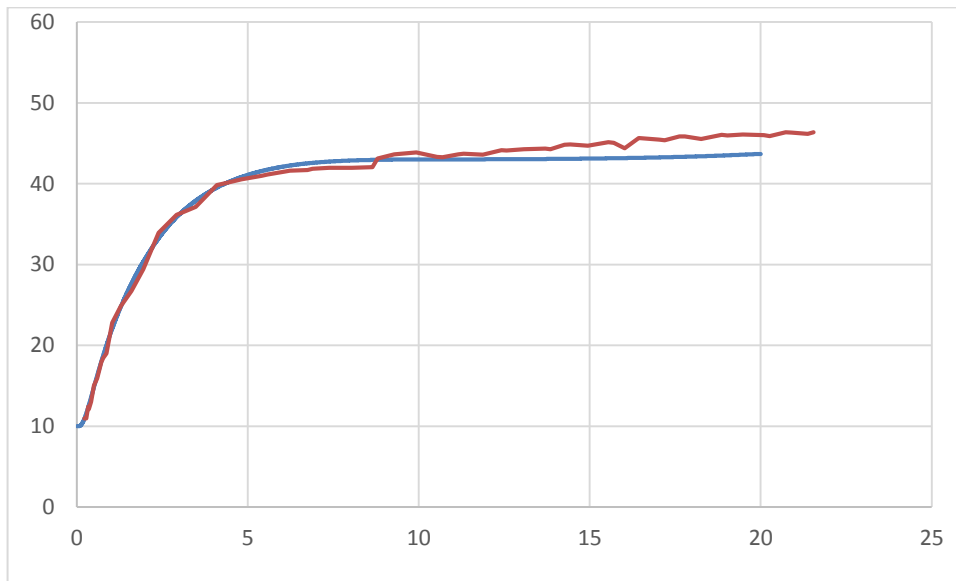


Figura 5.18: Resultados obtenidos en el T11.

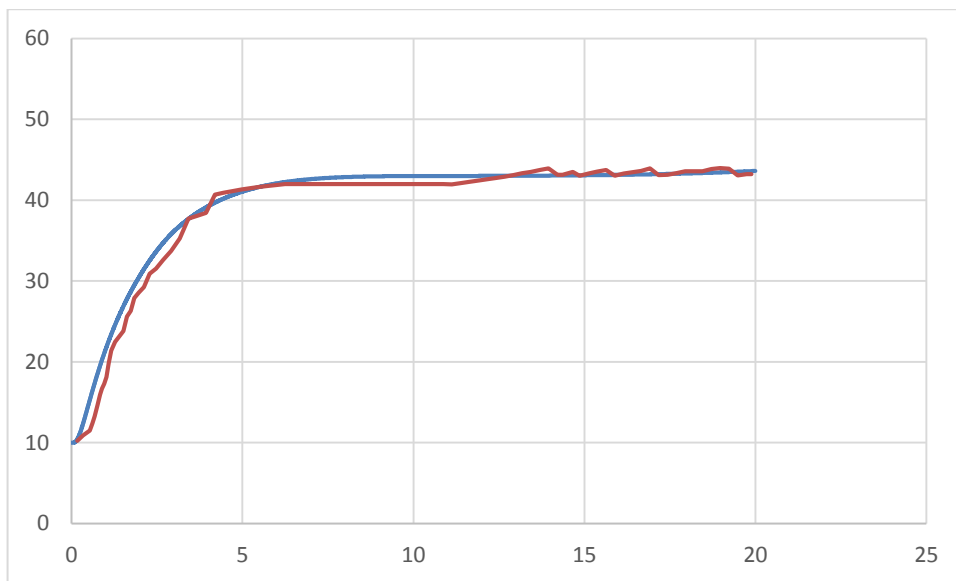


Figura 5.19: Resultados obtenidos en el T12.

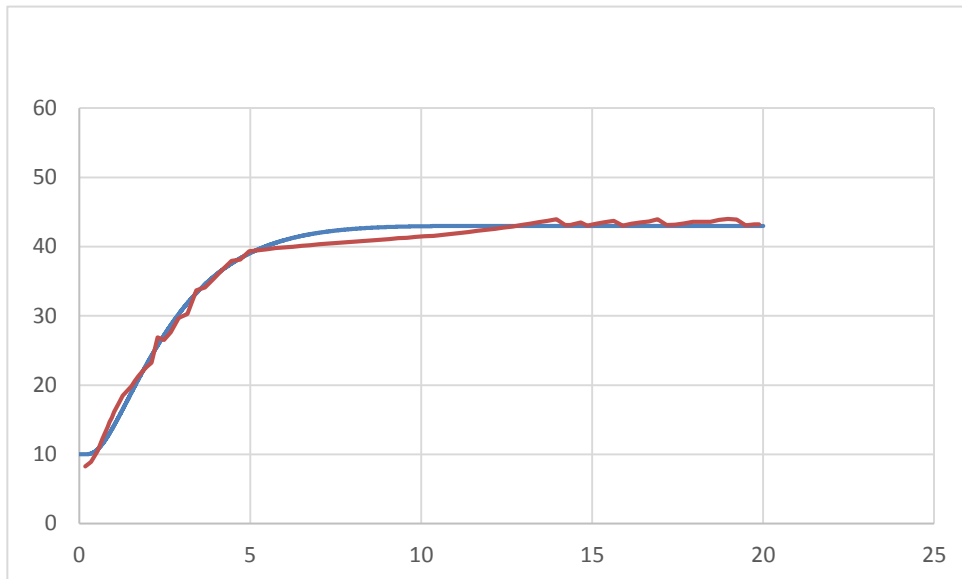


Figura 5.20: Resultados obtenidos en el T13.

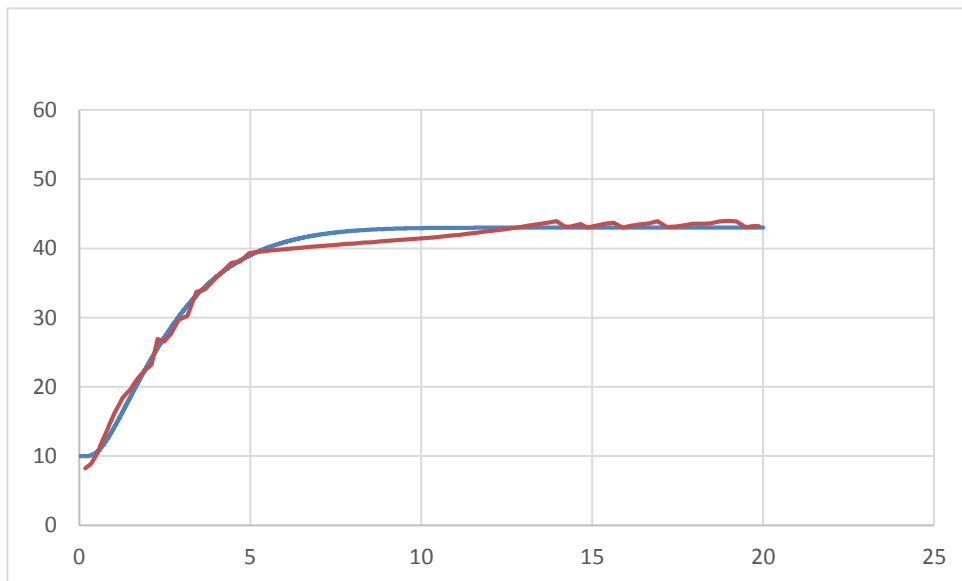


Figura 5.21: Resultados obtenidos en el T14.

Como se puede observar, las gráficas obtenidas en la simulación son totalmente satisfactorias y reflejan muy acertadamente los resultados obtenidos en la experimentación.

### 5.2.3 Contornos del frente de fusión en el modelo en 3D.

Al igual que en el modelo en 2D se reflejarán los frentes de fusión que se van creando a medida que el material cambio de fase se va fusionando. En la escala de 0 a 1 siendo el color azul el sólido y rojo o 1 líquido.

Las siguientes figuras reflejan el correcto funcionamiento del modelo.

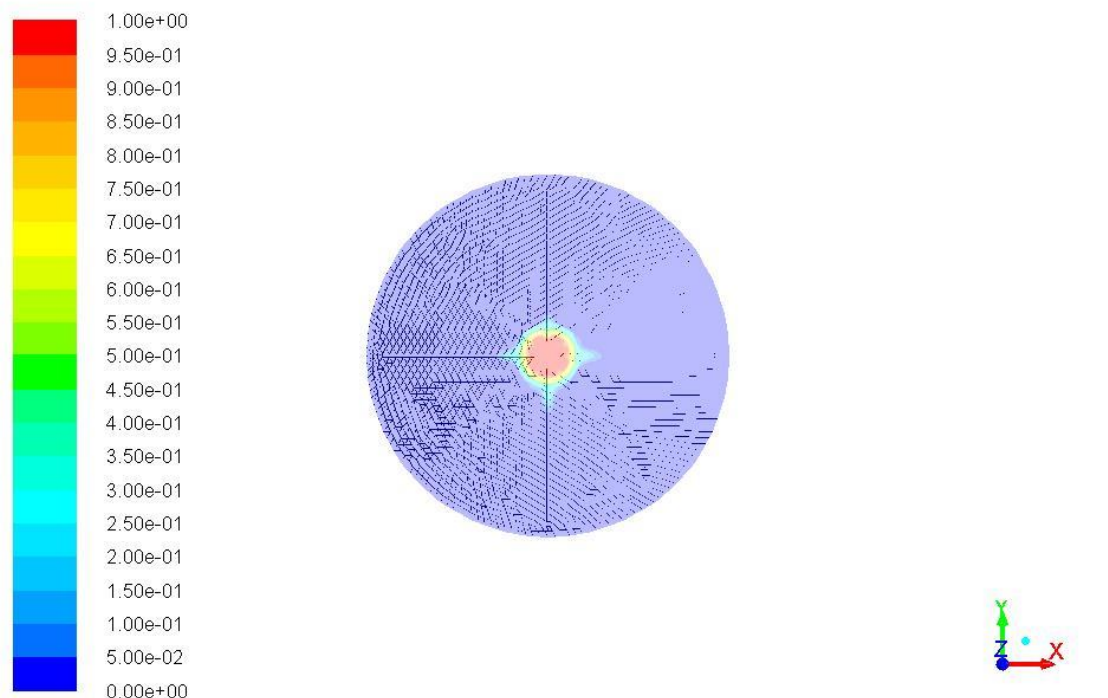


Figura 5.22: Frente de fusión inicial.

Como comentario se puede señalar como ya se ha descrito en el análisis que al inicio se crea un frente de fusión que más adelante será el encargado de que todo el material se vaya fundiendo a medida que avanza el tiempo.

Las aletas por otro lado, extienden la superficie de calor para que el efecto de la conducción sea mayor.

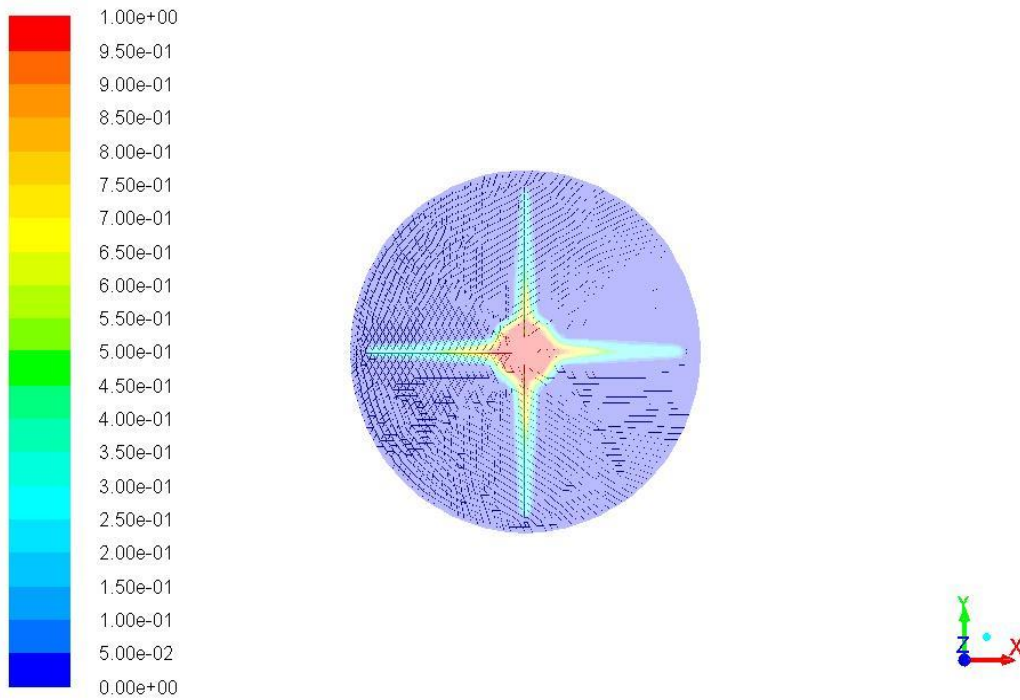


Figura 5.23: Frente de fusión a los 15 minutos.

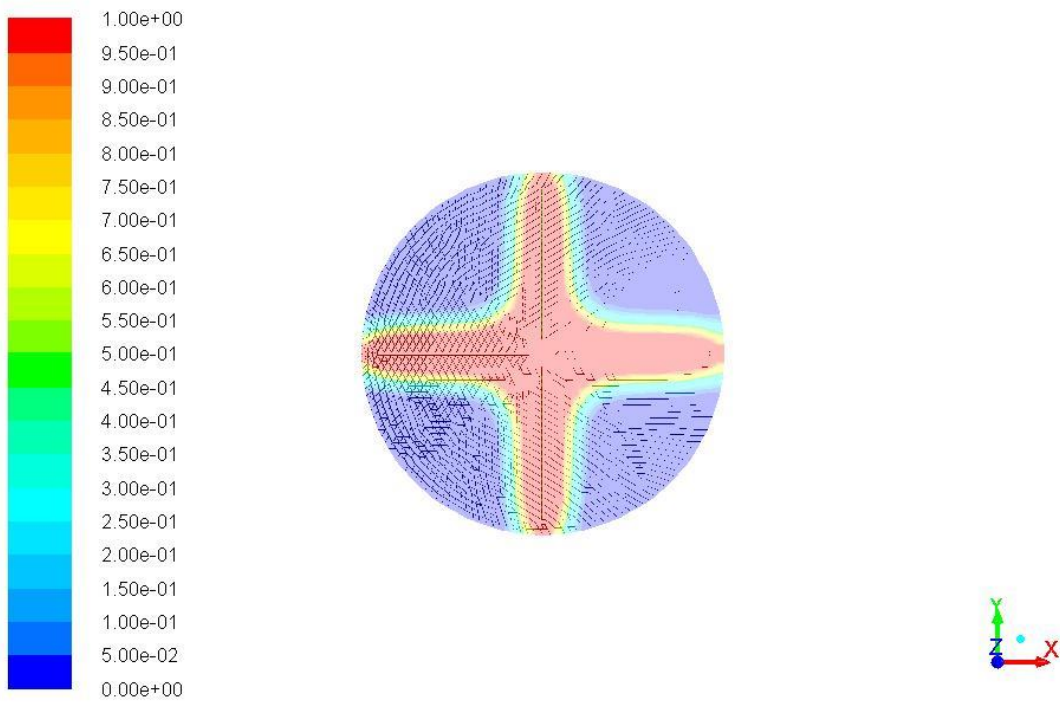


Figura 5.24: Frente de fusión después de 2 horas



Figura 5.25: Frente de fusión después de 4 horas

Por otro lado, se reflejan las imágenes de la transferencia de calor. La escala muestra las temperaturas en Kelvin.

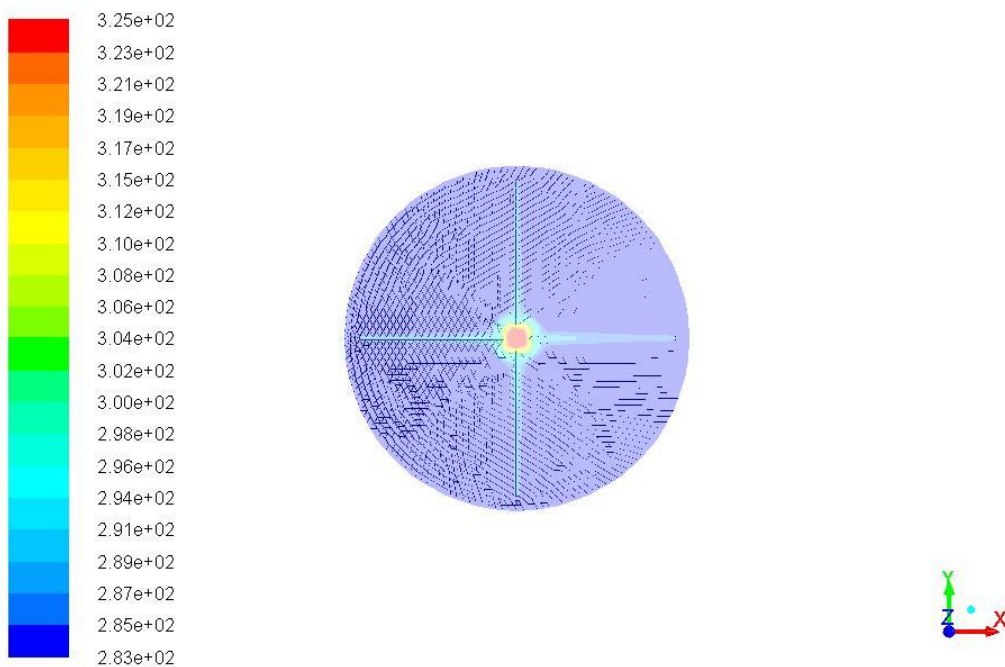


Figura 5.26: transferencia de calor inicial en el modelo.

