



ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS TÉRMICAS DE UN TANQUE DE SALES FUNDIDAS MEDIANTE SIMULACIÓN CFD

Mario Varela González ^[*], Alejandro Alfageme Carro ^[**, a], Inés María Suarez Ramón ^[**, b]

[*] Alumno; [**] Tutores

@uniovi.es

^[a] Departamento I+D+i. Grupo TSK

^[b] Departamento de Energía. Universidad de Oviedo

RESUMEN

Los tanques de sales fundidas de una central termosolar permiten almacenar el calor producido durante el día por la radiación solar y utilizarlo para generar vapor que moverá la turbina durante la noche o en periodos en los que la radiación solar directa sea insuficiente para generar vapor.

Debido a la alta temperatura de las sales almacenadas es preciso realizar un análisis térmico para determinar las pérdidas de calor por la envolvente en contacto con la atmosfera, así como en la cimentación. Los resultados obtenidos serán utilizados para mejorar un modelo matemático de las plantas termosolares que calcula el rendimiento de las mismas.

Para realizar el análisis CFD se utilizará el software ANSYS. Se realizarán distintas simulaciones, tanto para el tanque de almacenamiento de sales frío como para el caliente, y, en cada caso, se variarán los parámetros que más influyen en el comportamiento térmico, tales como el nivel de altura de sales, el espesor del aislante, la temperatura del gas inerte, la temperatura ambiental exterior y el coeficiente de película.

ABSTRACT

Molten salt tanks of concentrated solar power plants allow the storage of thermal energy in

terms of heat, produced by sun irradiation during the day, and use it for steam generation during night or at low sun irradiation periods.

Due to the high temperature of the stored salts, a thermal analysis must be done, in order to establish the heat losses in the thermal envelope, as well as in the foundation. Obtained results will be used to improve a mathematical model of the concentrated solar power plants, which provides the expected performance of the plant.

ANSYS software has been used to perform all CFD simulations. Different simulations are required to be performed, depending on the usage of the tank (hot storage and cold storage), the salt level, the insulation thicknesses, the temperature of the inert gas, the ambient temperature or the heat transfer coefficient among the main parameters that influence the thermal performance.

1.- INTRODUCCIÓN

Atendiendo al panorama energético mundial y la obsolescencia de métodos de generación eléctrica mediante la utilización de combustibles fósiles, queda patente la necesidad de desarrollar tecnológicamente nuevas formas de producir energía de una forma sostenible, tanto para el medio ambiente como en el ámbito económico. La principal desventaja actualmente de las tecnologías disponibles es la discontinuidad en la producción, que va ligada con la dificultad (muchas veces



imposibilidad) para almacenar grandes cantidades de energía eléctrica, además de representar un sobrecoste económico muchas veces inasumible, haciendo el uso de esta tecnología inviable e incitando a los inversores a utilizar tecnologías convencionales para la generación de electricidad [1].

Una de las tecnologías disponibles para la generación termoeléctrica limpia es la de concentración solar o termosolar. Existen principalmente cuatro tipos de centrales termosolares: de receptor central en torre, de canales parabólicos, de disco parabólico y lineal de fresnel [2]. La disposición más investigada y la más utilizada en centrales actuales es la de canales parabólicos, ya que ha demostrado ser la más eficiente y la que provoca menos problemas a la hora de su instalación [3]. Esta tecnología se basa en la reflexión de los rayos solares en un espejo cilíndrico-parabólico, que concentra los rayos solares en su punto focal donde se localiza una tubería con un recubrimiento especial para aumentar su absorptividad por la que circula un fluido denominado HTF por sus siglas en inglés (Heat Transfer Fluid). Para evitar las pérdidas de calor por el tubo que recibe la radiación, este va encapsulado en un tubo de vidrio al que se le realiza el vacío. El fluido a alta temperatura es utilizado para generar el vapor que alimenta a la turbina de un ciclo Rankine. En la figura 1 se muestra el esquema de funcionamiento de una central termosolar con almacenamiento de energía [4].

Este tipo de plantas tiene el problema de la discontinuidad en la producción, como todas las tecnologías que dependen en cierta medida de la climatología, como se mencionó con anterioridad. Existe una solución para este tipo de centrales que se lleva implementando satisfactoriamente en muchas obras. La tecnología consiste en sobredimensionar el campo solar para producir mucha más energía térmica de la necesaria para generar vapor para la turbina. La energía térmica restante es utilizada para calentar una corriente de sales fundidas proveniente de un tanque a baja temperatura, que es almacenada en un tanque a alta temperatura. Cuando la radiación solar incidente (DNI, por sus siglas en inglés) no es suficiente para producir vapor con el HTF (durante la noche o en días nublados), se utiliza el calor almacenado en las sales para generar vapor que mueve la turbina. Esta disposición permite tener una producción mucho más estable gracias al almacenamiento de energía en forma de calor, a la vez que no presenta los problemas y sobrecostes asociados al almacenamiento de energía eléctrica [5].