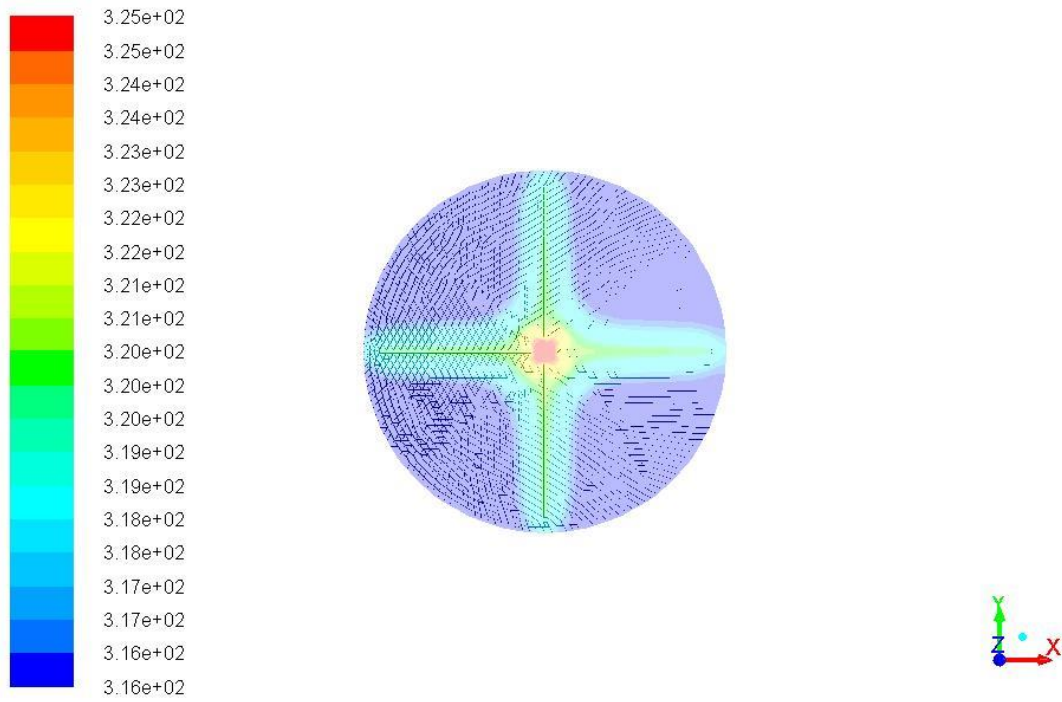


Figura 5.27: transferencia de calor a los 20 minutos.

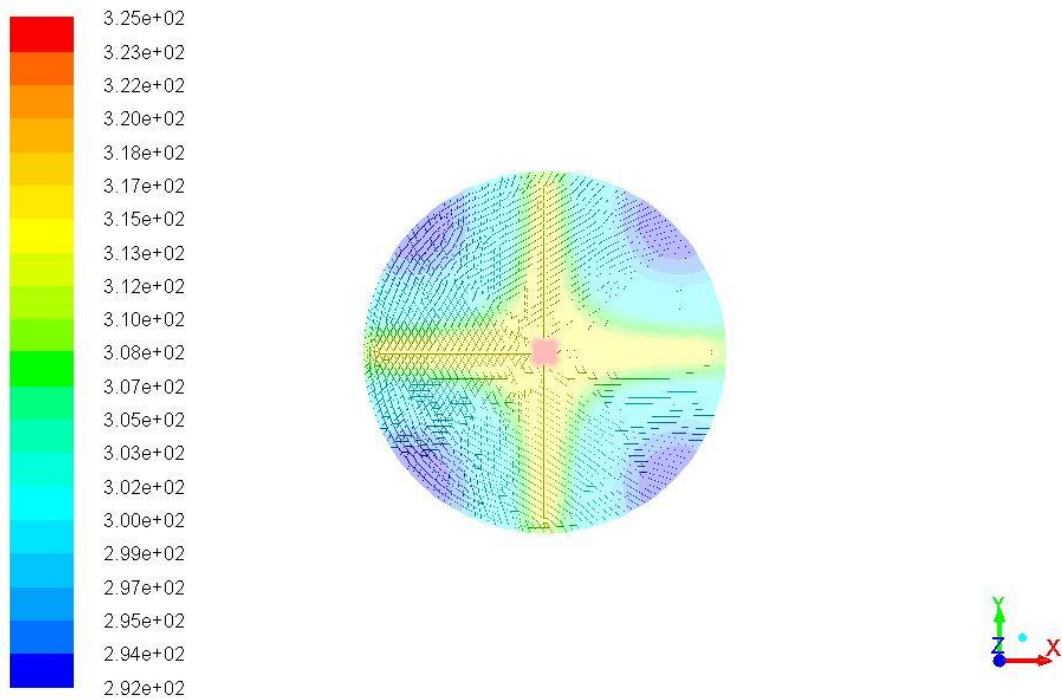


Figura 5.28: transferencia de calor al de 2 horas de simulación

#### **5.2.4 Análisis de los datos obtenidos en el modelo en 3D.**

Como se ha supuesto inicialmente, la creación de un modelo en 3D incluyendo la separación de las aletas y teniendo en cuenta la velocidad del HTF se ha logrado plasmar mucho mejor los datos experimentales.

Analizando las gráficas, se ve que la fusión del material de cambio de fase se efectúa en unas 4 horas aproximadamente. Aun así, como la diferencia de temperaturas entre temperatura de fusión del PCM y temperatura del HTF es mínima es bastante más difícil que los resultados sean iguales.

Por otro lado, como se ha podido ver en diversos artículos, por ejemplo, en el [60] y [61] por el sistema de aletas, la mayor parte de la transferencia de calor se efectúa por conducción. Primero, se crea un frente de fusión como se ha podido observar en las figuras siendo este el encargado de la fusión del resto del PCM. A continuación, ese frente de fusión se va expansionando poco a poco en todo el sistema.

Dado que los resultados han sido exitosos se ha podido validar que el modelo de fusión que utiliza Fluent es el correcto y puede describir de manera muy precisa procesos de fusión que ocurren en la realidad.

Por estos motivos, el modelo de Fluent, como ha permitido llegar a la validación de un experimento real, cumple satisfactoriamente todos los requisitos necesarios para poder diseñar cualquier sistema en el que se tenga un cambio de fase.





## 6.DISEÑO DEL ACUMULADOR-INTERCAMBIADOR

Como se ha descrito al inicio de este proyecto, el acumulador cuyas especificaciones de diseño se van a describir a continuación está pensado para suplir las pérdidas de carga originadas por una nube o cualquier otro fenómeno transitorio que pueda hacer bajar la temperatura de las sales que se utilizan en la central solar con la consecuente bajada en la potencia generada por la turbina.

### 6.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Dados los factores económicos y de facilidad de diseño, se ha optado por crear un acumulador-intercambiador de calor uni-flujo, con el material de cambio de fase en régimen estacionario. En cuanto a la geometría del mismo, se trata de un dispositivo muy simple de carcasa y tubos con los mismos organizados a modo de cuadrado y el volumen exterior a modo de rectángulo simple.

Para poder realizar el diseño, se han hecho una serie de suposiciones basadas en las centrales solares actuales.

Ejemplo de ello es el hecho por el cual se halla seleccionado una turbina de 50Mw, ya que es una de las más utilizadas en este campo. La eficiencia de la turbina por otro lado, se ha supuesto como una estándar con un valor de 0,3.

Por otro lado, dadas las exigencias actuales, el tiempo de operación se ha establecido como 900 segundos. Dado que es un periodo de tiempo relativamente alto para suplir cualquier transitorio. De este modo, se asegura que la potencia del acumulador será suficiente para poder ser utilizada en cualquier central del mundo.

Asumiendo que la pérdida de temperatura de la sal, rara vez se ve afectada por un transitorio más de un 20%, se ha supuesto que el dispositivo pueda suplir una pérdida de temperatura de hasta 200°C desde la temperatura de operación del fluido. El valor máximo de la temperatura alcanzada por la sal, es de 550°C y el mínimo se establece como 290°C ya que es la temperatura de fusión de la sal.

Se puede observar lo adecuado que es la combinación de esta sal con el metal eutéctico, dado que la temperatura de fusión del metal es de 576°C y la temperatura de operación de la sal es de 550°C valores muy próximos entre ellos.

A continuación, se expone una tabla con las propiedades de la sal que se van a utilizar en la metodología de diseño que se ha seguido.

Tabla 6.1: propiedades del HTF Nitrato de sal a 427°C.

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1818.64
Calor específico (J/kg°C)	1516
Viscosidad absoluta (mPa-sec)	1.589
Conductividad térmica (W/m-c)	0.524
Temperatura de fusión (°C)	290

También, se exponen los anteriores parámetros, pero contemplados como función de la temperatura.

$$\text{Densidad: } \rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = 2090 - 0.636 \times T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\text{Calor específico: } C_p \text{ (J/kg-}^\circ\text{C)} = 1443 + 0.172 \times T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\text{Viscosidad absoluta: } \mu \text{ (mPa-sec)} = 22.714 - 0.120 \times T \text{ (}^\circ\text{C)} + 2.281 \times 10^{-4} \times (T \text{ (}^\circ\text{C)})^2 - 1.474 \times 10^{-7} \times (T \text{ (}^\circ\text{C)})^3$$

$$\text{Conductividad térmica: } k \text{ (W/m-}^\circ\text{C)} = 0.443 + 1.9 \times 10^{-4} \times T \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

A su vez, es importante mencionar las propiedades de la aleación que se ha utilizado. En este caso se ha utilizado un metal eutéctico que dada su temperatura de fusión resulta ser muy apropiada para el acumulador de energía.

Tabla 6.2: propiedades del PCM Al-Si12.

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2700
Calor latente (J/kg°C)	560000
Calor específico líquido (J/kg°C)	1741
Calor específico sólido (J/kg°C)	1038
Viscosidad absoluta (mPa-sec)	0.0035
Conductividad térmica líquido (W/m-c)	90
Conductividad térmica sólido (W/m-c)	160
Temperatura de fusión (°C)	576

Por último, en cuanto a valores que se han introducido en la hoja de cálculo que se ha creado, se comentan los parámetros que tienen que ver con la distribución de tubos del acumulador.

El pitch o separación entre los centros de los tubos se ha supuesto con un valor de 0,08. Este valor es un valor de separación muy alto para un dispositivo de carcasa y tubos convencional, pero debido a que se utiliza un metal eutéctico como PCM en este diseño es una separación que es permisible al 100%. Este hecho es debido a que la conductividad térmica de un metal es enorme en comparación con cualquier otra parafina que se pueda utilizar para este propósito. Por otra parte, la utilización de este valor queda plenamente justificada porque la resistencia térmica del PCM se vuelve equivalente a la resistencia térmica de la sal.

El diámetro del tubo se ha supuesto como en cualquier otro intercambiador de calor estándar, es decir de una pulgada o en el Sistema Internacional 0,0254m.

Finalmente se han delimitado el área de transferencia de calor con un valor de 1000m<sup>2</sup> y el número de tubos por fila del acumulador, con un valor de 30.

## 6.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO

En este apartado se expone la teoría que se ha utilizado para poder realizar el cálculo del acumulador intercambiador de calor.

Como se verá a continuación se exponen los medios utilizados en orden de acuerdo a la necesidad de sustituir valores.

El primer paso es calcular el flujo de la sal a través de las tuberías, para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$\Phi_{sal} = \frac{P \left(\frac{1}{\eta}\right)}{c_p (T_{max} - T_{min})} \quad (25)$$

Donde,

*P*: Potencia de la turbina.

*η*: Rendimiento de la turbina.

*C<sub>p</sub>*: Calor específico de la sal.

*T<sub>max</sub>*: Temperatura máxima de la sal.

*T<sub>min</sub>*: Temperatura mínima de operación de la sal.

A continuación, toca calcular la energía total a almacenar de esta manera:

$$E_{total} = \Phi c_p \Delta T t \quad (26)$$

Donde,

$\Delta T$ : Diferencia de temperaturas mínima y máxima de la sal.

t: Tiempo de operación del acumulador.

$C_p$ : Calor específico de la sal.

$\Phi$ : Flujo de la sal calculado anteriormente.

A continuación, se establece la masa de PCM necesaria utilizando el siguiente método:

$$M_{pcm} = \frac{E_{total}}{cl} \quad (27)$$

Donde,

$cl$ : Calor latente del metal eutéctico.

$E_{total}$ : Energía total necesaria.

Una vez se tiene la masa necesaria para el dispositivo, calculamos el volumen total de PCM necesario:

$$V_{pcm} = \frac{M_{pcm}}{\rho} \quad (28)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del PCM.

La potencia requerida por el acumulador se expresa de la siguiente manera:

$$P_{acumulador} = \frac{E_{total}}{t} \quad (29)$$

Donde todos los parámetros son conocidos.

El coeficiente global de transmisión de calor, también denominado como,  $U$ , se calcula mediante el cociente de la temperatura respecto al producto del área de transferencia y la media aritmética del salto de temperatura de diseño de esta manera:

$$U = \frac{P}{Az} \quad (30)$$

Donde,

P: Potencia de la turbina.

A: Área de transferencia de calor.

z: Media aritmética del salto térmico de diseño de 200°C.

El coeficiente de convección de la sal se denota por la letra  $h$  y se puede definir de la siguiente manera:

$$h = \frac{1}{\frac{1}{U} - \frac{1}{K_{pcm}}} \quad (31)$$

Donde,

$U$ : coeficiente global de transmisión de calor.

$K_{pcm}$ : resistencia térmica de PCM.

Llegados a este punto se señala que el valor del  $k_{pcm}$  se ha obtenido así:

$$K_{pcm} = \frac{\text{Distancia PCM tubos}/c_{pcm}}{2} \quad (32)$$

Donde:

*Distancia PCM tubos*: diferencia entre pitch y el diámetro de tubo.

*c<sub>pcm</sub>*: Conductividad térmica del PCM.

Una vez se han establecido los parámetros más básicos de diseño, a continuación, se proceden a calcular los números de Reynolds, el cual se utilizará para determinar la velocidad del fluido que atraviesa los tubos, Prandtl, el cual se utiliza para poder calcular el número de Reynolds y por último el número de Nusselt. Toda esta secuencia se demuestra mediante la utilización de las ecuaciones (33), (34) y (35)

$$Pr = \frac{\mu_{sal} cp}{c_{sal}} \quad (33)$$

Donde,

*μ<sub>sal</sub>*: Es la viscosidad dinámica de la sal.

*cp*: Calor específico de la sal.

*c<sub>sal</sub>*: Conductividad térmica de la sal.

A continuación, se pasa a calcular el número de Reynolds:

$$Re^{0,8} Pr^{1/3} 0,023 = \frac{h Dt}{c_{pcm}} = Nu \quad (34)$$

Donde todos los parámetros han sido expuestos anteriormente excepto:

Re: Número de Reynolds.

Pr: Prandtl.

Dt: Diámetro del tubo.

Nu: Nusselt

Teniendo el número de Reynolds, es muy fácil calcular la velocidad del fluido mediante la siguiente expresión:

$$v = \frac{\mu_{sal} Re}{Dtubo \rho_{sal}} \quad (35)$$

Donde los términos  $L_3$  y  $L_{tubos}$ , corresponden a la anchura del acumulador y la longitud del acumulador dado que la longitud del acumulador es igual a la longitud de los tubos.

A continuación, se detallan los valores que se relacionan directamente con la geometría y la distribución que tendrá el intercambiador de calor. Así se calculan el número de tubos necesario o  $N$ , longitud de tubos o  $L_t$ , volumen total de tubos o  $V_t$ , la suma de los volúmenes de PCM y tubos,  $V_{tot}$ , número de bajadas de tubo o  $N_{baja}$  y finalmente los valores de aspecto, es decir,  $L_3$  o anchura y  $L_2$  o altura del acumulador.

$$\Phi = N v \rho \pi r^2 \quad (36)$$



Donde se puede despejar  $N$ , ya que los demás parámetros son todos conocidos, siendo  $r$  el radio de los tubos.

Sabiendo el número de tubos o  $N$  se define la longitud total o  $L_t$ :

$$Pr = N2\pi r^2 \quad (37)$$

El volumen total de tubos corresponde al siguiente término:

$$V_t = N\pi r^2 L_t \quad (38)$$

Por consiguiente, el volumen total será la suma de los volúmenes de tubos y el volumen de PCM que se ha calculado antes:

$$V_{total} = V_{pcm} + V_{tubos} \quad (39)$$

Para facilitar el diseño, teniendo el número de tubos y habiendo dado un valor de 30 al número de tubos por fila anteriormente, se calcula el número de bajadas de tubo:

$$N_{baja} = \frac{N_{tubos}}{N_{tubos \text{ fila}}} \quad (40)$$

Por último, se calcularán la anchura o  $L_3$  del acumulador, la altura o  $L_2$  y la altura que ocuparán los tubos en toda la superficie del acumulador o  $L_2$ tubos.

$$L_3 = N_{tubos \text{ fila}} \times Pitch \quad (41)$$

$$L2 = \frac{Vtotal}{L3 Ltubos} \quad (42)$$

$$L2tubos = (Número\ filas - 1)Pitch \quad (43)$$

Con el cálculo y posterior verificación de la concordancia entre todos estos valores, se escoge la configuración más adecuada para el acumulador y se procede a su modelado para poder verificarlo con herramienta CFD.

### 6.3 MODELADO DEL DISPOSITIVO

Una vez se han calculado con la anterior metodología los parámetros de diseño para que el dispositivo pueda hacer su función, es decir, suplementar una pérdida de temperatura a una sal fundida de 200°C durante unos 900s, se procede a la construcción geométrica del modelo.

Para este proceso, debido a sus características se ha utilizado el programa que se ha citado anteriormente al comienzo de este informe, el Gambit. Esta herramienta resulta muy útil a la hora de realizar este modelo, ya que acepta fácilmente las distintas operaciones Booleanas que son necesarias para su correcto funcionamiento.

Así, se crea la geometría de acuerdo con los parámetros que se han obtenido a partir de los cálculos realizados implementando la metodología a una hoja Excel. A continuación, se dispone una tabla con los valores que se han obtenido en la hoja de cálculos que son referentes a la geometría del dispositivo.

Tabla 6.3: parámetros de diseño del acumulador.

Número de tubos	606
Número bajadas de tubo	20
Número de filas de tubo	20
Altura distribución tubos (m)	1,54
Anchura del acumulador (m)	2,4
Altura del acumulador (m)	1,64
Profundidad del acumulador (m)	21

Una vez definidos todos estos parámetros se crea un modelo con esas magnitudes.

No obstante, al ser un acumulador de carcasa y tubos cuadrado, los fenómenos termodinámicos que experimentan todos los tubos son iguales, por lo que el estudio se centra en la parte central del aparato. A continuación, se muestran imágenes del modelo que se someterá al estudio justo después de haberlo creado con Gambit.

En él se muestran los tubos que permiten la entrada del fluido que en este caso es la sal fundida que se ha escogido por sus propiedades, la carcasa donde se encuentra la aleación metálica necesaria para el almacenamiento y aprovechamiento de la energía térmica y las salidas para la utilización del fluido una vez recalentado a la temperatura de operación.

El dispositivo que se muestra a continuación, es el sometido a las pruebas mediante el software de CFD.

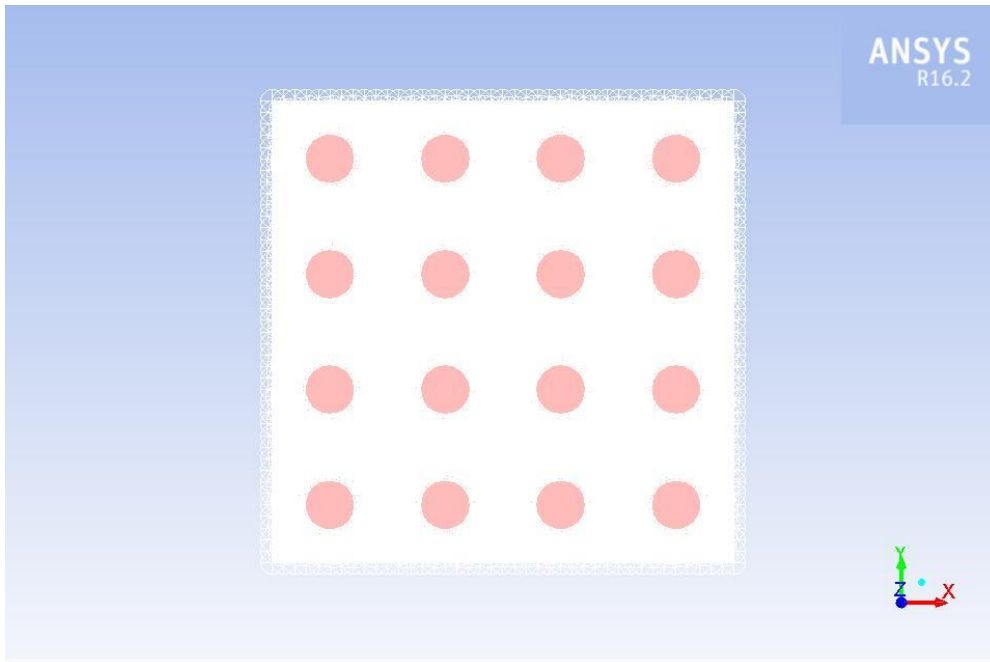


Figura 6.1: Modelo de simulación de frente.

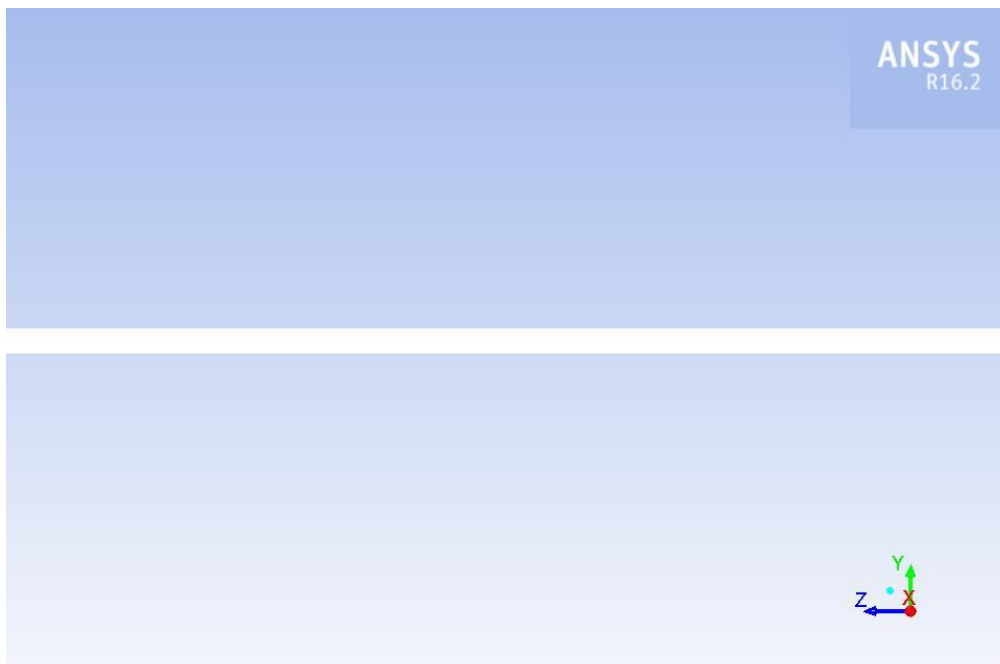


Figura 6.2: Modelo de simulación vista de perfil.

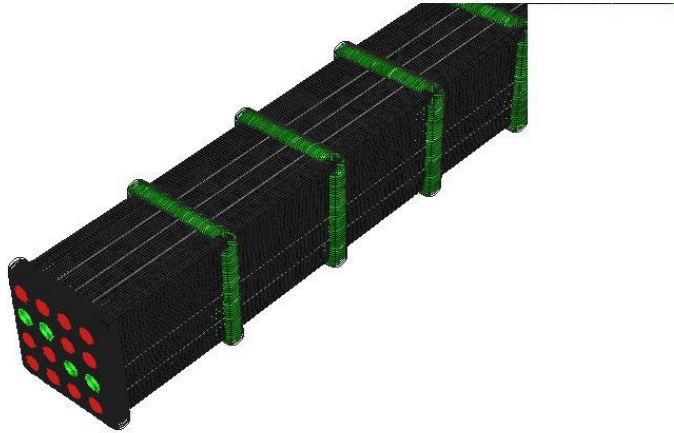


Figura 6.3: Modelo de simulación en 3D.

Una vez creado el modelo geométrico y tras haber extraído con operaciones Booleanas las distintas partes que incluye esta geometría, (carcasa y tubos) se han ido definiendo con el mismo programa Gambit las entradas de los tubos, las salidas de los tubos, la tapa anterior de la carcasa, la tapa posterior de la carcasa, la tapa superior de la carcasa y la tapa inferior de la carcasa.

Una vez definidas las anteriores superficies, se ha ido creando el mallado de cada una de las caras de las distintas partes y se ha extruido ese mallado a lo largo de todo el volumen del intercambiador. En este caso se ha optado por una malla muy fina para evitar posibles errores que se puedan generar a causa de una malla demasiado gruesa.

Por último, cabe destacar, que el modelo que se ha creado, está compuesto por una estructura de acero y para que el caso sea más real todavía a las paredes se les ha asignado un grosor de 2mm a la hora de realizar la configuración para la obtención de resultados.

## 6.4 CONFIGURACIÓN DEL CASO

El siguiente paso después de haber creado el modelo mediante Gambit, es lanzarlo al programa Fluent. Para ello se ha utilizado ésta configuración en el iniciador o ``Launcher`` del programa.

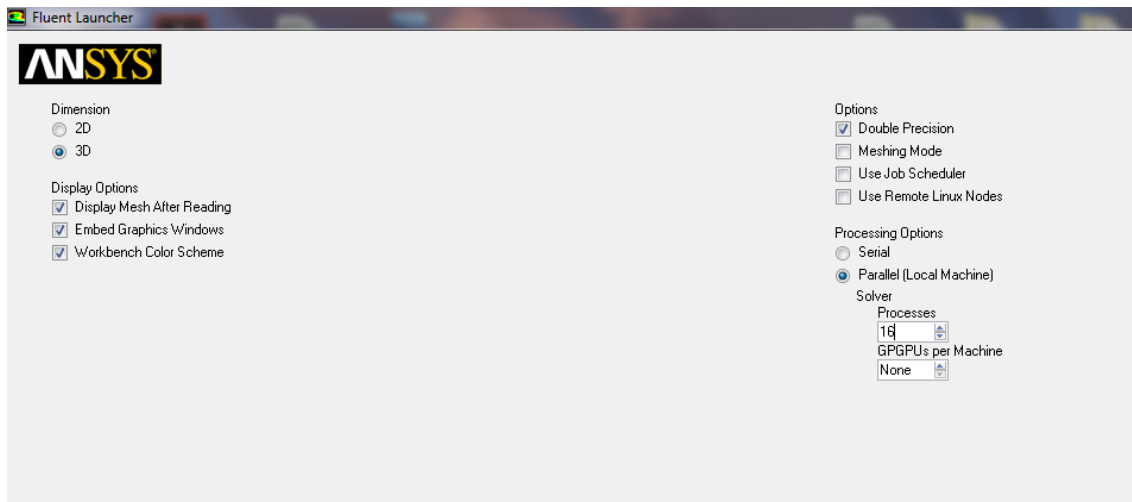


Figura 6.4: Launcher o inicio del programa.

Como se observa, se ha seleccionado el modelo en 3D, ya que corresponde al modelo que hemos creado. Por otra parte, se ha activado la doble precisión para mejorar la calidad de los resultados y finalmente, aprovechando la potencia de cálculo del ordenador se ha elegido correr el caso en paralelo y utilizando todos los procesadores de la computadora.

En la ventana general del programa, se ha seleccionado el método de solución basado en la presión, con velocidad absoluta. Después se ha especificado que el caso tiene que correr en un margen de tiempo, es decir, que es transitorio y se ha establecido la aceleración gravitacional en el sistema.

Como se mencionó anteriormente en el trabajo, en el apartado del objetivo, este modelo busca aprovechar el calor almacenado mediante la fusión de un material, que en este caso resulta ser un metal eutéctico. Así, se activan las ecuaciones de

energía y de fusión-solidificación, ya que en cuanto el PCM o Material Cambio de Fase vaya perdiendo temperatura, se irá solidificando.

A continuación, se ha seleccionado el modelo de turbulencia ``k-épsilon realizable`` con el ``Enhanced Wall Treatment`` activado para que los fenómenos que ocurren en las paredes sean más precisos.

En cuanto a los materiales que se han utilizado en el caso, al no estar en la base de datos del programa, se ha procedido a introducir manualmente las propiedades que se han expuesto anteriormente en este mismo trabajo. Estos valores obviamente corresponden a las propiedades de la aleación que se ha utilizado y a la sal fundida.

Una vez se han definido los materiales, se procede a especificar qué zona le corresponde a cada material. Así, se ha colocado el PCM en el interior de la carcasa y la sal fundida circulando dentro de los tubos. En este apartado se aprovecha para dar los valores finales obtenidos en la hoja de cálculo que corresponden a los materiales presentes en el sistema. Los valores se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla 6.4: Parámetros correspondientes a los materiales.

Caudal de la sal (kg/s)	422,84
Velocidad de flujo de la sal (m/s)	0.781
Temperatura estacionaria del PCM (°C)	576
Masa de PCM necesaria (kg)	206043,956
Volumen de PCM (m <sup>3</sup> )	76,3125
Resistencia térmica PCM	0,000305556
Resistencia convección de la sal	0,00041585

Estos valores, se han utilizado en las condiciones de los límites de las geometrías, así la sal se ha puesto circulando con esa velocidad.

Otro dato no menos importante, es que se ha utilizado el acero como material que conforma la estructura del acumulador y los tubos interiores. El grosor del acero que componen las paredes de los tubos por otro lado, tal y como se ha comentado antes es de 2mm. Este parámetro se ha añadido en las condiciones de los límites para mayor precisión al cálculo del caso.

En los métodos de solución, se ha utilizado el método SIMPLE, por ser el más adecuado y el más utilizado en este tipo de problemas en los que interactúan un fluido estacionario y un fluido en movimiento. Por lo demás, se ha decidido establecer el método de resolución de segundo orden para que la convergencia del caso sea más precisa.

Una vez establecidos todos estos parámetros, se han creado los siguientes monitores para el análisis del caso:

- Monitor de temperatura de salida del tubo 6.
- Monitor de temperatura en la superficie de entrada y salida de los tubos.
- Monitores de fusión-solidificación en la superficie longitudinal, radial, superior, inferior y a la mitad del acumulador
- Monitor de presión a la entrada y salida de los tubos.

Como todos los parámetros ya han sido establecidos, únicamente, queda programar las condiciones de inicio del caso. Así se ha establecido que la temperatura de entrada de la sal es de 200°C menos que la temperatura de operación.



Por otra parte, se ha añadido la temperatura inicial del PCM, que es correspondiente a la temperatura de 576°C en la cual el material se encuentra fundido en su totalidad.

Por último, se resalta que el time step seleccionado ha sido de 10 segundos, para que no intervenga en la convergencia de los parámetros. Los datos de los monitores se irán recogiendo cada time step para disponer de toda la información posible cuando se obtengan los resultados. En el siguiente apartado, se reflejan los resultados que se han obtenido mediante esta configuración.



## 7.RESULTADOS OBTENIDOS

Como se ha comentado en el anterior apartado, con la configuración descrita y con la geometría creada se ha procedido al cálculo de los distintos parámetros necesarios para evaluar el acumulador-intercambiador de energía térmica.

A continuación, se exponen los distintos valores, gráficas e imágenes tomadas en el proceso de descarga del dispositivo.

Así, se comenzará por dar primero las gráficas, de temperaturas de entrada del tubo para dar posteriormente se pasará a dar la temperatura a la salida del tubo.

A su vez, se darán los valores de la presión a la entrada y salida del tubo, lo que permitirá calcular las pérdidas de carga originadas y el coste del bombeo.

Finalmente, se expondrán los distintos contornos que se han ido recogiendo a lo largo de toda la simulación en distintos puntos del sistema.

### 7.1 GRÁFICAS OBTENIDAS

Las gráficas obtenidas, se catalogarán en los siguientes apartados de acuerdo con su correspondiente título.

#### 7.1.1 Temperatura de entrada y salida del tubo número 6.

Como bien se puede observar, y como es lógico, la temperatura de entrada se ha mantenido constante en todo el proceso de calentamiento del fluido. Como ejemplo, se puede observar la gráfica que se muestra, en la que se ve la total linealidad de la temperatura de entrada respecto al tiempo.

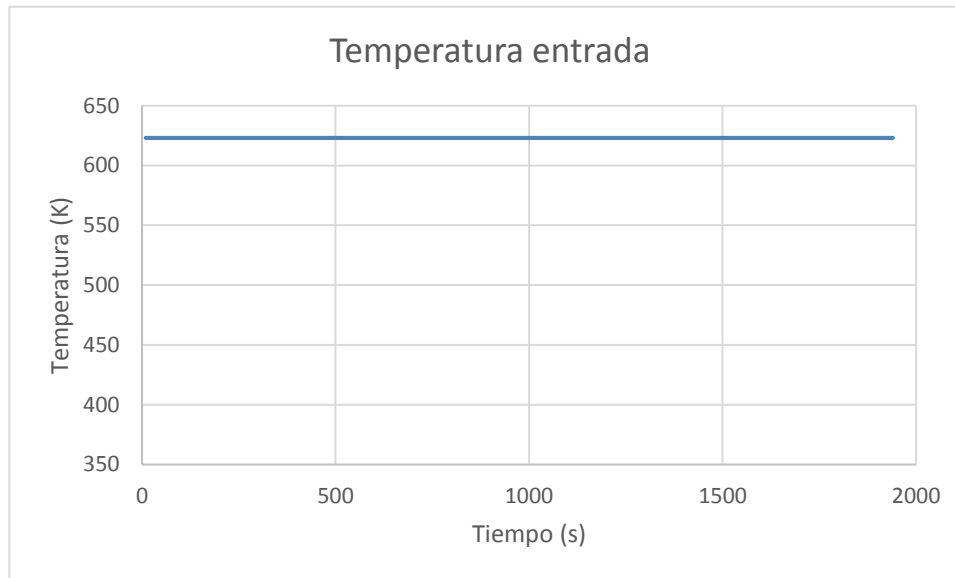


Figura 7.1: Temperatura de entrada.

Esta no es una gráfica tan importante como la de la temperatura de salida, que es la gráfica más relevante seguramente en el estudio del caso, ya que enseña la tendencia que muestra la sal fundida a la salida de un tubo escogido al azar.

Como se aprecia bien en la gráfica, la sal fundida alcanza su temperatura de operación ( $550^{\circ}\text{C}$ ) casi al instante después de haberlo hecho circular por el acumulador-intercambiador de energía térmica.

Se ha comentado más de una vez que este dispositivo busca suplementar una pérdida de temperatura de hasta  $200^{\circ}\text{C}$  durante un periodo de 900 segundos. Como se ha observado en la anterior gráfica en la temperatura de entrada de la sal, se ha bajado la temperatura  $200^{\circ}\text{C}$  por debajo de la temperatura de operación, a la salida se puede ver que esa pérdida se suplementa a la perfección con la utilización del dispositivo.

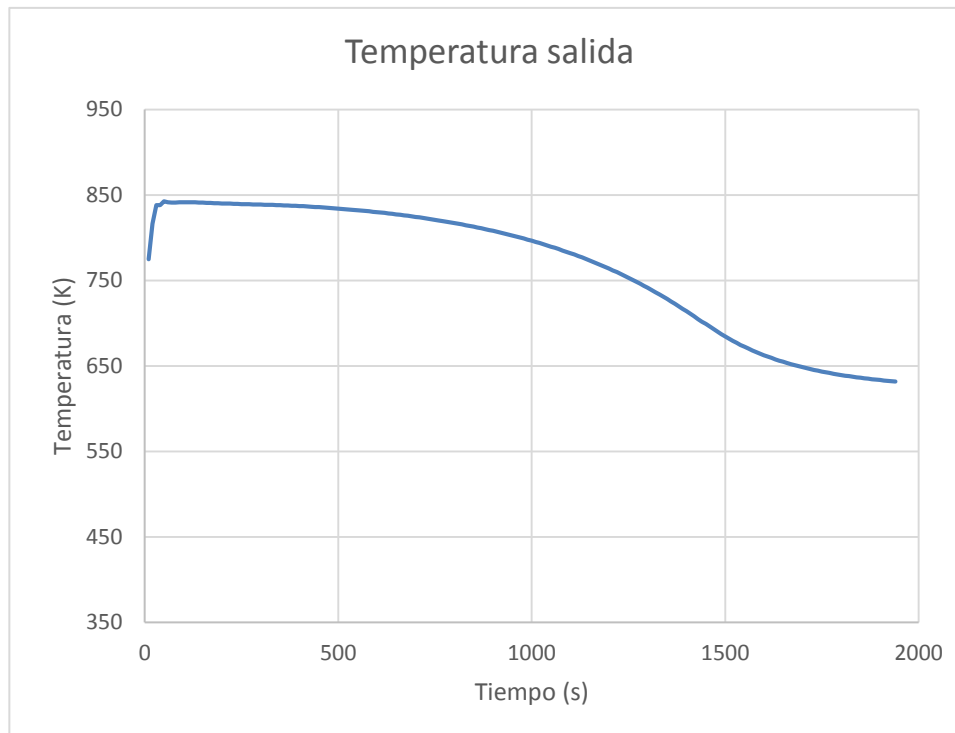


Figura 7.2: Temperatura de salida de la sal a la salida del dispositivo.

En ésta gráfica es muy importante señalar un par de cosas. Una es cómo se mantiene una temperatura de salida constante durante un periodo de tiempo de unos 900 segundos. A partir de ese periodo, la temperatura va ligeramente descendiendo y este descenso se hace cada vez más drástico a medida que el PCM se va solidificando.

Este descenso se va acentuando hasta que la temperatura de salida llega a ser la misma que la temperatura de entrada. A partir de este momento, todo el metal fundido que se tenía en el interior del intercambiador ha sido solidificado y por ello, se puede decir que se ha consumido toda la energía térmica que se tenía almacenada dentro.

### 7.1.2 Presión de entrada y salida del tubo número 6.

A continuación, se tienen las presiones de entrada y presión de salida del fluido. Estos datos reflejan la variación de presión que ha sufrido el fluido a la entrada y a la salida del tubo. El pico inicial en la presión de entrada es sólo muestra de que el caso no ha empezado a converger desde el principio por lo que el valor a tener en cuenta es el de 150000 Pa o bien 1.5 bar lo cual es un valor muy asumible para las bombas que se utilizan en la actualidad.