Para tener un mejor control de las plantas y poder predecir el comportamiento de las mismas se desarrolla un modelo o simulación matemática. En este modelo se incluyen todas las variables que puedan afectar al comportamiento de la planta. Una de esas variables, necesaria para calcular el rendimiento de la central, es el calor que pierden los tanques de almacenamiento de sales hacia la atmósfera. Debido a la alta temperatura de las sales, el fenómeno de transmisión de calor será muy acentuado, afectando negativamente a los rendimientos de la central. Además, es importante que la temperatura de las sales nunca sea menor a la temperatura de solidificación, ya que las sales al solidificar sufren una expansión volumétrica que podría resultar en el colapso del tanque.

El trabajo a realizar será por tanto cuantificar las pérdidas térmicas del tanque de sales fundidas en función de distintos parámetros. En cuanto a la geometría, se tomará como referencia la central de La Africana. La central de la africana es una central termosolar con 50MW de potencia instalada. Está ubicada en Córdoba, España y fue construida en

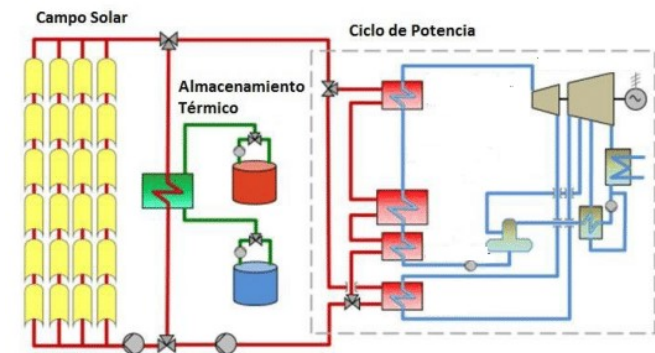


Figura 1. Esquema de una central termosolar con almacenamiento térmico



2012. Dispone de almacenamiento de sales con autonomía para 8 horas de funcionamiento [6].

Se realizarán simulaciones para distintos espesores de aislamiento, así como para distintos niveles (altura) de las sales fundidas en el tanque. Se realizan también estudios para distintas temperaturas ambientales, así como para distintos coeficientes de película exterior. Para las simulaciones realizadas ha de tenerse en cuenta que el tanque está provisto de una atmosfera inerte de nitrógeno, así como la existencia del fenómeno de estratificación de temperaturas debido a las grandes dimensiones del tanque.

2.- MODELIZACIÓN

A continuación, se describen los modelos que se han empleado para obtener los resultados. Se parte del modelo físico de los tanques reales, con los datos disponibles, y se realiza a partir de él un modelo asumible para cálculos numéricos.

2.1.- DESCRIPCIÓN DE LOS TANQUES

Los tanques de sales han sido diseñados según la norma API-650 [7] y ASME VIII Div.2 [8], siguiendo ambos la misma tipología constructiva. Se construyen en chapa de acero soldada de distintos espesores. Para la base se utiliza un anillo central que soporta las cargas de momento transmitidas por la envolvente. El resto de la base se construye con chapas de menor espesor. En cuanto a la envolvente, se realiza en chapas de mayor espesor para la zona más próxima a la base y de menor espesor para las zonas más próximas al techo. Este último se realiza en chapa de reducido espesor.

Para la cimentación, se realiza una zapata de hormigón refractario sobre la que apoya el anillo central del tanque ya que este material, además de presentar unas buenas cualidades mecánicas, posee una baja transmitancia térmica. El principal objetivo de la cimentación es evitar posibles asentamientos que puedan producir un colapso del tanque. Para el resto de la base se utiliza un relleno de arcilla expandida (Arlita), de 2 metros de profundidad y de muy baja conductividad térmica,

para minimizar las pérdidas de calor del tanque hacia el terreno.

Para evitar pérdidas de calor por el lado de la cimentación que queda expuesto al ambiente, se coloca una lámina aislante de fibra de vidrio recubierta por una chapa de acero. Respecto a la envolvente del tanque y a su techo, estos están recubiertos de aislante de lana de roca de 300 mm de espesor para reducir al máximo las pérdidas térmicas. En la figura 2 se pueden observar todas las capas que componen el tanque.

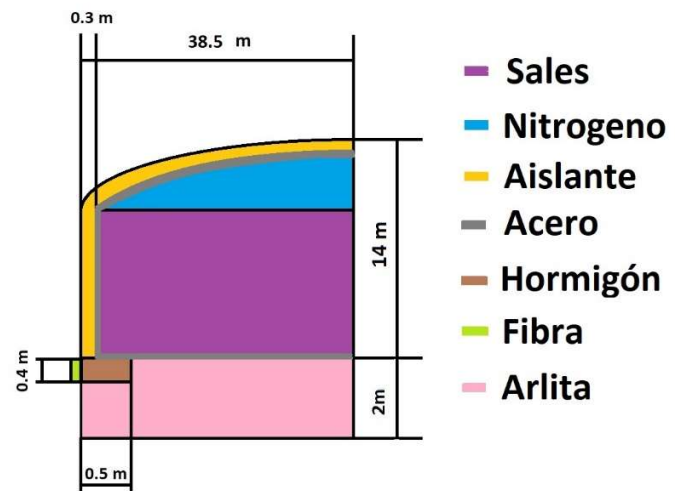


Figura 2. Esquema del tanque

Los tanques disponen también de un anillo de distribución de sales, que es el encargado de inyectar el flujo de sales hacia el interior del tanque. El sistema consta de un anillo central que dispone de 10 inyectores por donde se libera la sal hacia el tanque (figura 3). Los tanques disponen también de un sistema de atmosfera inerte de nitrógeno, para evitar que, en el caso de que hubiera una fuga de HTF y este se mezclara con las sales, pudiera llegar a entrar en combustión con el oxígeno del aire en los tanques. El sistema opera de forma que, al estar un tanque en proceso de llenado, el volumen de nitrógeno desplazado por las sales es conducido al tanque que está en proceso de vaciado.

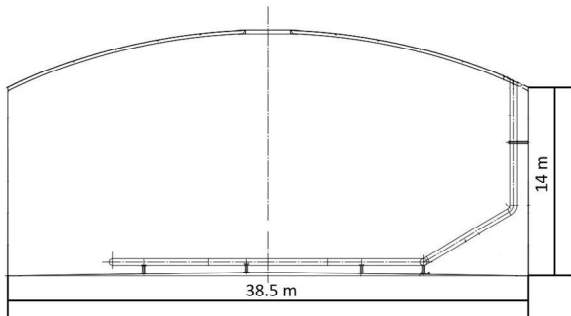


Figura 3. Vista general del tanque de acero.

2.2.- DOMINIO DE SIMULACIÓN

El software empleado para el modelado de la geometría es el programa SpaceClaim del paquete ANSYS Workbench. Se realiza un modelado en 2 dimensiones, pues el tanque se puede tratar como un caso axisimétrico.

El modelo detallado de la estructura metálica del tanque se ha realizado para poder ser utilizado en futuros cálculos estructurales de fatiga, no siendo necesario tanto nivel de detalle para los cálculos de transmisión de calor presentados en este proyecto. A continuación, se modela tanto la base aislante de Arlita como la cimentación y las capas de suelo que se incluirán en el cálculo. El dominio de simulación escogido para el suelo es de 30 metros de profundidad y 50 metros de ancho. Esto permitirá capturar todos los fenómenos de transmisión de calor producidos por el tanque en el terreno más próximo. El dominio escogido corresponde a simulaciones similares realizadas en la empresa.

Por último, se modela el aislante de lana de roca exterior. Se realizan 4 capas del mismo. La primera, de 300mm es el espesor original de los tanques, y cada una de las otras 3 capas son 100mm adicionales de aislamiento para simular casos con distintos espesores y observar la influencia del mismo en las pérdidas de calor.

En el programa de modelado geométrico se realiza también una partición del interior del tanque en 5 niveles, nombrados como base, niveles 1, 2 y 3, y techo. El nivel base se corresponde con la

altura mínima de sales de funcionamiento del tanque, mientras que el nivel techo estará lleno siempre de la atmosfera inerte. Estas divisiones permitirán variar el nivel de sales en el tanque.

Se realizan también divisiones en el resto de los recintos con el objetivo de simplificar al máximo la geometría de cada región para que el mallado sea de mayor calidad.