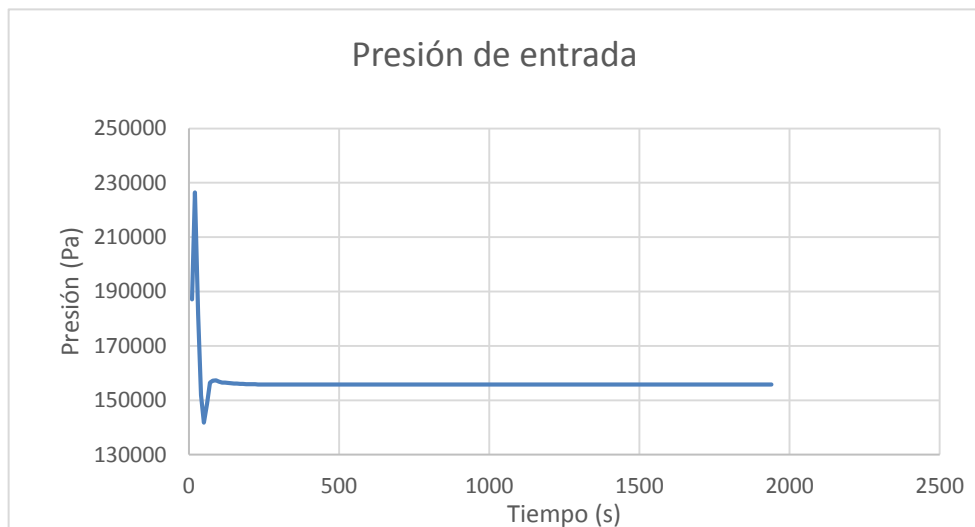


Figura 7.3: Presión de entrada.

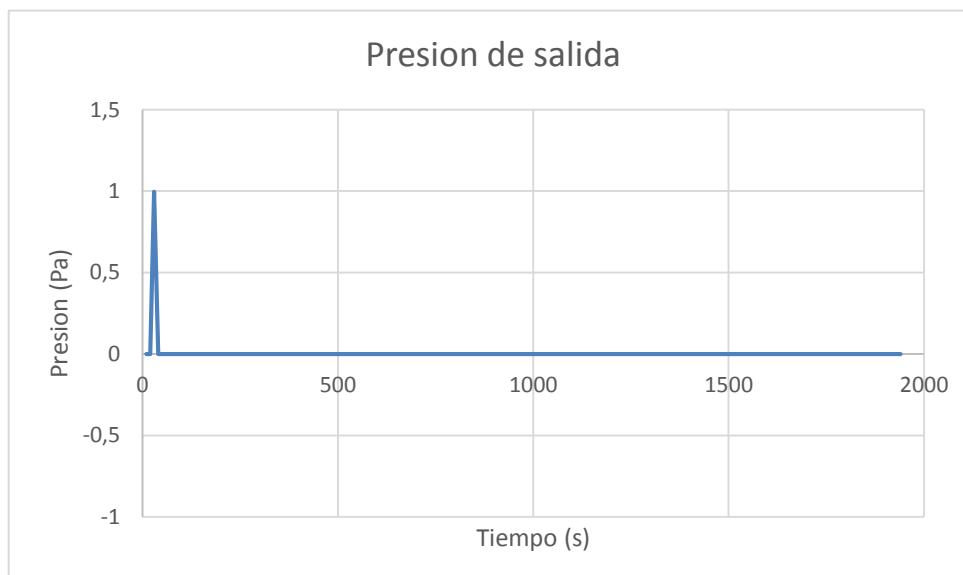


Figura 7.4: Presión de salida.

## 7.2 CONTORNOS DE TEMPERATURA

Una vez se han mostrado las gráficas y se ha observado que, en efecto, el sistema cumple su misión a la perfección, se pasa a verificar mediante los distintos contornos de transferencia de temperatura y variación en la fusión-solidificación que se han tenido en el sistema.

Para este estudio, se han dispuesto distintos monitores, uno en sentido longitudinal y otro en sentido radial en la parte inferior, media y superior del sistema.

A continuación, se muestran los contornos de temperatura que se han obtenido durante toda la simulación. Los contornos en sentido longitudinal, muestran el dispositivo puesto de perfil, pero en sentido diagonal. Esto se hace simplemente para que el modelo pueda entrar en la ventana del monitor.

### 7.2.1 Contornos sentido longitudinal inferior.

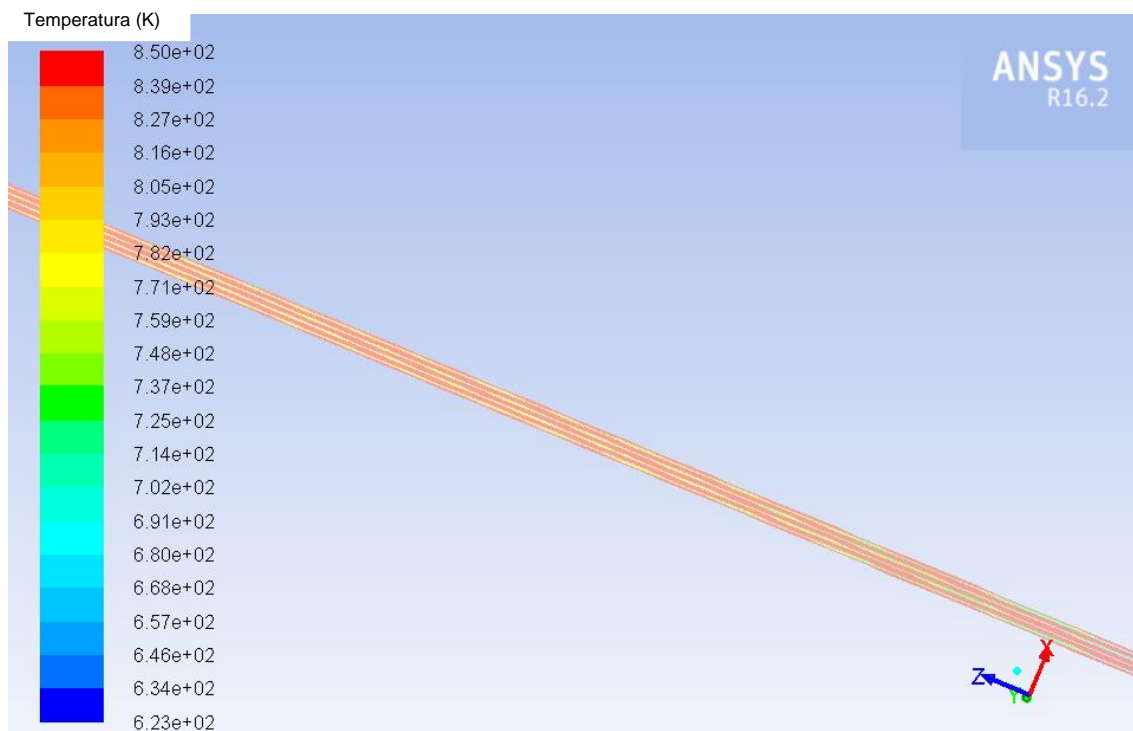


Figura 7.5: Contornos de temperatura sentido longitudinal inferior 20s.

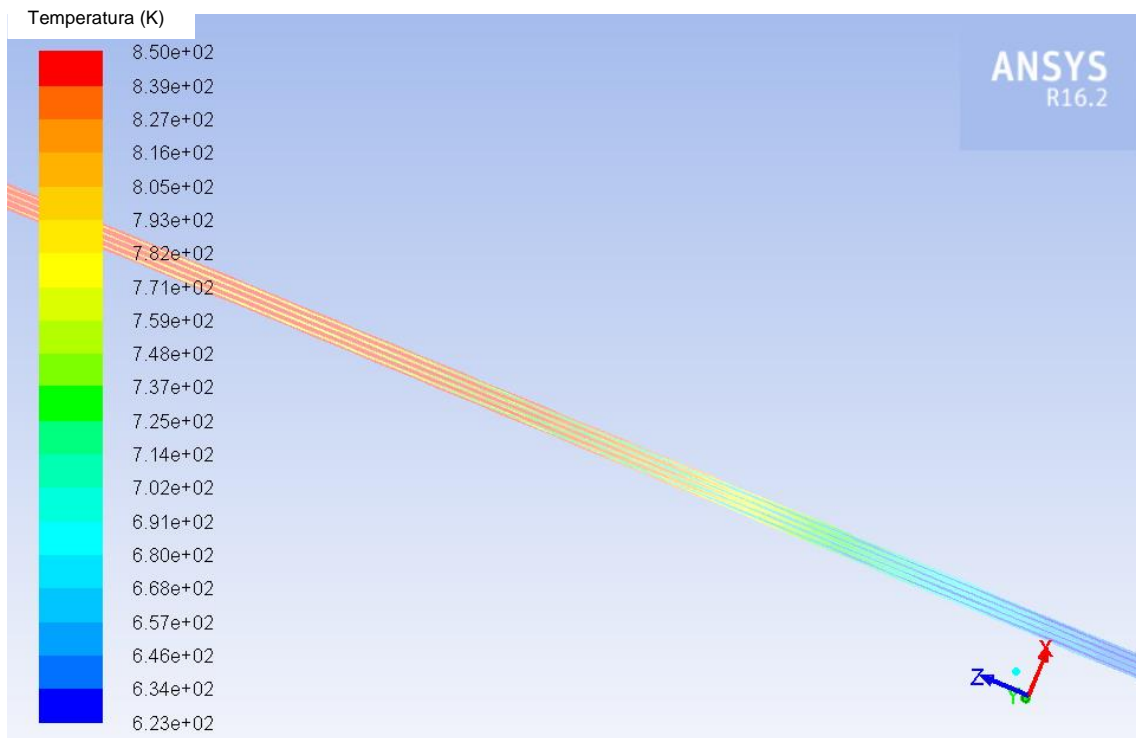


Figura 7.6: Contornos de temperatura sentido longitudinal pasados 780s.

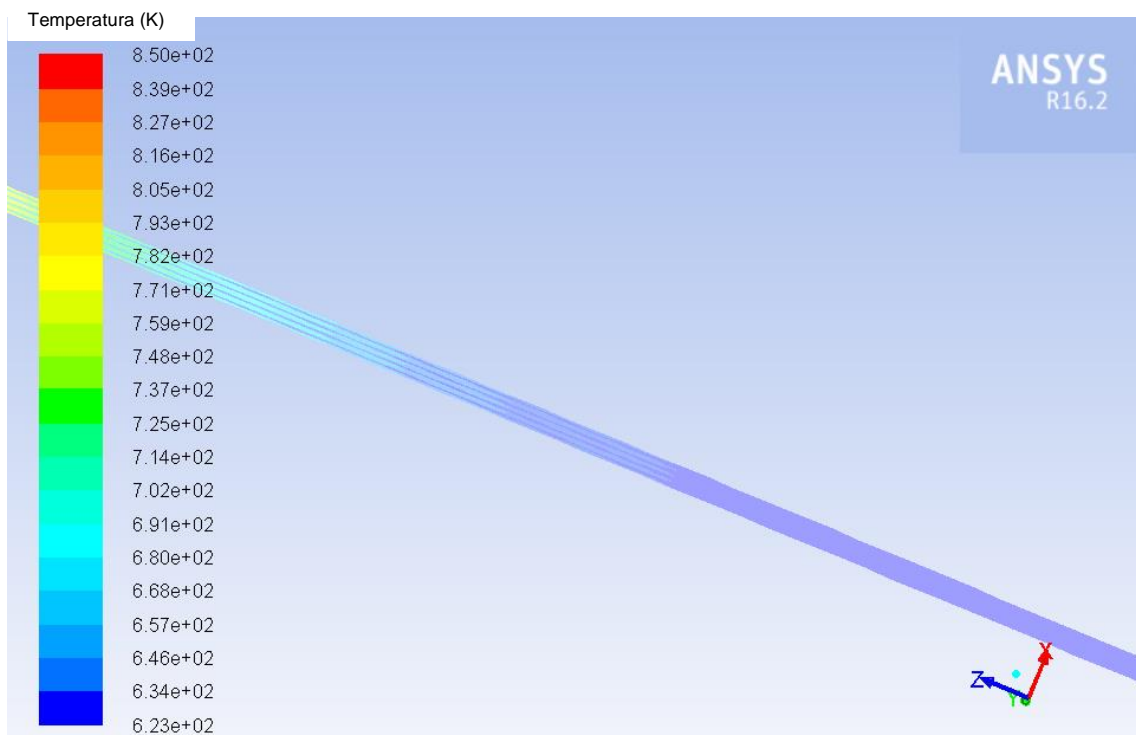


Figura 7.7: Contornos de temperatura sentido longitudinal pasados 1330 segundos.



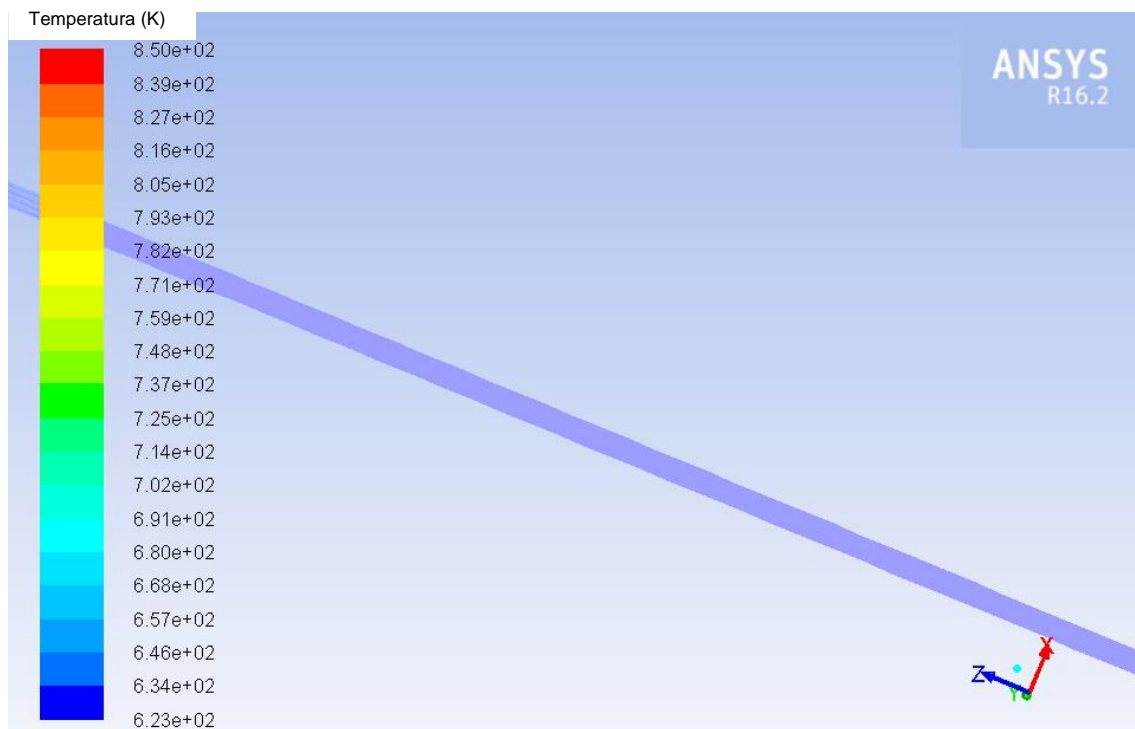


Figura 7.8: Contornos de temperatura sentido longitudinal final de la descarga.

Una vez mostrados los contornos en el sentido longitudinal inferior, se muestran los contornos obtenidos en el sentido longitudinal medio del sistema. El sentido longitudinal inferior es la parte que se encuentra apoyada en el suelo si se tumba el dispositivo, la media la que se vería de perfil y la superior la que se vería desde arriba.

La razón por la que se exponen los contornos desde tan variadas perspectivas, es simplemente que, por acción de la gravedad u otro fenómeno, por hallarse el sistema colocado de forma horizontal o vertical puede haber variaciones en el modo de solidificación de las partículas que componen el metal eutéctico.

Por este hecho, en este tipo de estudios es necesario tener una vista completa de todo el objeto a analizar, así como todos sus parámetros y detalles.

Los fenómenos que se verán representados a continuación, o mejor dicho los adquiridos mediante la simulación, son totalmente simétricos con la sección longitu-

dinal inferior. Se podría decir lo mismo sobre la visión superior del sistema, ya que el sistema mostraría los mismos contornos si se tuviese un monitor fijado en esa sección.

Aun así, por motivos de diseño se ha optado por no incluir la vista superior del sistema, ya que el análisis del sistema medio y el inferior dan suficiente información sobre la distribución de temperatura y solidificación del sistema. Esto sucede por la homogeneidad del sistema.

Es por esto, que visualizando los propios contornos, se puede tener clara idea de las diferencias que supondría la utilización de un material menos noble que un metal para el sistema.

De nuevo, se repite, que a continuación, se muestran los contornos de temperatura que se han obtenido durante toda la simulación.

Los contornos en sentido longitudinal, muestran el dispositivo puesto de perfil, pero en sentido diagonal. Esto se hace simplemente para que el modelo pueda entrar en la ventana del monitor.

También se resalta una vez más, que todos los contornos corresponden a una sección central del intercambiador-almacenador completo, ya que sus dimensiones son demasiado grandes para ser simuladas en su totalidad.

Esto no constituye ningún problema por la homogeneidad que tiene el sistema.

### 7.2.2 Contornos de temperatura sentido longitudinal medio.

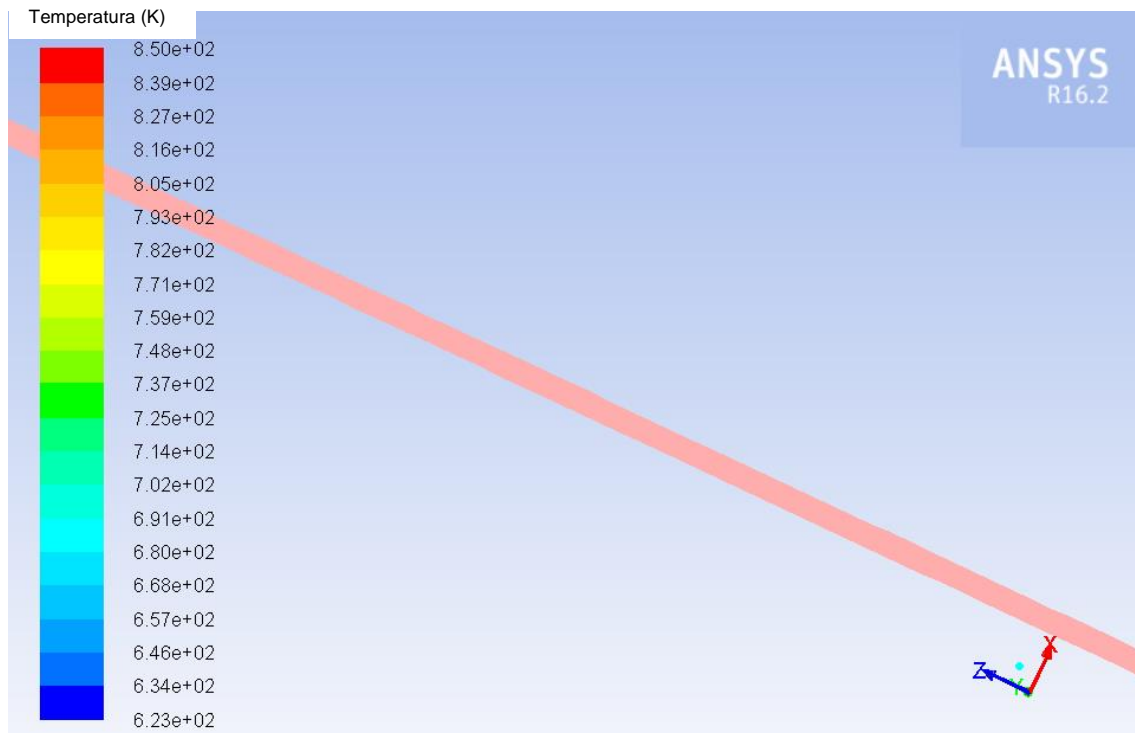


Figura 7.9: Contornos de temperatura sentido longitudinal medio todo líquido.