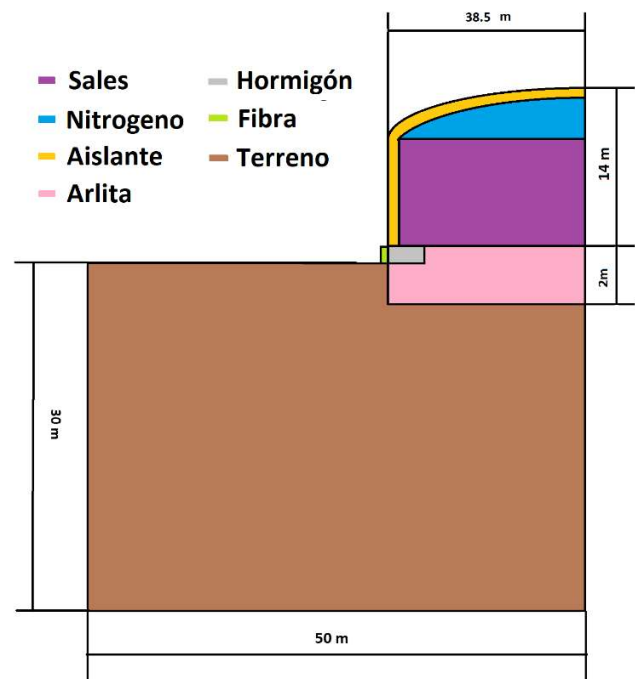


Figura 4. Regiones del dominio de simulación

Para estas simulaciones se ha tomado la decisión en simplificar la geometría según se explica a continuación. Para el cálculo estacionario se ha eliminado el anillo de distribución de sales, que es el sistema por donde se introducen las sales en el tanque, mientras que en el cálculo transitorio se mantiene debido a su necesidad para la simulación, pero se evita incluir en este caso la estructura metálica del tanque a fin de tener un coste computacional menor y debido a que su influencia en la transmisión de calor es despreciable.



2.3.- MALLADO

El siguiente paso es generar la malla. El programa de elementos finitos resolverá las ecuaciones en cada celda de la malla, realizando iteraciones hasta converger los resultados.

Para lograr una buena convergencia de la solución es necesario disponer de una buena malla. Esto se logra escogiendo finamente los parámetros de la malla dependiendo del tipo de problema que se vaya a resolver.

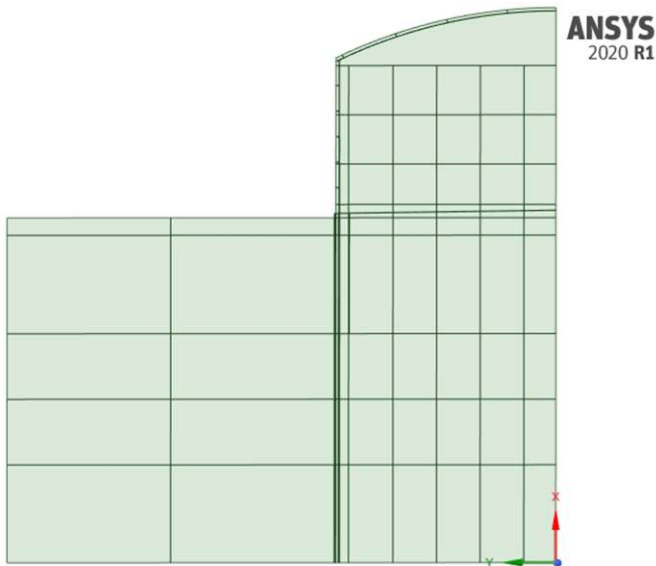


Figura 5. Particiones en la geometría para simplificar el mallado

Existen también una serie de marcadores que permiten controlar la calidad de la malla generada. Los más importantes son la OQ (ortogonal quality), que mide los ángulos entre caras de celdas adyacentes respecto a los óptimos, y el Skewness, que mide la asimetría de las celdas. Los rangos aceptables para problemas CFD a resolver en Fluent se muestran en la figura 6 [9].

Skewness mesh metrics spectrum					
Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Inacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Orthogonal quality mesh metrics spectrum					
Inacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Figura 6. Rango para los parámetros Skewness y Orthogonal Quality

El programa de mallado de Ansys proporciona las estadísticas de la malla indicando la cantidad de elementos que se encuentran en cada rango de los parámetros anteriormente descritos. Esto se muestra en las figuras 7 y 8.

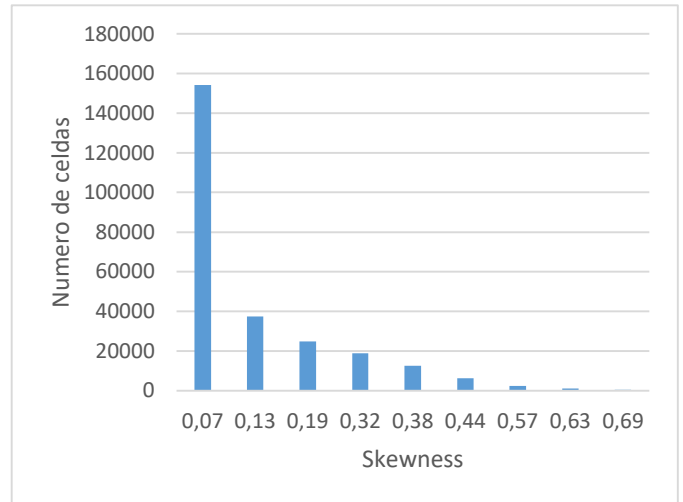


Figura 7. Parámetro Skewness en la malla generada

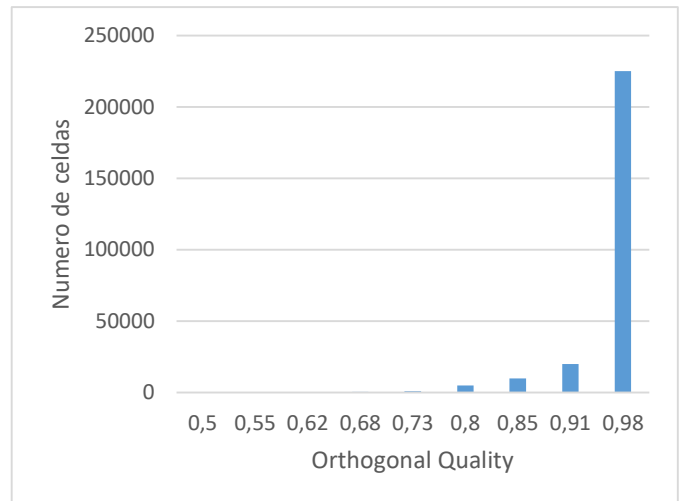


Figura 8. Parámetro Orthogonal Quality en la malla generada

Los parámetros que ocasionan una malla deficiente pueden ser de origen geométrico, como ejes pequeños, agujeros o ángulos muy pronunciados. Otra fuente de errores en la calidad de la malla es un uso incorrecto de los parámetros de mallado, como puede ser un tamaño de elemento demasiado grande, o una relación de



aspecto demasiado elevada. En la figura 9 se muestra un detalle de la mallada generada para resolver el problema. Cabe destacar que no ha sido necesaria la realización de un estudio de mallado, ya que se han realizado estudios similares en la empresa con anterioridad y se ha adoptado el tamaño de malla más adecuado para cada caso.

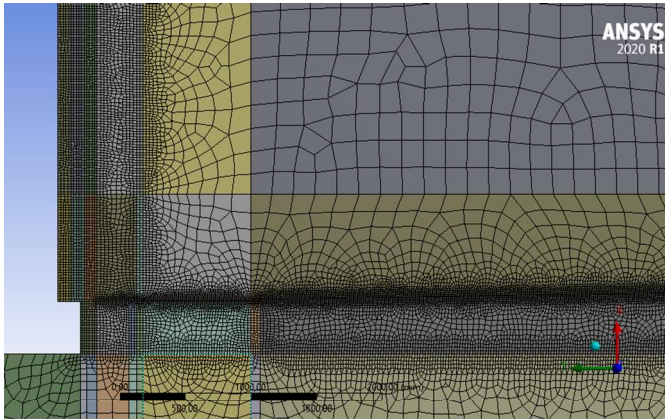


Figura 9. Detalle de la malla del problema

2.4.- MODELADO EN FLUENT

La simulación se realiza como un caso axisimétrico, ya que todos los planos tomados desde el eje central del tanque son idénticos y por tanto bastaría con realizar la simulación de uno de ellos y se obtendrán los resultados para el conjunto del tanque. Esto nos ha permitido simplificar la geometría en dos dimensiones y reducir el tiempo computacional.

Respecto a los modelos utilizados, se emplean el modelo multifase y modelización de turbulencia. A continuación, se describe cada uno de ellos, indicando las ecuaciones diferenciales resueltas.

El modelo multifase utilizado es el modelo VOF (Volume Of Fluid). En este modelo se pueden modelar dos o más fluidos inmiscibles, resolviendo tres ecuaciones. La ecuación de fracciones volumétricas (1), donde \dot{m}_{pq} es el flujo másico de la fase q a la fase p y \dot{m}_{qp} es el flujo másico de la fase p a la fase q . El termino fuente S_{α_q} es nulo excepto si existe un flujo externo para alguna de las fases definido por el usuario. La ecuación del

momento (2), que depende de todas las fracciones volumétricas y la ecuación de la energía (3).

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (3)$$

Respecto al modelo de la energía, esta se aplica en la forma que se expone en la ecuación 4, donde k_{eff} es la conductividad efectiva ($k+k_t$), k_t es la conductividad térmica turbulenta, definida mediante el modelo de turbulencia elegido, \vec{J}_j es el flujo difusivo de las especies j . En el lado derecho de la ecuación, los términos corresponden a la transmisión de calor debidos a la conducción, la difusión de las especies y la disipación viscosa. El termino fuente S_h incluye las fuentes de calor definidas por el usuario y las debidas a reacciones químicas.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (4)$$

Respecto al modelo de turbulencia utilizado se ha escogido el modelo SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$, que es válido para casos generales de turbulencia, pero aporta una mayor precisión que el modelo realizable $k-\epsilon$ en las capas límites [9].