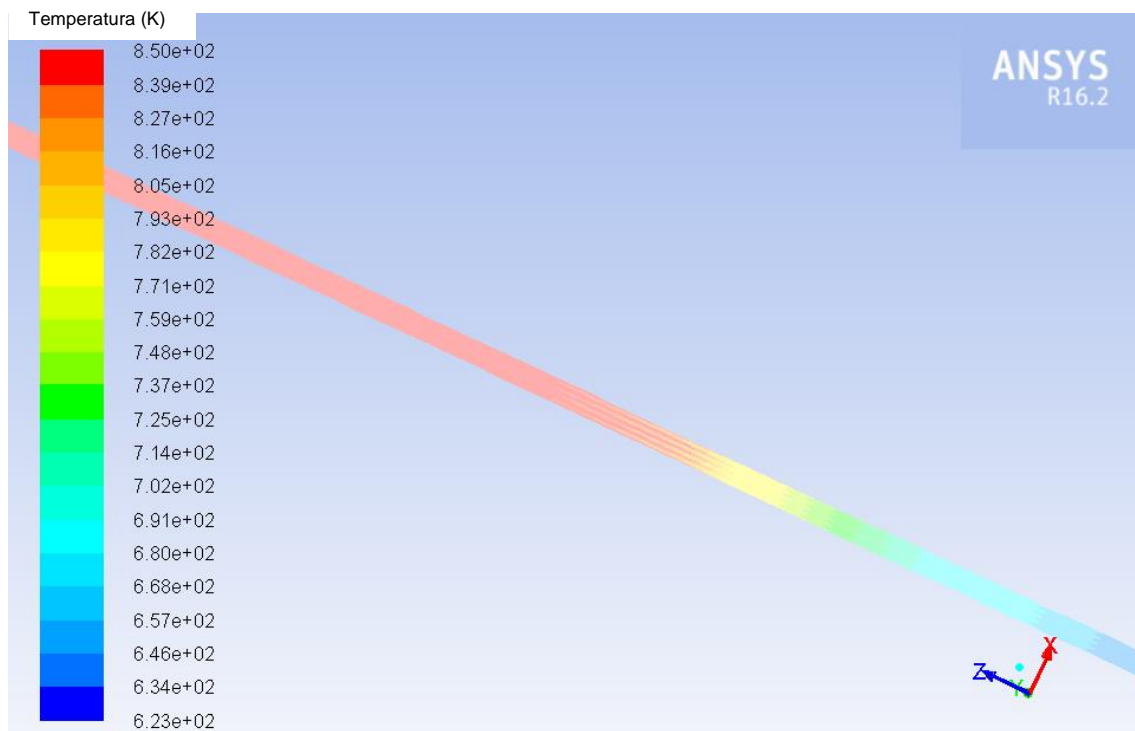


Figura 7.10: Contornos de temperatura sentido longitudinal medio a los 720s.

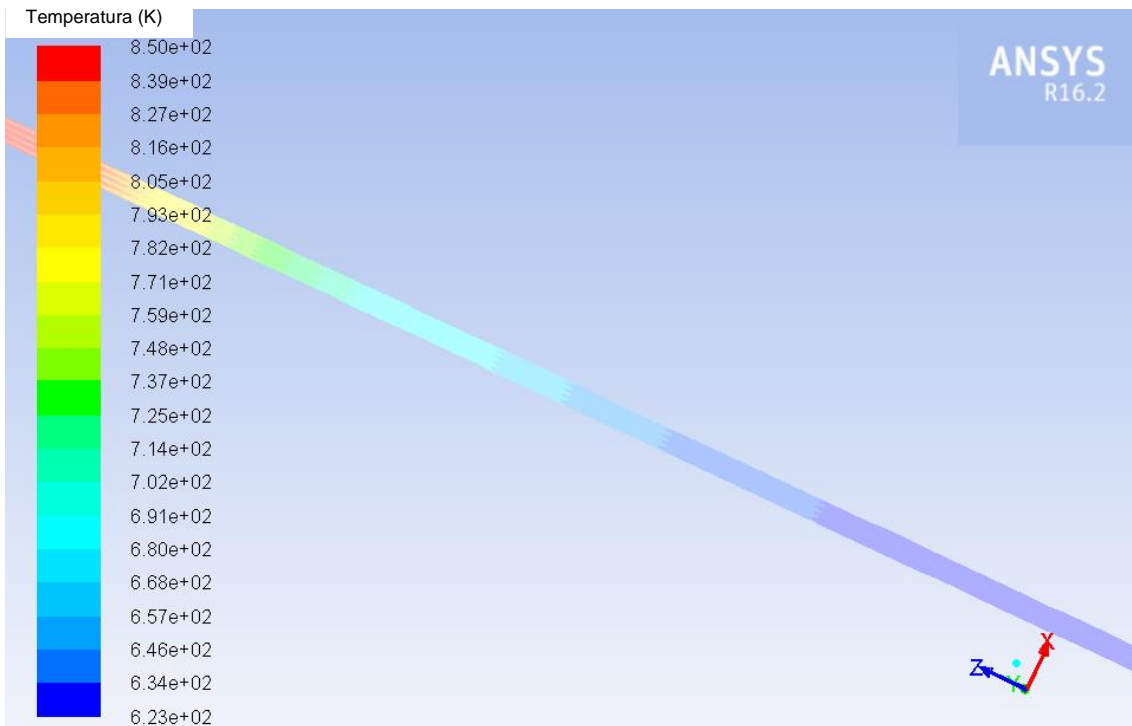


Figura 7.11: Contornos de temperatura sentido longitudinal medio a los 1250 s.

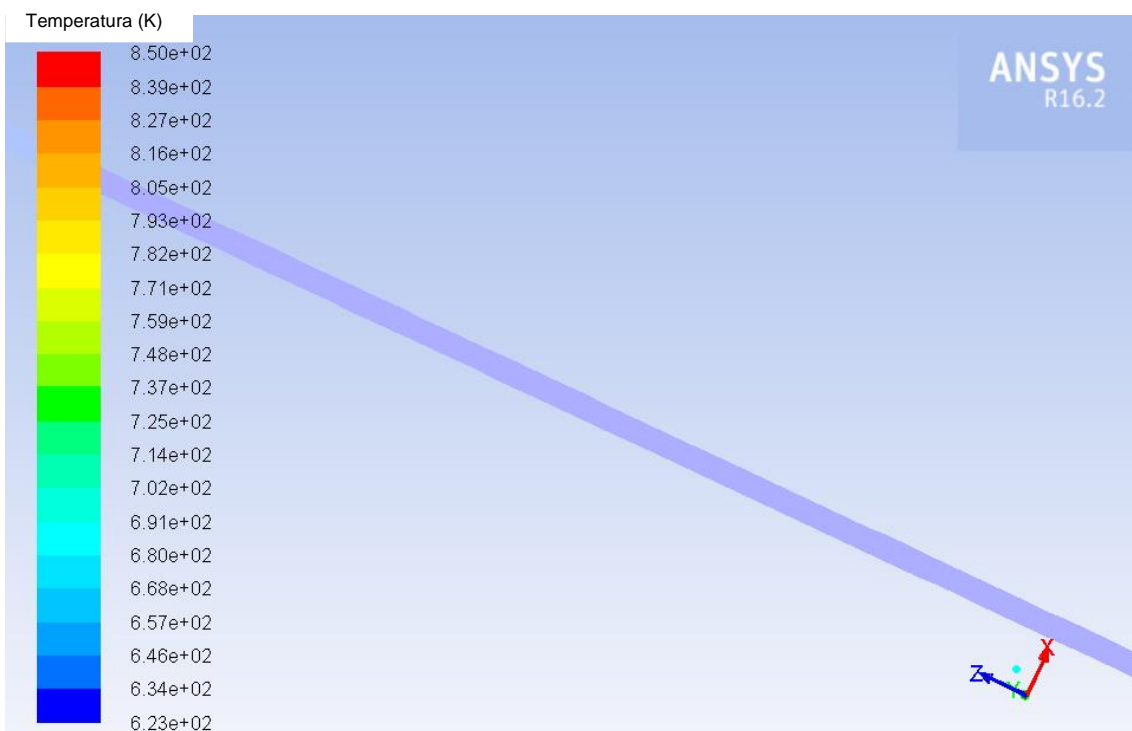


Figura 7.12: Contornos de temperatura sentido longitudinal medio final de la descarga.

Ahora, se muestran los contornos de temperatura en sentido radial inferior.

### 7.2.3 Contornos sentido radial inferior.

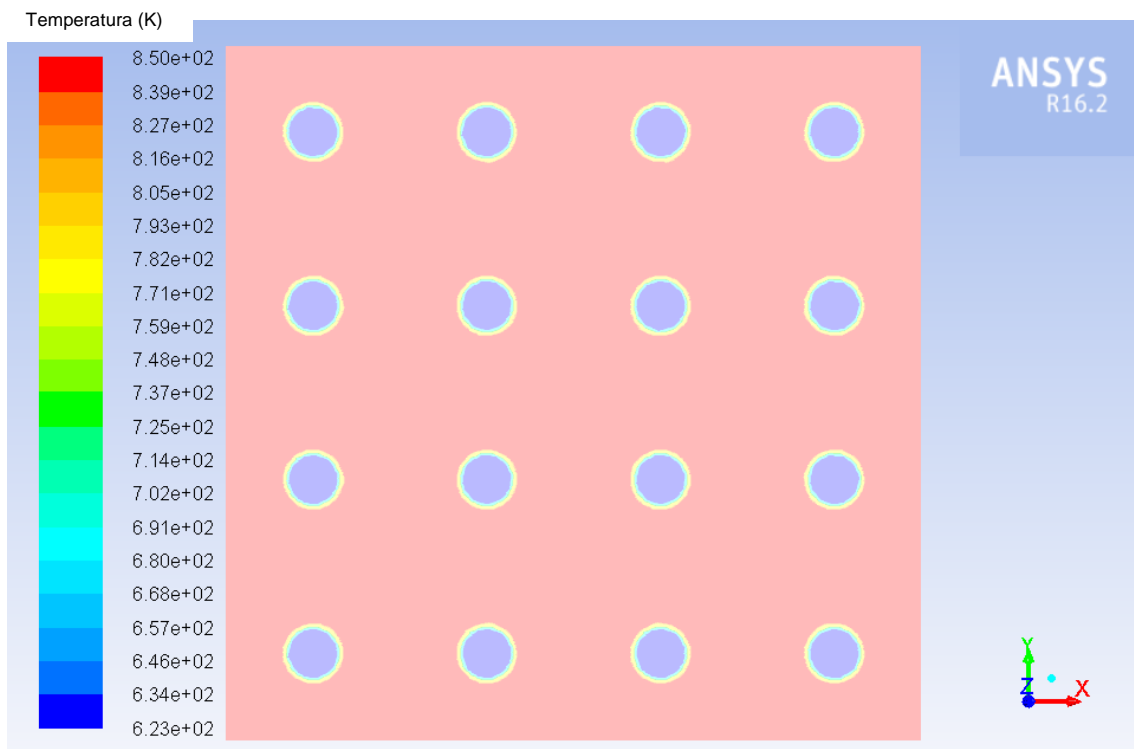


Figura 7.13: Contornos de temperatura sentido radial inferior al inicio.

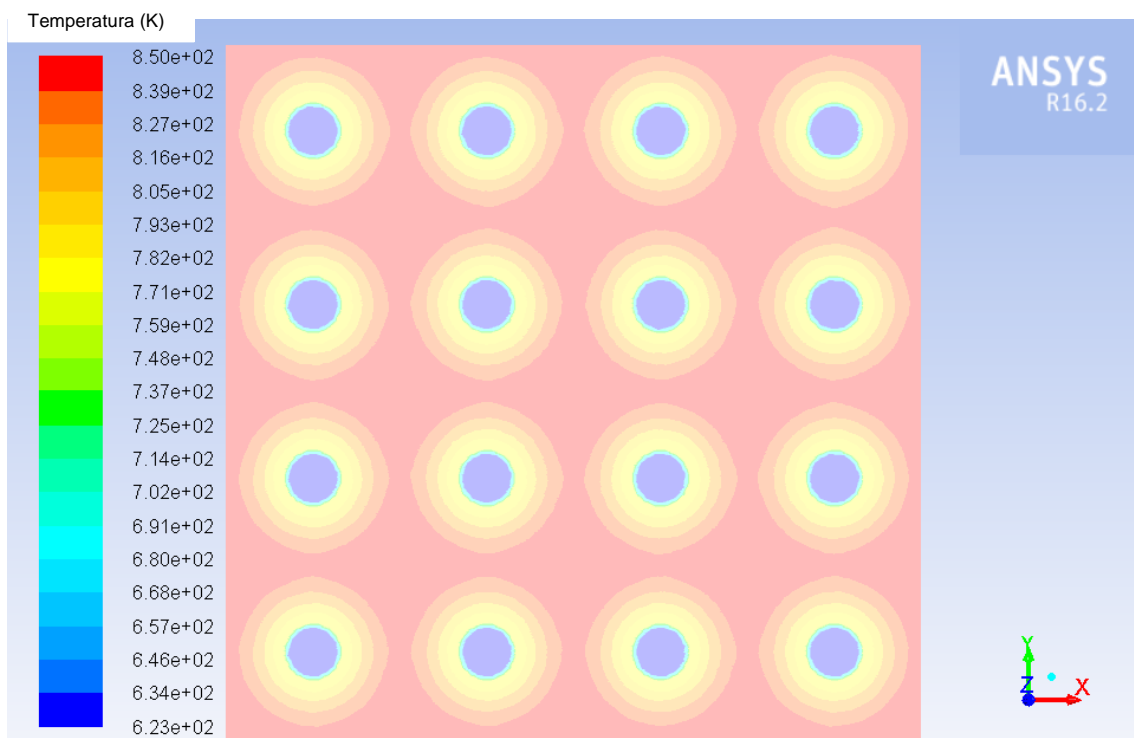


Figura 7.14: Contornos de temperatura sentido radial inferior a los 140 s.

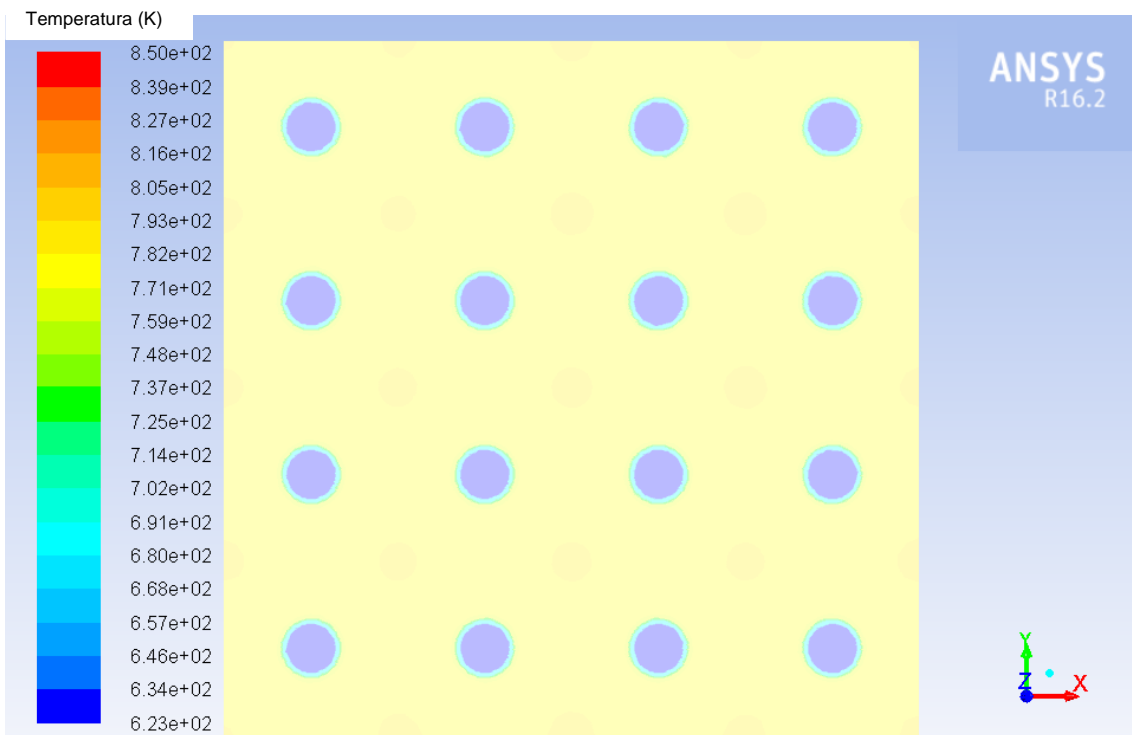


Figura 7.15: Contornos de temperatura sentido radial inferior a los 300s.