Las ecuaciones 5 y 6 describen el modelo de turbulencia empleado, donde \tilde{G}_k representa la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidad media y G_ω se refiere a la generación del parámetro ω . Γ_k y Γ_ω representan la difusividad efectiva de los parámetros k y ω respectivamente. Y_k y S_k representan la disipación de los parámetros k y ω debida a la turbulencia. S_k y S_ω se corresponden a términos fuentes definidos por el usuario.

$$\frac{\partial}{\partial t}(pk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(pku_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(p\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(p\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

Se introducen las propiedades de todos los materiales y posteriormente se asigna a cada zona definida el material que le corresponde. Tras esto, se establecen las condiciones de contorno del problema. Se establece la condición de convección térmica, tanto para la superficie exterior del tanque como para la superficie del suelo expuesta al ambiente. Se parametrizan tanto la temperatura ambiental como el coeficiente de película exterior para realizar posteriormente un estudio con parámetros distintos. Para la superficie inferior del suelo se establece una condición de temperatura constante, que es la proporcionada por los estudios geológicos.

Respecto a los controles de convergencia de la solución se crea un gráfico en el que se representa la temperatura de la superficie exterior del tanque frente al número de iteración. Esto, junto a los valores de los residuos, permite observar su convergencia.

Antes de comenzar la resolución del problema es necesario realizar una inicialización de las variables. En este paso se inicializan todas las zonas a una temperatura uniforme y el volumen del tanque ocupado enteramente de nitrógeno.

Posteriormente mediante la herramienta patch se establece para caso calculado los distintos niveles de sales en el tanque, así como las temperaturas de las mismas, dependiendo de si es el tanque de sales calientes o el tanque de sales frías.

Para la resolución del problema en régimen permanente se opta por realizar un análisis pseudo-transitorio, ya que permitirá estabilizar la solución y alcanzar la convergencia en menos tiempo.

2.5.- PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Es necesario disponer de las propiedades, tanto térmicas como mecánicas, de los materiales para poder realizar los análisis pertinentes. Al ser la temperatura un parámetro de gran peso en la simulación, se deben de considerar las propiedades de los materiales variables con la temperatura. Para el acero se utilizan las propiedades proporcionadas por la norma ASME II Part. D [8] en función de la temperatura. El material utilizado en el tanque de sales calientes es el SA-240-347H, aleación 18Cr-10Ni-Cb mientras que para el tanque de sales frías se utiliza el SA-516 Gr.70, aleación de acero al carbono. Las propiedades de ambos aceros utilizadas en el cálculo obtenidas de la norma ASME, se incluyen en la tabla 2.

Las propiedades térmicas y mecánicas tanto del aislante como de la arcilla expandida en función de la temperatura son proporcionados por el fabricante en su ficha técnica. En esta, aparecen los datos relativos a la conductividad térmica a distintas temperaturas para el aislante (tabla 1) y para la arcilla expandida (tabla 2).

Tabla 1. Conductividad térmica de la lana de roca.

Temperatura (°C)	50	150	250	350
Conductividad térmica (W/mK)	0.040	0.050	0.070	0.095



Tabla 2. Conductividad térmica de la Arlita

Temperatura (°C)	20	100	≥200
Conductividad térmica (W/mK)	0.11	0.19	0.23

Las propiedades características del suelo se toman de estudios geotécnicos realizados previamente a la construcción de la central. En el estudio, encargado por TSK, se proporcionan datos relativos a la conductividad térmica a distintas profundidades, que serán implementados en el modelo.

Respecto a las sales fundidas a altas temperaturas, sus propiedades se obtienen de un estudio que la empresa ha encargado a un laboratorio. Se dispone de su densidad, calor específico, conductividad térmica y viscosidad dinámica para un amplio rango de temperaturas.



Tabla 3. Datos obtenidos de ASME para los aceros empleados en la construcción del tanque

T (°C)	SA-516 Gr.70					SA-240-347H				
	$\alpha \times 10^{-6}$ (m/mK)	λ [W/mK]	$\kappa \times 10^{-6}$ (m ² /s)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kgK)	$\alpha \times 10^{-6}$ (m/mK)	λ [W/mK]	$\kappa \times 10^{-6}$ (m ² /s)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kgK)
20	15,3	60,4	18,1	7750	431	11,5	14,1	3,57	7750	510
50	15,6	59,8	17,03	7750	453	11,8	14,6	3,64	7750	518
75	15,9	58,9	16,27	7750	467	11,9	15	3,69	7750	525
100	16,2	58	15,6	7750	480	12,1	15,4	3,75	7750	530
125	16,4	57	15	7750	490	12,3	15,7	3,8	7750	533
150	16,6	55,9	14,43	7750	500	12,4	16,1	3,86	7750	538
175	16,8	54,7	13,9	7750	508	12,6	16,5	3,92	7750	543
200	17	53,6	13,4	7750	516	12,7	16,8	3,98	7750	545
225	17,2	52,5	12,9	7750	525	12,9	17,2	4,05	7750	548
250	17,4	51,4	12,42	7750	534	13	17,6	4,11	7750	553
275	17,5	50,3	11,95	7750	543	13,2	17,9	4,16	7750	555
300	17,7	49,2	11,48	7750	553	13,3	18,3	4,22	7750	560
325	17,8	48,1	11,01	7750	564	13,4	18,7	4,28	7750	564
350	17,9	47	10,55	7750	575	13,6	19	4,33	7750	566
375	18	45,9	10,1	7750	586	13,7	19,4	4,39	7750	570
386	18,044	45,46	9,902	7750	592	13,744	19,532	4,412	7750	571
400	18,1	44,9	9,65	7750	600	13,8	19,7	4,44	7750	573
425	18,2	43,8	9,2	7750	614	14	20,1	4,5	7750	576
450	18,3	42,7	8,77	7750	628	14,1	20,5	4,55	7750	581
475	18,4	41,6	8,34	7750	644	14,2	20,8	4,61	7750	582
500	18,4	40,5	7,92	7750	660	14,4	21,2	4,66	7750	587
525	18,5	39,3	7,51	7750	675	14,5	21,5	4,72	7750	588
550	18,6	38,2	7,1	7750	694	14,6	21,9	4,78	7750	591
575	18,7	37	6,71	7750	712	14,7	22,2	4,84	7750	592
600	18,8	35,8	6,31	7750	732	14,8	22,6	4,9	7750	595