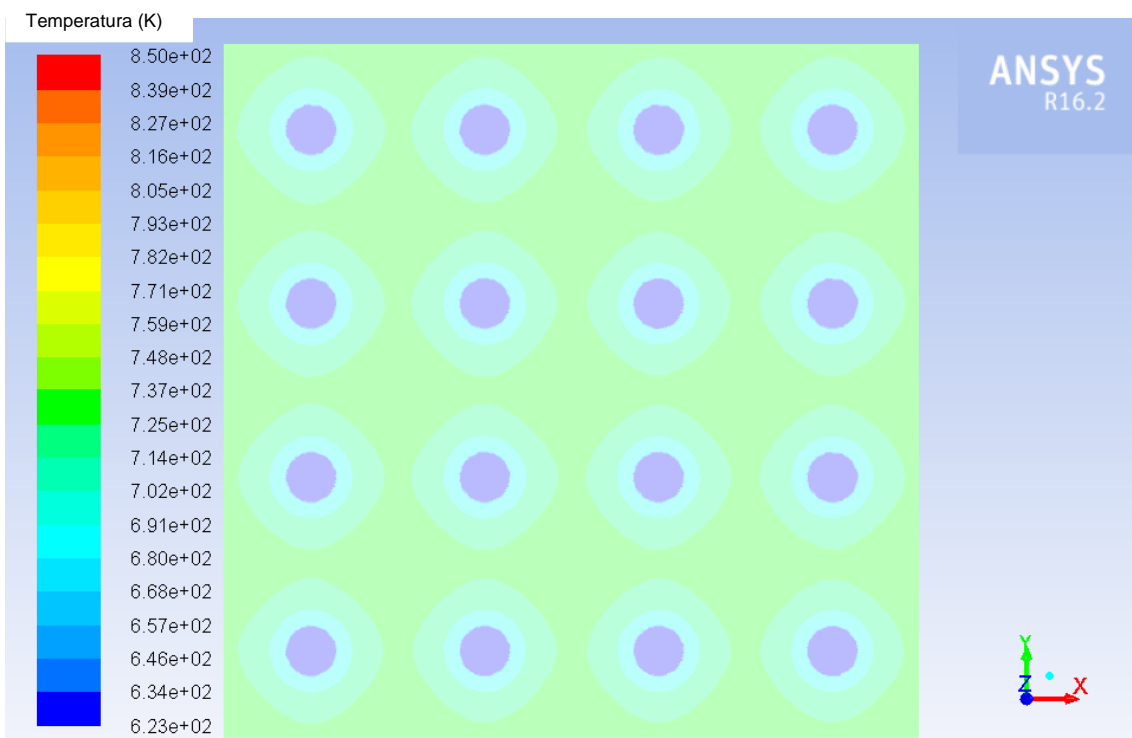


Figura 7.16: Contornos de temperatura sentido radial inferior a los 370 s.

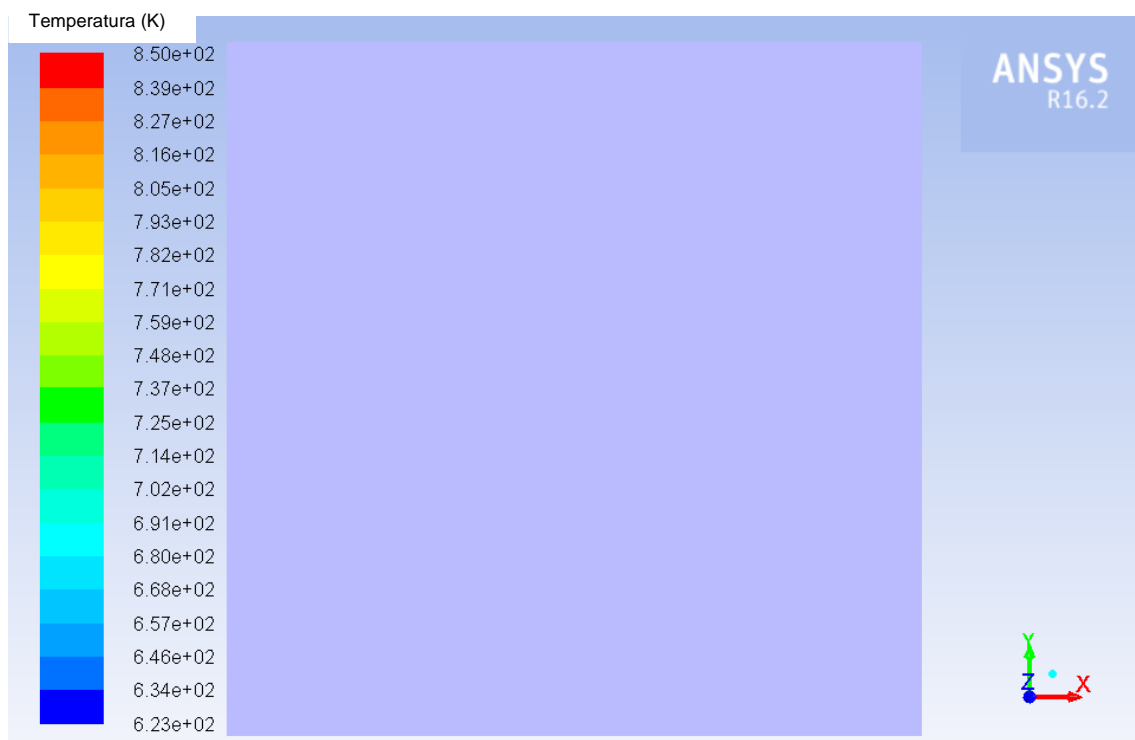


Figura 7.17: Contornos de temperatura sentido radial inferior al final.

Los contornos de temperatura en el sentido radial medio y radial superior, han sido omitidos en el informe. La razón por la que se han omitido, es simplemente, que al ser un sistema totalmente simétrico en todos sus puntos la transferencia de calor resulta a su vez simétrica en todo su entorno y por ello, las gráficas que nos ofrecen estos monitores son idénticas a los contornos en el sentido radial inferior. La única diferencia entre ellos es que, si se estudian las gráficas en tiempo, se verá que la parte inferior es la primera en enfriarse mientras que la parte superior se mantiene caliente durante más tiempo, pero esto se ve mejor reflejado en los contornos longitudinales.

Por esta razón, no resulta productivo el extender el informe en este sentido, ya que los datos expuestos carecerían de originalidad y sobre todo de utilidad a la hora de hacer el análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación.

### 7.3 CONTORNOS DE FUSIÓN

A continuación del mismo modo como se han dado los contornos de temperatura, se exponen los contornos de fusión en sentido longitudinal y en sentido radial.

Tal y como se ha comentado antes, la razón por la que no se exponen los contornos de la sección radial media y la sección radial superior, es simplemente que las diferencias son apreciables sólo en el tiempo.

Obviamente y como se puede observar en los contornos de la parte longitudinal del sistema, la parte de abajo es la primera en solidificarse mientras que la parte de arriba permanece más tiempo en estado líquido.

Los contornos serán expuestos tal y como se ha hecho con los contornos de temperatura.

Aunque las imágenes tomadas hablan por sí solas, después de este apartado se abrirá un nuevo capítulo de análisis de resultados y conclusiones del proyecto en conjunto.

En él, se hará mención una vez más de las ventajas que supone la utilización de esta nueva tecnología de metales fundidos sobre otros sistemas actuales de almacenamiento térmico.



### 7.3.1 Contornos sentido longitudinal.

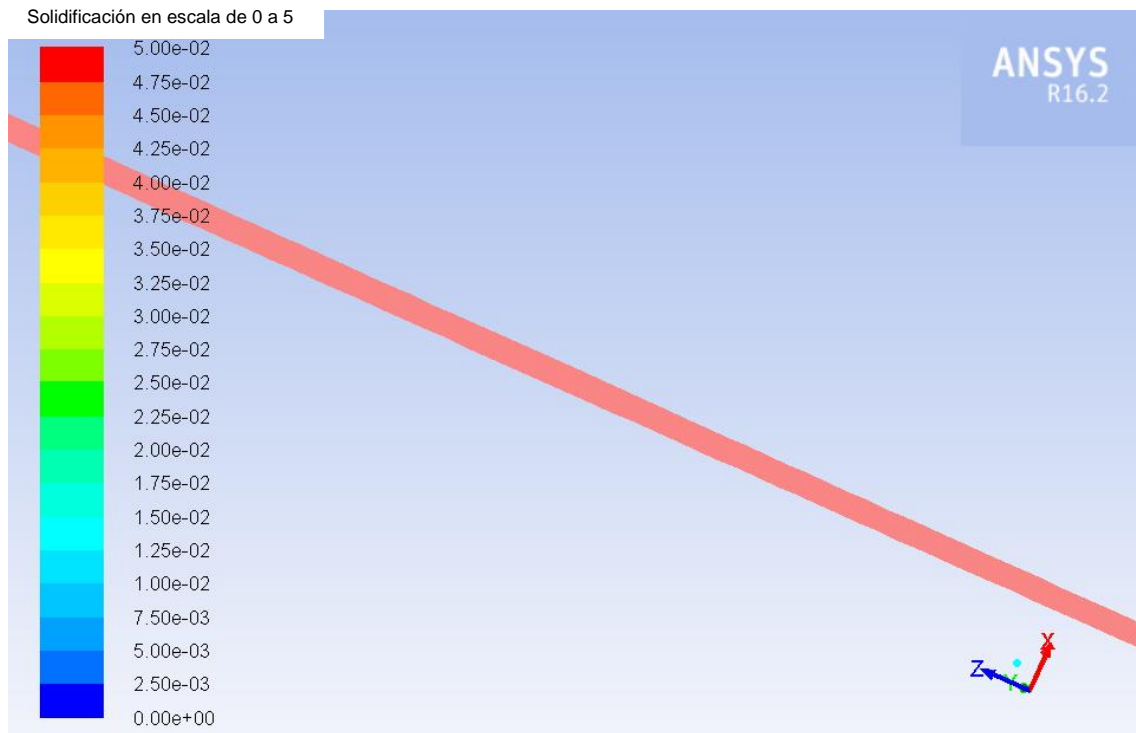


Figura 7.18: Contorno de fusión en sentido longitudinal inferior todo líquido.

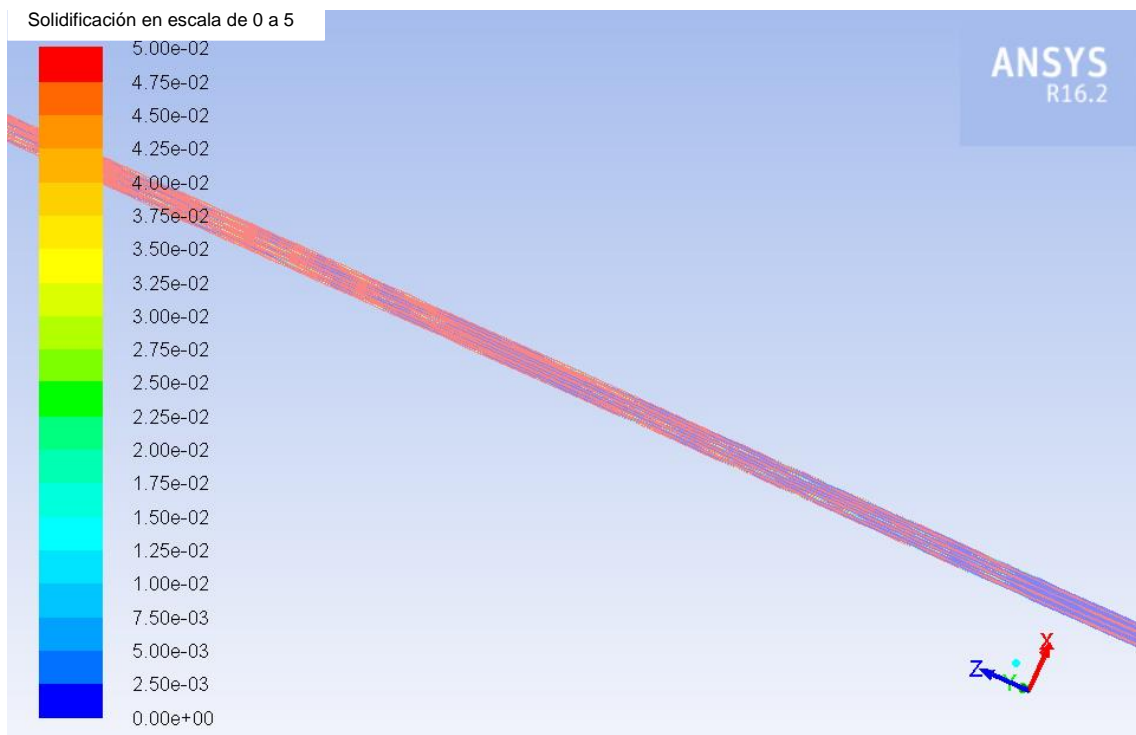


Figura 7.19: Contorno de fusión sentido longitudinal inferior pasados 340 s.

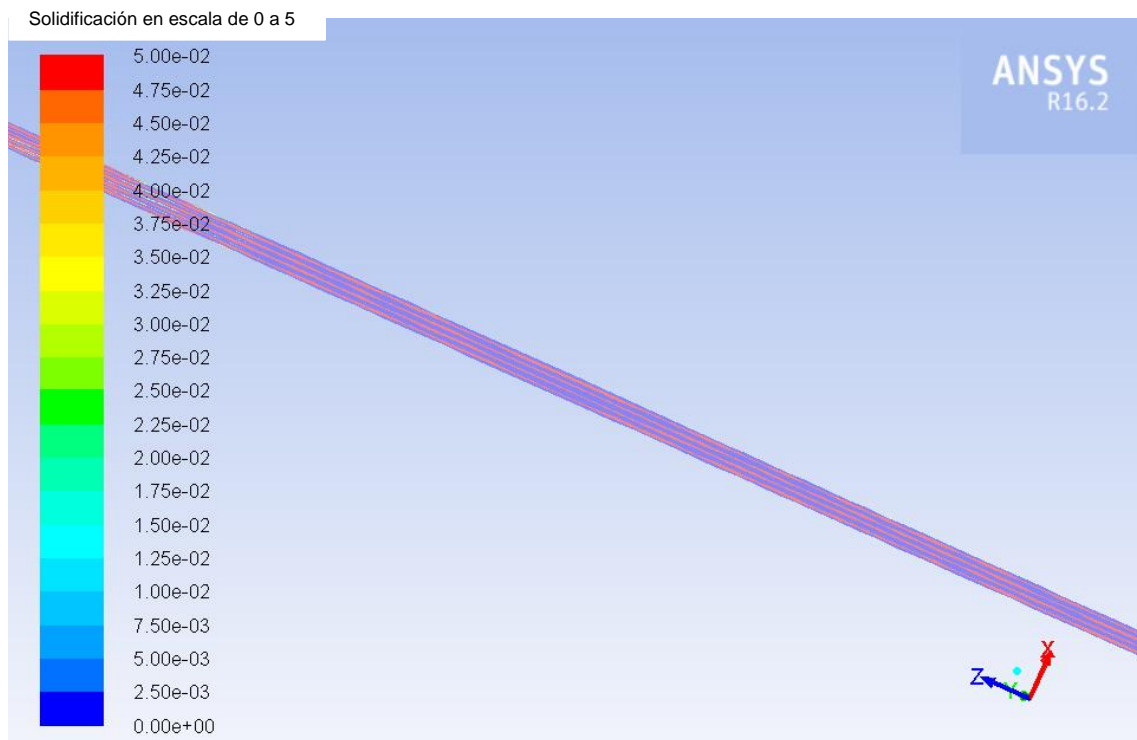


Figura 7.20: Contorno de fusión sentido longitudinal inferior a los 1010s.

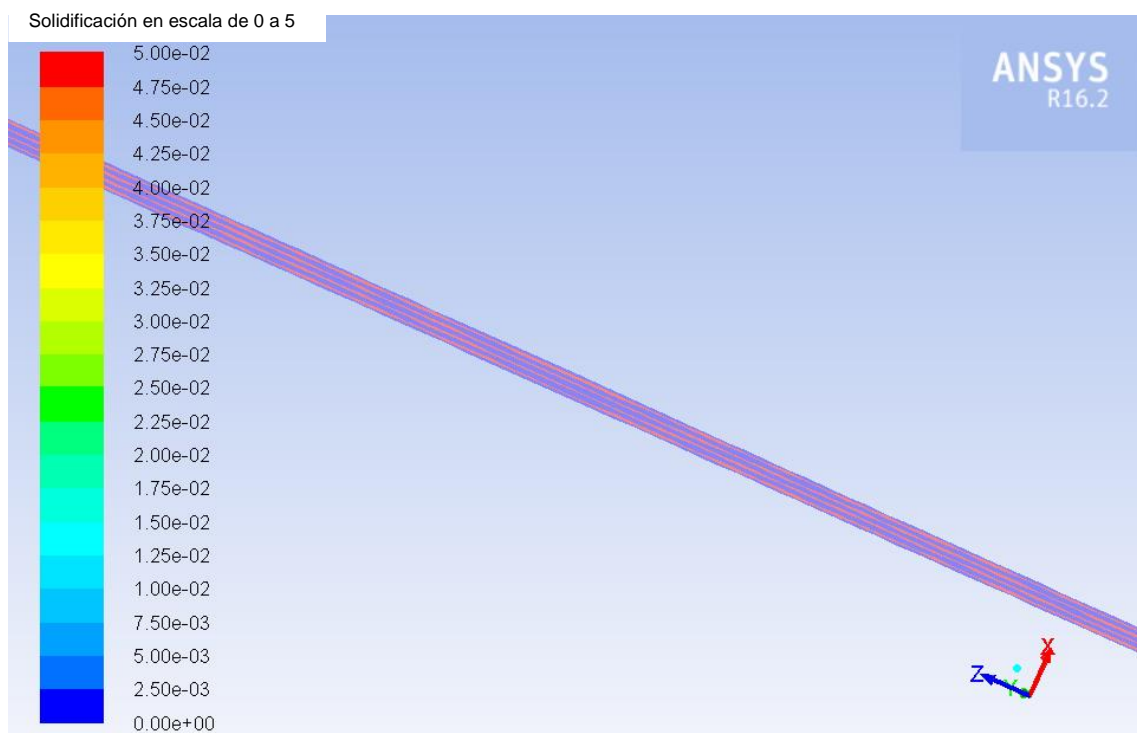


Figura 7.21: Contorno de fusión sentido longitudinal inferior a los 1270 s.

A continuación, se tienen los contornos en el sentido longitudinal medio.

### 7.3.2 Contornos sentido longitudinal medio.

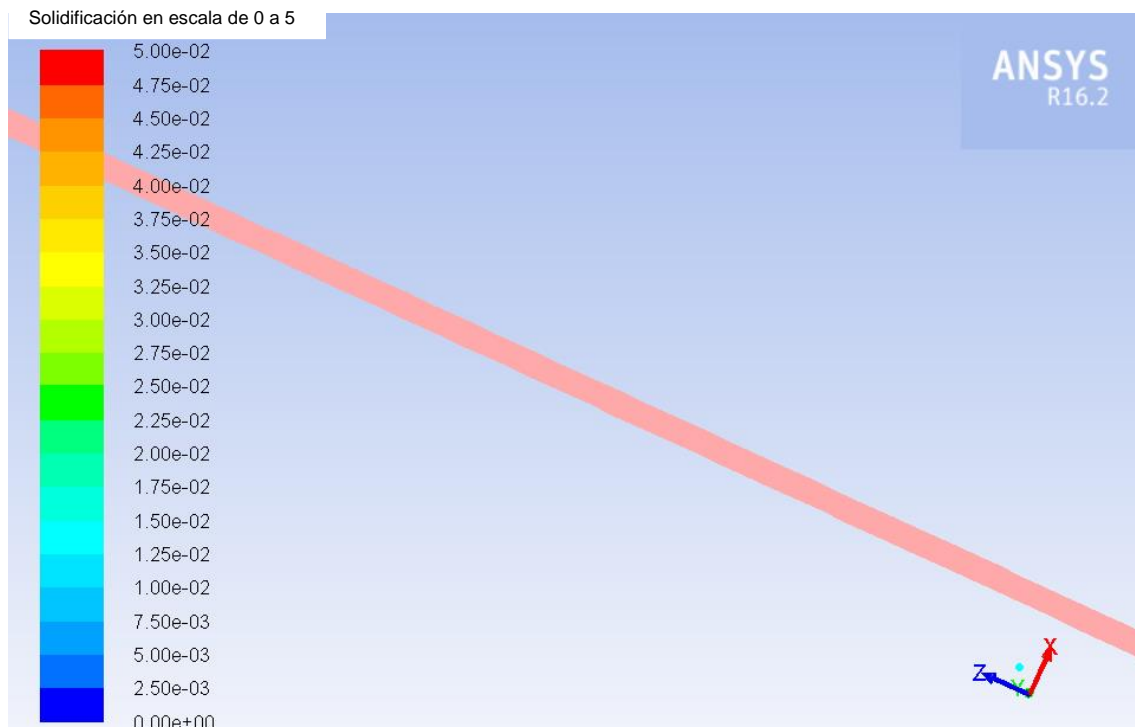


Figura 7.22: Contorno de fusión sentido longitudinal medio al inicio.

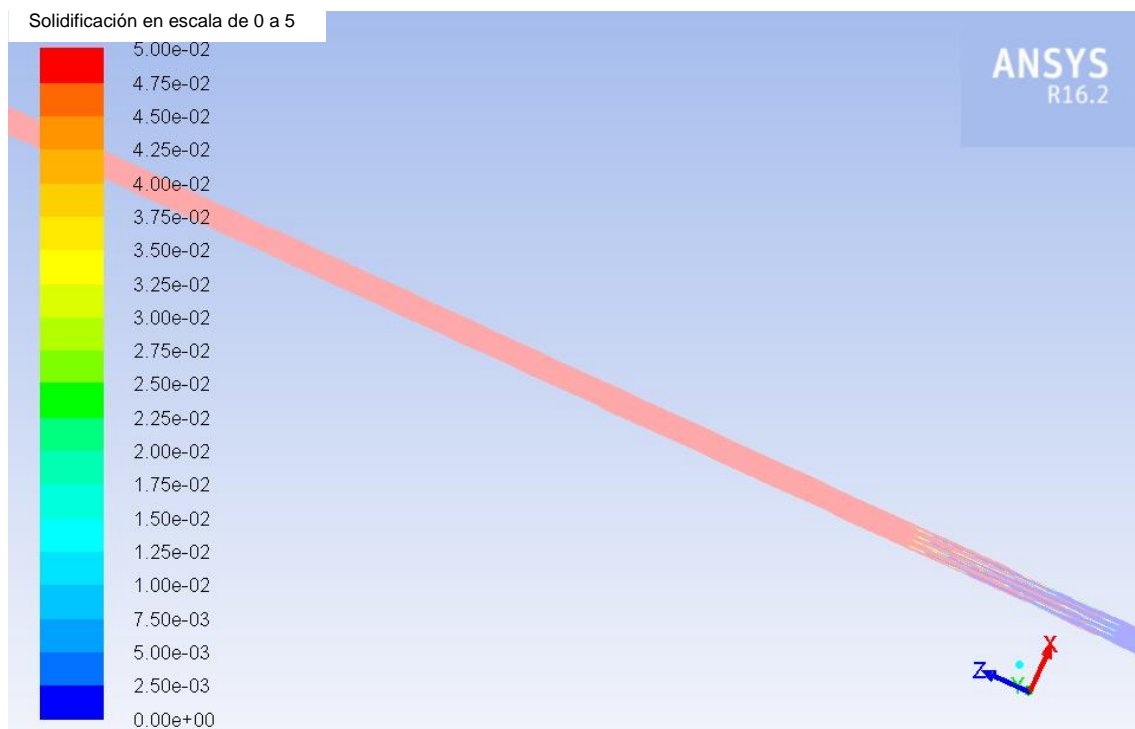


Figura 7.23: Contorno de fusión sentido longitudinal medio a los 480s.

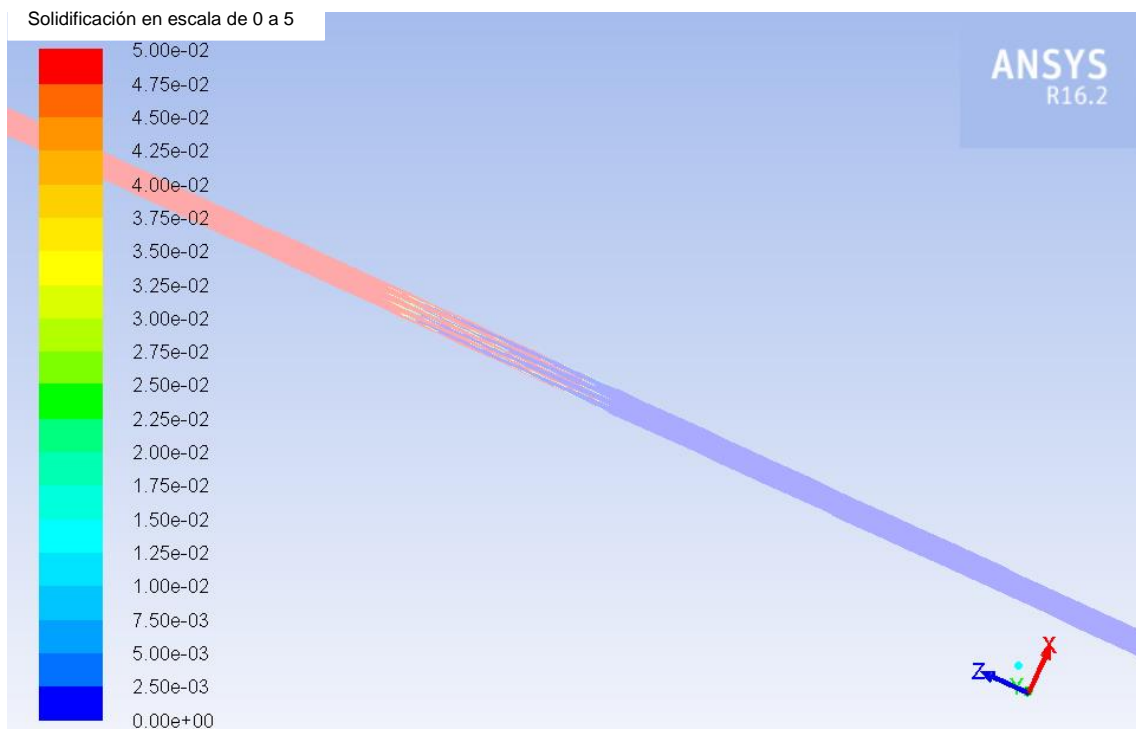


Figura 7.24: Contorno de fusión sentido longitudinal medio a los 910 s.

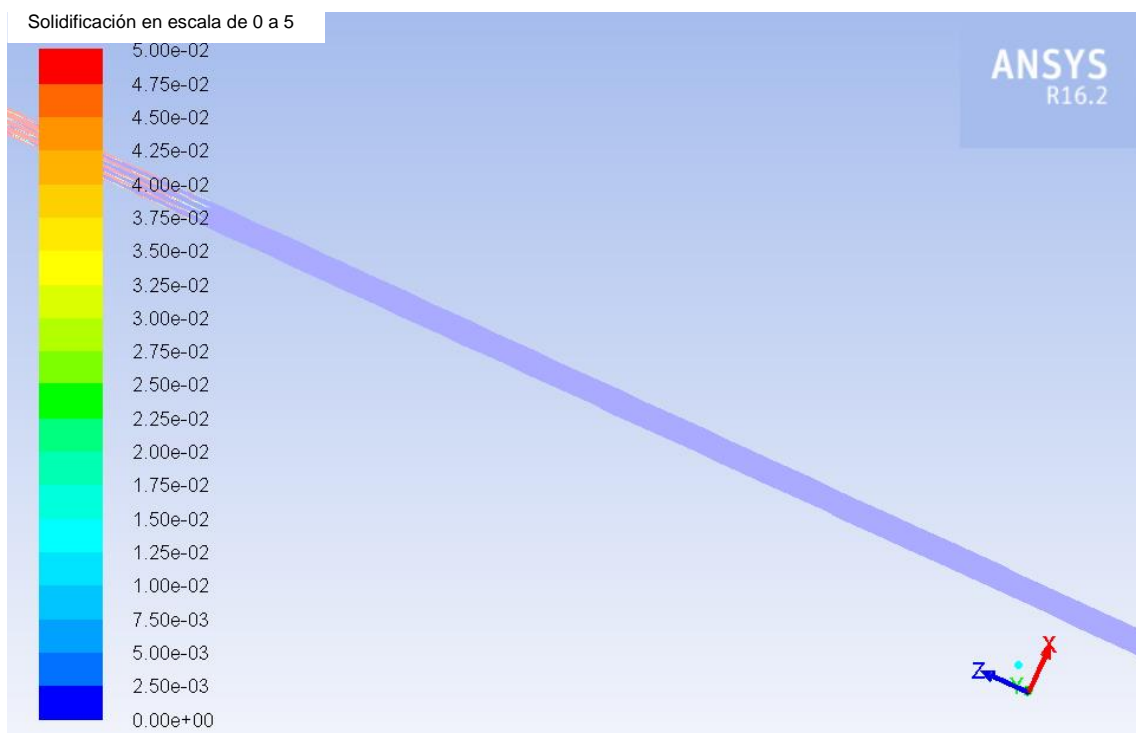


Figura 7.25: Contorno de fusión sentido longitudinal medio a los 1210s.

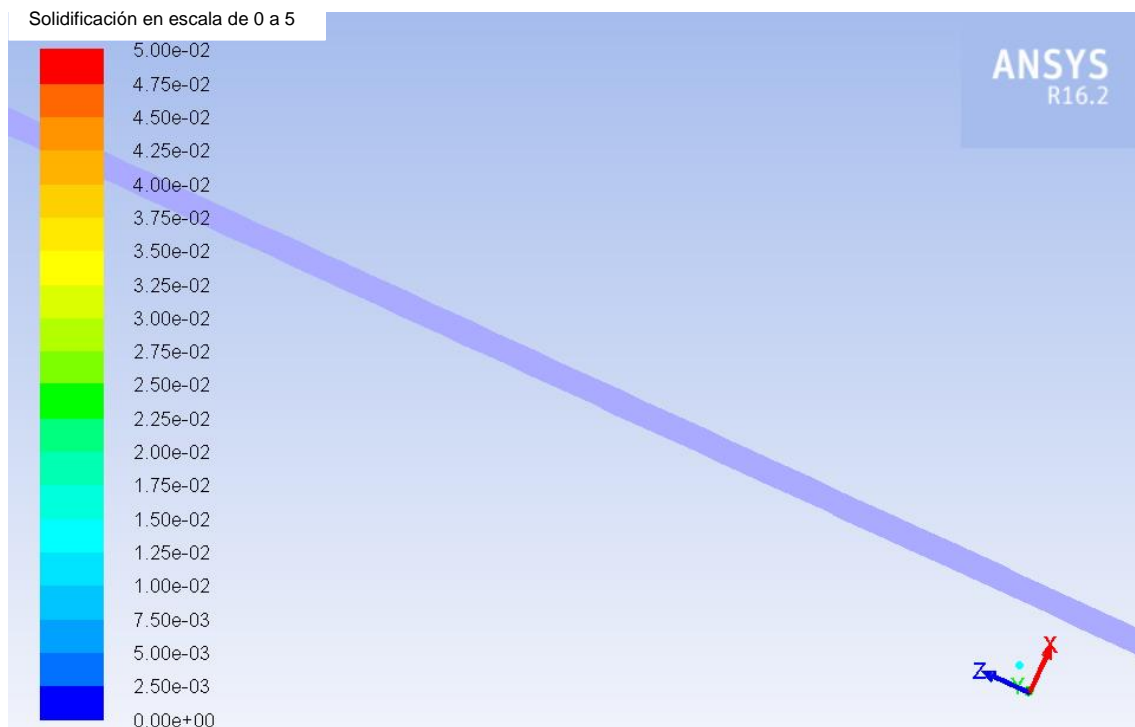


Figura 7.26: Contorno de fusión sentido longitudinal medio al final, todo sólido.

Los contornos en el sentido radial inferior se mostrarán en la siguiente página como se ha hecho anteriormente.

Como se ha hecho ya mención, la razón por la que no se exponen tantos contornos en la sección radial del sistema es que la transferencia de calor y la fusión al ser homogénea para todo el sistema las imágenes son las mismas en todos los contornos radiales, ya sean medios, superiores o inferiores.

La única diferencia, es que la solidificación y la transferencia de calor se encuentra desfasada en el tiempo, ya que las distintas secciones, aunque siguen la misma secuencia de enfriamiento y de solidificación algunas secciones experimentan los cambios más rápidamente, mientras que otras necesitan más tiempo para llegar al mismo nivel.

### 7.3.3 Contornos sentido radial inferior.

Del mismo modo, se muestran los contornos de fusión en el sentido radial inferior.

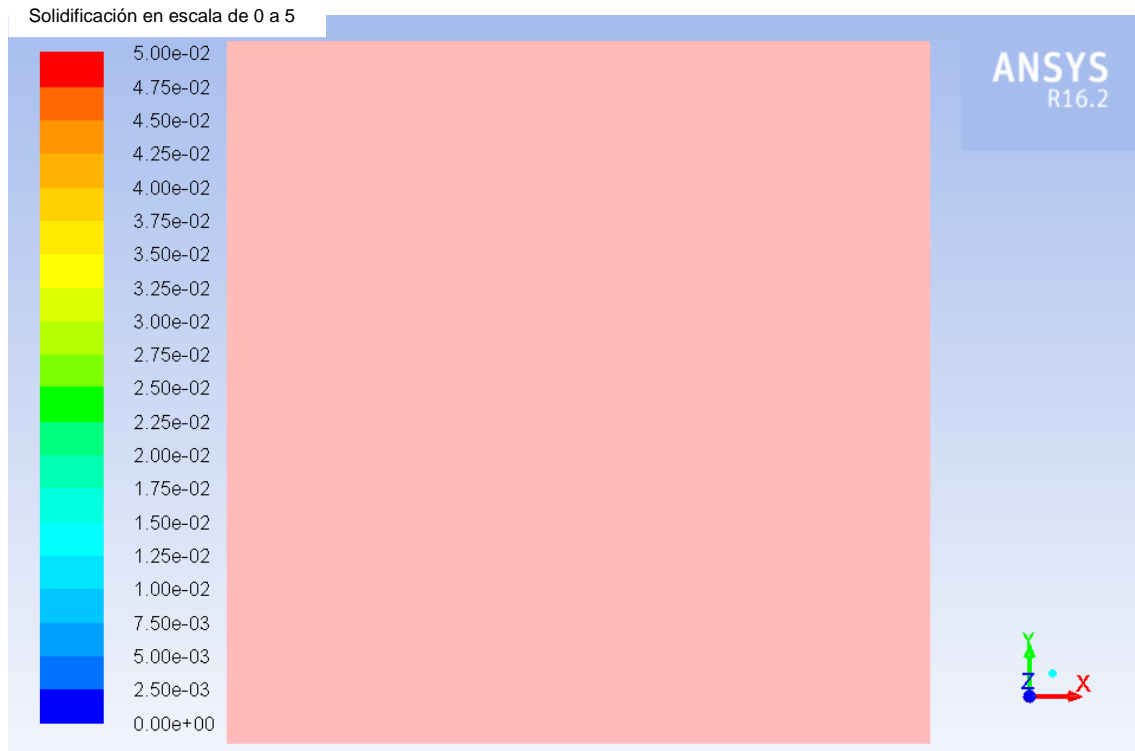


Figura 7.27: Contornos de fusión sentido radial al comienzo.

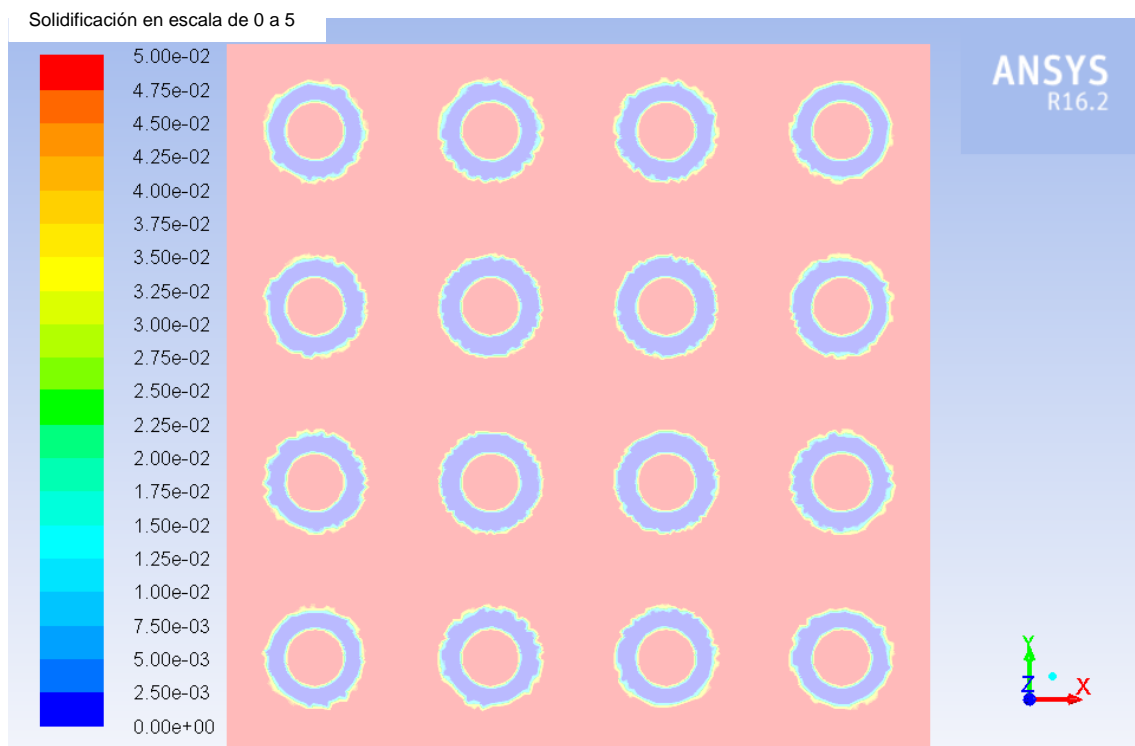


Figura 7.28: Contornos de fusión sentido radial a los 40s.