2.6.- CONDICIONES DE CONTORNO Y DE OPERACIÓN

Las condiciones bajo las que operan los tanques son de una importancia relevante a la hora de calcular las pérdidas de calor de los mismos. Los lugares más idóneos para la instalación de una central termosolar son emplazamientos que dispongan de una alta radiación solar, generalmente sometidos a climas extremos con altas temperaturas ambientales. Esto se ve reflejado en informes estructurales de las plantas en los que se toma como referencia para los cálculos una temperatura ambiental media de 30°C. Esta será por tanto la temperatura media que se tomará para evaluar la convección exterior de los tanques.

Otro factor a tener en cuenta en la envolvente es el coeficiente de película en el exterior del tanque. Se indica en un informe de IDONIAL que el coeficiente medio de película en la envolvente del tanque para estos casos resulta ser de 10 W/m²K.

Respecto a las condiciones del terreno, se obtienen los datos necesarios de un estudio geológico realizado en el emplazamiento de la central previo a su construcción. En el informe se detallan la conductividad térmica del terreno y la temperatura del mismo a distintas profundidades. Estos datos son muy necesarios para calcular las pérdidas térmicas por el terreno.

Otro factor muy influyente serán las condiciones de operación de los tanques. Según los datos de proyecto el tanque de sales frías opera a una temperatura de 386°C, mientras que el tanque de sales calientes lo hace a una temperatura de 565°C.

3.- RESULTADOS

A continuación, se analizan los resultados obtenidos del estudio paramétrico y los distintos modelos.

3.1.- MODELO ANALÍTICO

Con el fin de contrastar los resultados del análisis numérico, se realiza un sencillo modelo del tanque. El modelo se trata de un cilindro del mismo diámetro del tanque y un techo circular sin curvatura. A continuación, se describe como se calculan las pérdidas de calor por la envolvente, por el techo y por el suelo.

Respecto a las pérdidas de calor en la envolvente, estas se calculan con la ecuación de transmisión de calor (7) por una pared cilíndrica.

$$\dot{Q}_{envolvente} = \frac{T_{sal} - T_{ext}}{\frac{1}{h_e} + \frac{\frac{D}{2} + e}{K_{aislante}} \cdot \ln\left(\frac{D + 2 \cdot e}{D}\right)} \cdot A \quad (7)$$

Para esta aproximación se supone que la temperatura de la pared interior del cilindro es la misma que la temperatura de las sales. Las propiedades de los materiales se toman a la temperatura media entre la temperatura exterior del tanque y la temperatura de las sales. Se obtiene así el flujo de calor por unidad de superficie en la envolvente.

El flujo de calor transmitido por el techo se calcula con la ecuación general de transmisión de calor a través de una pared plana (8).

$$\dot{Q}_{techo} = \frac{T_{sal} - T_{ext}}{\frac{1}{h_e} + \frac{e}{K_{aislante}}} \cdot A \quad (8)$$

En cuanto al flujo de calor por el suelo, se calcula de nuevo con la ecuación general de transmisión de calor a través de una pared plana (9), que en este caso incluye la Arlita aislante y una capa general de suelo.

$$\dot{Q}_{suelo} = \frac{T_{sal} - T_{\infty,soil}}{\frac{e_{arlita}}{K_{arlita}} + \frac{e_{soil}}{K_{soil}}} \cdot A \quad (9)$$



En la tabla 4 se recogen los flujos de calor totales en cada superficie obtenidos en el cálculo analítico, así como las pérdidas de calor totales en el tanque.