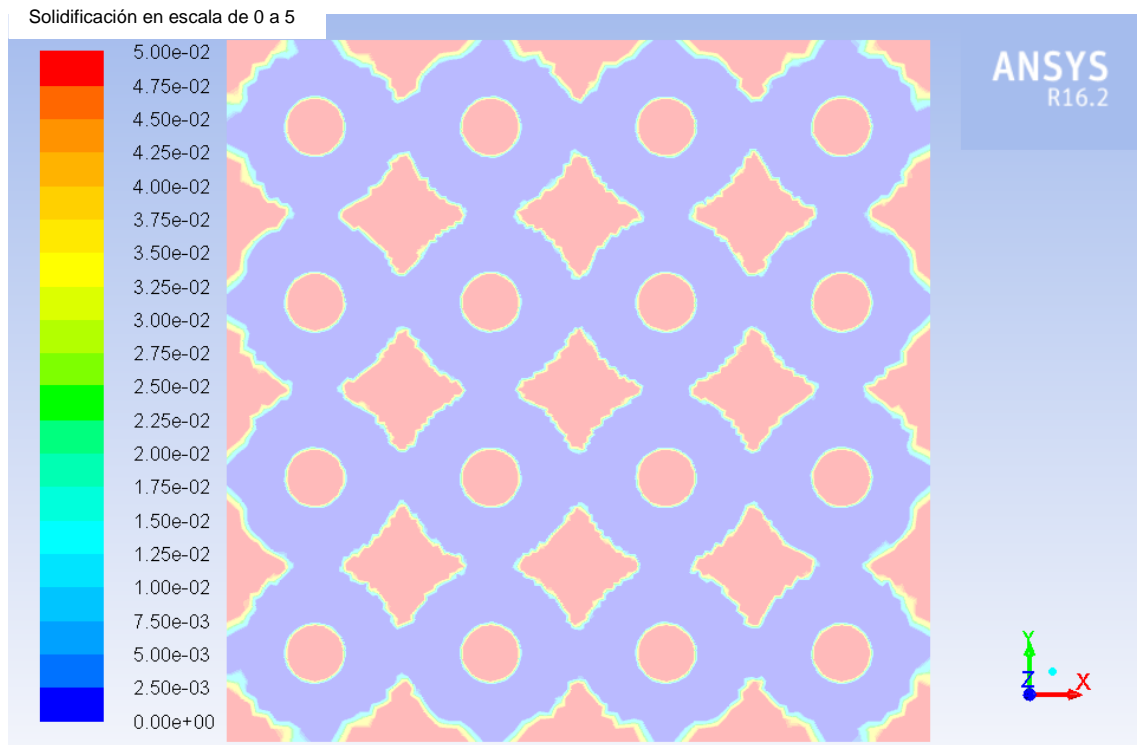


Figura 7.29: Contornos de fusión sentido radial a los 200 s.

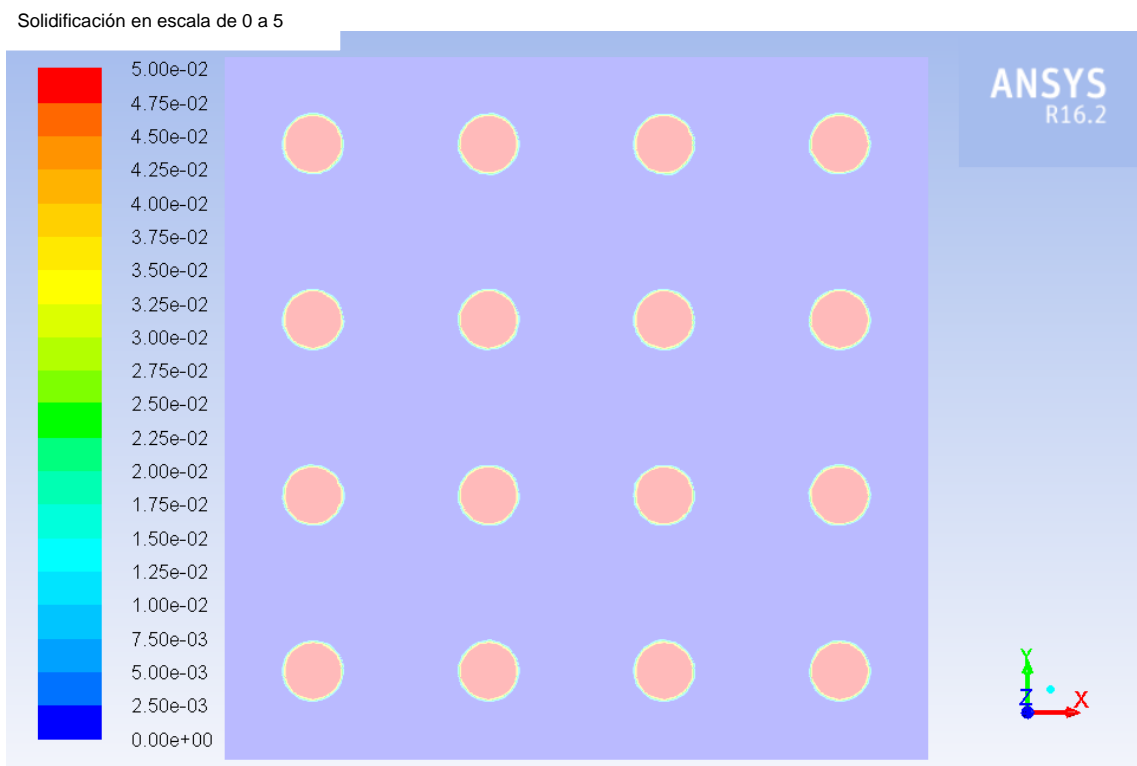


Figura 7.30: Contornos de fusión sentido radial al final.





## 8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Una vez expuestos todos los resultados, se procede al análisis final y las conclusiones finales que ha aportado este proyecto.

En primera instancia, se ve claramente en los contornos que se han obtenido, cómo evolucionan las distintas partes del sistema que se ha escogido para analizar el funcionamiento del acumulador-intercambiador de energía que se ha creado.

La parte de la entrada del HTF o la sal fundida en este caso, es la primera en enfriarse mientras que la parte de la salida o como se le ha llamado la parte superior es la que permanece caliente durante más tiempo. Este fenómeno se observa sobre todo en los contornos longitudinales que se han obtenido.

Otro aspecto muy interesante que se ha observado, es la homogeneidad que se encuentra en todo el sistema, es decir, si se discretiza un solo tubo y se dibujan sus contornos en un tiempo llamado  $x$ , estos contornos se podrán aplicar a todos los tubos que componen el dispositivo.

Este fenómeno es debido a la utilización de un metal, un material mucho más noble que las parafinas y otro tipo de sustancias que han sido estudiadas hasta ahora. En esto, preside la originalidad y la innovación real del proyecto, la utilización de un metal eutéctico para almacenar el calor y para posteriormente calentar otro fluido. Por este mismo motivo se dice que se ha creado un almacenador-intercambiador de calor en todo momento, ya que este aparato permite almacenar y posteriormente utilizar esta energía térmica almacenada sin necesidad de acoplar ningún otro dispositivo.

Debido a lo importante que resulta tener claro en qué reside la innovación de este sistema a posteriori, se enumeran los pilares fundamentales y las principales ventajas que supone la utilización de un PCM metálico:

- Conductividad térmica inigualable, comparándolo con cualquier otro material que se conoce en la actualidad la conductividad térmica resulta insuperable. Los metales, permiten una mayor separación entre los tubos, lo que permite reducir los costes de construcción del dispositivo reduciendo significativamente el número de tubos utilizado.
- Capacidad de almacenaje de energía térmica muy alta, ya que un metal en su proceso de fusión puede almacenar mucho más calor latente que cualquier otra sustancia. Esto hace que el gran calor que se ha podido almacenar resulte más provechoso para aplicarlo en la industria en labores muy pesadas y procesos térmicos muy costosos e importantes.
- Vida útil del material sustancialmente más alta, también en comparación sobre todo con otros PCM de otros ámbitos, tales como las parafinas. La composición del metal, al ser mucho más estable permite la utilización del sistema durante más ciclos de carga y descarga. Este fenómeno es muy importante para reducir los costos de tener que cambiar el PCM cuando empieza a degradarse por el número de ciclos a los que ha sido sometido.
- Sistema innovador desde el principio hasta el final, debido a que, aunque han sido muchos los artículos en los que se ha planteado la utilización de un metal para su uso en el almacenaje de energía, nunca se ha puesto a prueba un sistema que pudiese ser utilizado en la vida real. Con esto se quiere subrayar una vez más que el dispositivo puede ser utilizado en la industria de generación de electricidad a partir de energía solar con el diseño que se expone en esta redacción. Esta afirmación ha sido contrastada y confirmada mediante la validación mediante el programa ANSYS FLUENT del modelo teórico que se ha hecho a partir de la primera hoja de cálculo de diseño del acumulador-intercambiador.

Todos estos argumentos, demuestran una vez más las ventajas que supone la utilización de aleaciones como materiales de almacenamiento de energía térmica

y abren una ventana a posteriores investigaciones que puedan surgir en distintos sectores de la industria, ya que este mismo principio puede ser analizado y estudiado para procesos térmicos ya sean en industria terrestre o bien marina.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1]<http://www.energy.gov/science-innovation/energy-sources/renewable-energy/solar> última modificación 19 abril 2011.
- [2][http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy\\_2014edition.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf) última modificación 7 octubre de 2014.
- [3]<http://wiki-solar.org/region/continents/index.html> última modificación marzo de 2016.
- [4] <http://ptef.blogspot.com.es/2013/03/obtencion-de-la-energia-fotovoltaica.html> última modificación 18 marzo 2013.
- [5]<http://www.greenpeace.org/international/en/> última modificación 19 agosto 2008.
- [6][http://gcep.stanford.edu/pdfs/assessments/solar\\_assessment.pdf](http://gcep.stanford.edu/pdfs/assessments/solar_assessment.pdf) última modificación 2 julio 2008.
- [7]<http://www.solar.unlv.edu/projects/eldorado.php> última modificación 2 julio 2008
- [8]<http://www.physics.usyd.edu.au/app/research/solar/clfr.html> última modificación 19 abril 2011
- [9]<http://www.ese.iitb.ac.in/activities/solarpower/ausra.pdf> última modificación 19 abril 2011
- [10] Martin I. Hoffert, Ken Caldeira ``Advanced Technology Paths to Global Climate Stability: Energy for a Greenhouse Planet´´, Science (2002), volumen 298,981-987.
- [11][http://www.solarpaces.org/Library/docs/CSP\\_Brochure\\_2001.pdf](http://www.solarpaces.org/Library/docs/CSP_Brochure_2001.pdf) última modificación 2 julio 2008
- [12]<http://solareis.anl.gov/guide/solar/csp/> última modificación 20 junio 2013
- [13]<http://www.ecoworld.com/energy-fuels/how-much-solar-energy-hits-earth.html> última modificación 14 junio 2006
- [14]<https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/041.htm> última modificación 29 septiembre 2007
- [15] Smil, V, ``21st century energy: Some sobering thoughts´´, OECD Observer (2007), volumen 14, 258-259.
- [16]<http://www.nature.com/nature/journal/v443/n7107/full/443019a.html> última modificación septiembre 2010

- [17] Nathan S. Lewis, Daniel G. Nocera, ``Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization'', Proc National Academic Science (2007), volume 50, 8454-8459
- [18]<http://gcep.stanford.edu/research/exergy/resourcechart.html> última modificación octubre 2015.
- [19]<http://energy.sandia.gov/energy/renewable-energy/solar-energy/csp-2/nsttf/> última modificación febrero 2015.
- [20]<http://www.nrel.gov/solar/> última modificación 11 agosto 2016.
- [21]<http://www.scientificamerican.com/article/sunny-outlook-sunshine-provide-electricity/> última modificación 19 septiembre 2006.
- [22]<http://www.solarreserve.com/en/global-projects> última modificación 5 noviembre 2012.
- [23]<http://regencys shutter.com/wp-content/uploads/2014/07/storage.pdf> última modificación 11 octubre 2011.
- [24][http://www.solarmillennium.de/front\\_content.php?idart=155&lang=2](http://www.solarmillennium.de/front_content.php?idart=155&lang=2) última modificación 20 agosto 2013.
- [25]<https://thinkprogress.org/solar-can-be-baseload-spanish-csp-plant-with-storage-produces-electricity-for-24-hours-straight-a1699862132a> última modificación 5 julio 2011.
- [26] M. Kenisarin, K. Mahkamov, ``Solar Energy Storage using Phase Change Materials'', Renewable and Sustainable Energy Reviews (2011), volumen 9, 1913-1965.
- [27] Zalba, Belen, Jose M. Marin, Luisa F. Cabeza, and Harald Mehling. "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications." Applied Thermal Engineering (2003), volumen 23, 251-283
- [28] Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lazaro, A., Dolado, P., Zalba, B., and Cabeza, L. F., "State of the Art on High Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation: Part 1—Concepts, Materials and Modellization," Renewable Sustainable Energy Rev (2010), volumen 14, 31–55.
- [29] Kenisarin, M. M., "High-Temperature Phase Change Materials for Thermal Energy Storage," Renewable Sustainable Energy Rev. (2010), volumen 14, 955–970.
- [30] Castellón, C.; Castell, A.; Cabeza, L.F., ``Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings'', Energy and Buildings (2012), volumen 44, 88-93.
- [31] Hussein J. Akeiber<sup>1</sup>, Mazlan A. Wahid<sup>1</sup>, Taha Mahdi<sup>2</sup>, Naser N. Jassim<sup>3</sup>, Mohammed M. Obeid, ``Production application of paraffin waxes refining process

in Iraq and used as phase change materials'', International Journal of Advanced Research (2016), Volume 4, 96- 100

[32] C Alkan, A Sarı, A Karaipekli, O Uzun ... S Karaman, A Karaipekli, A Sarı, A Bicer ... A Sarı, K Kaygusuz, `` Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material'', Renewable Energy (2007), volumen 13, 2201-2210,

[33] Jane Mills, Ann Bonner, and Karen Francis, ``The Development of Constructivist Grounded Theory'', international journal of qualitative methods (2006), volumen 3,12-25

[34] Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. ``Conduction of Heat in Solids'', 2ª edición, Oxford: Clarendon Press, 1959, páginas 320-322.

[35] M.M. Farid, A.M. Khudhair, S. Al-Hallaj, ``A review on phase change energy storage, materials and applications'', Energy Conversion and Management (2004), volumen 45, 1597–1615.

[36] J.M. Khodadadi, Y. Zhang, ``Effects of buoyancy-driven convection on melting within spherical containers'', International Journal of Heat and Mass Transfer (2001), volumen 44, 1605–1618.

[37] Q. Duan, F.L. Tan, K.C. Leong, A numerical study of solidification of n-hexadecane based on the enthalpy formulation, Journal of Materials Processing Technology 120 (2002) 249–258.

[38] D.B. Khillarkar, Z.X. Gong, A.S. Mujumdar, `` Melting of a phase change material in concentric horizontal annuli of arbitrary cross-section'', Applied Thermal Engineering (2000), volumen 20 893–912

[39] E. Assis, L. Katsman, G. Ziskind, R. Letan, ``Numerical and experimental study of melting in a spherical shell'', International Journal of Heat and Mass Transfer (2007), volumen 50, 790–1804.

[40] E. Assis, G. Ziskind, R. Letan, ``Numerical and experimental study of solidification in a spherical shell'', Journal of Heat Transfer (2009), volumen 31, 24502–24507.

- [41] F.L. Tan, S.F. Hosseinizadeh, J.M. Khodadadi, L. Fan, ``Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule'', *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2009), volumen 52, 3464–3472.
- [42] M. Medrano, M.O. Yilmaz, M. Nogués, I. Martorell, Joan Roca, Luisa F. Cabeza, ``Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems'', *Applied Energy* (2009), volumen 86 2047–2055.
- [43] R.V. Seeniraj, R. Velraj, N.L. Narasimhan, ``Thermal analysis of a finned-tube LHTS module for a solar dynamic power system'', *Heat and Mass Transfer* (2002), volumen 38, 409–417.
- [44] A. Castell, C. Sole, M. Medrano, J. Roca, L.F. Cabeza, D. Garcia, ``Natural convection heat transfer coefficients in phase change material (PCM) modules with external vertical fins'', *Applied Thermal Engineering* (2008), volumen 28 1676–1686.
- [45] A. Sari, K. Kaygusuz, ``Thermal and heat transfer characteristics in a latent heat storage system using lauric acid'', *Energy Conversion and Management* (2002), volumen 43 2493–2507.
- [46] V. Pandiyarajan, M.C. Pandian, E. Malan, R. Velraj, R.V. Seenira, ``Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system'', *Applied Energy* (2011), volumen 88, 77–87.
- [47] Z. Liu, X. Sun, C. Ma, ``Experimental study of the characteristics of solidification of stearic acid in an annulus and its thermal conductivity enhancement'', *Energy Conversion and Management* (2005), volumen 46, 971–984.
- [48] H.M. Ettouney, I. Alatiqi, M. Al-Sahali, S.A. Al-Ali, ``Heat transfer enhancement by metal screens and metal spheres in phase change energy storage systems'', *Renewable Energy* (2004), volumen 29, 841–860.
- [49] N.R. Vyshak, G. Jilani, ``Numerical analysis of latent heat thermal energy storage system'', *Energy Conversion and Management* (2007), volumen 48, 2161–2168.
- [50] H.A. Adine, H.E. Qarnia, ``Numerical analysis of the thermal behavior of a shell and tube heat storage unit using phase change materials'', *Applied Mathematical Modelling* (2009), volumen 33, 2132–2144.
- [51] Patankar, Suhas V., ``Numerical Heat Transfer and Fluid Flow'', Hemisphere Publishing Corporation 1980, página 54-56.



- [52] Hirt, C.W.; Nichols, B.D., "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries". *Journal of Computational Physics* (1981), volumen 39, 201-225.
- [53] Benzi, M., Golub, G. H., & Liesen, J., "Numerical solution of saddle point problems". *Acta numerica* (2005), volumen 14, 1-137.
- [54]<http://www.computationalfluidynamics.com.au/vof/> última modificación desconocida.
- [55]<https://summerofhpc.prace-ri.eu/magic-behind-the-most-of-the-cfd-solvers-for-hpc/> última modificación 12 agosto 2013.
- [56] V. R. Voller and C. Prakash. "A Fixed-Grid Numerical Modeling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems". *Int. J. Heat Mass Transfer* (1987). Volumen 30, 1709–1720.
- [57] Chang Liu, Dominic Groulx, "Experimental study of the phase change heat transfer inside a horizontal cylindrical latent heat energy storage system", *International Journal of Thermal Sciences* (2014), volumen 82, 100-110
- [58] C.L. Yaws, "Chemical Properties Handbook", McGraw-Hill, New York, 1999, página 853.
- [59] Wang, J.; Zhang, L.; Xin, D.; Yang, Y., "Dispersive Micro-Solid-Phase Extraction Based on Decanoic Acid Coated-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles for HPLC Analysis of Phthalate Esters in Liquor Samples". *J. Food Sci.* (2015), volumen 80, 2452-2458.
- [60] T. Rozenfeld, Y. Kozak, R. Hayat, G. Ziskind. "Close-contact melting in a horizontal cylindrical enclosure with longitudinal plate fins: Demonstration, modeling and application to thermal storage", *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2015), volumen 82, 465–477.
- [61] Stella P. Jesumathy<sup>1</sup>, M. Udayakumar<sup>1</sup> and S. Suresh<sup>2</sup>. "Heat transfer characteristics in latent heat storage system using paraffin wax". *Journal of Mechanical Science and Technology* (2012), volumen 26, 959~965.