Tabla 4. Flujos de calor en el cálculo analítico

	$\dot{Q}_{envolvente}$ (KW)	\dot{Q}_{techo} (KW)	\dot{Q}_{suelo} (KW)	\dot{Q}_{total} (KW)
Tanque caliente	239	163	71	473
Tanque frío	121	81	48	250

3.2.- MODELO NUMÉRICO ESTÁTICO

A continuación, se exponen y comparan los diferentes casos simulados, permitiendo observar la influencia de distintos parámetros en la geometría.

3.2.1.- MODELO TEMPERATURA UNIFORME

El primer modelo que se realiza consta de simular el tanque caliente, así como el tanque frío, utilizando para la fase de nitrógeno la misma temperatura que la de las sales. Se realizan simulaciones para distintos niveles de altura de sales.

Los resultados obtenidos para la mayor altura de sales (tabla 5) serían los que más se aproximarían a los resultados del modelo analítico debido a que en este se ha tenido en consideración una temperatura uniforme en toda la superficie del tanque.

Tabla 5. Flujos de calor del análisis numérico con llenado completo

	$\dot{Q}_{envolvente}$ (KW)	\dot{Q}_{techo} (KW)	\dot{Q}_{suelo} (KW)	\dot{Q}_{total} (KW)
Tanque caliente	240	158	79	477
Tanque frío	126	86	48	260

Como podemos observar en las figuras 10 y 11, tanto para el tanque caliente como para el frío, las pérdidas de calor difieren de forma leve. Esto es debido a las propiedades de los materiales y las condiciones de contorno. Las propiedades de lana de roca dependen de la temperatura, y la herramienta de análisis numérico permite integrar dichas propiedades en cada sección del aislante a temperaturas distintas, mientras que en el cálculo analítico se evalúan a la temperatura media.

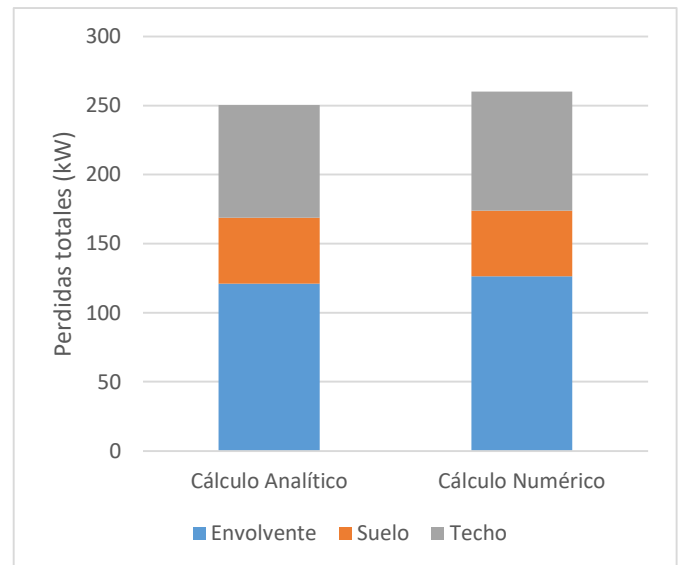


Figura 10. Comparación de pérdidas para el tanque frío

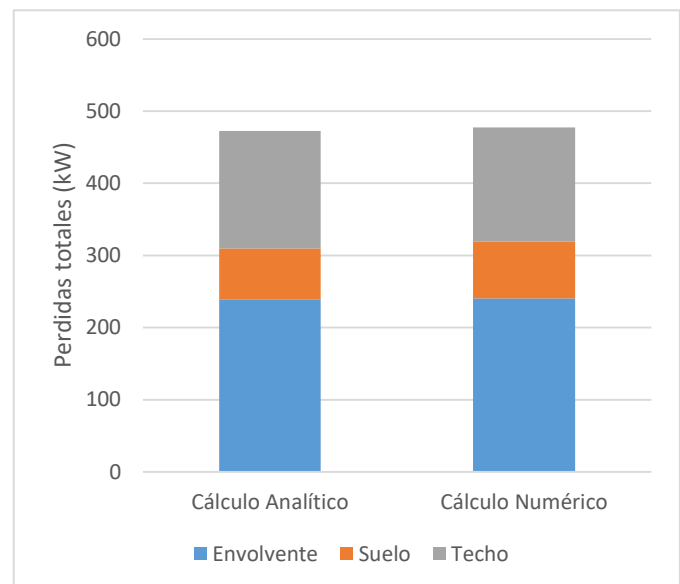


Figura 11. Comparación de pérdidas para el tanque caliente



Otro factor que influye en este resultado es que en el cálculo analítico solo se ha tenido en cuenta en el suelo, el flujo de calor desde el tanque hacia la profundidad del suelo, en una dirección. En la realidad, el flujo de calor del tanque por el suelo se expandirá también en la dirección horizontal hacia la superficie libre del suelo. Esto puede comprobarse en el mapa de contornos de temperaturas obtenido de la simulación (figuras 12 y 13).

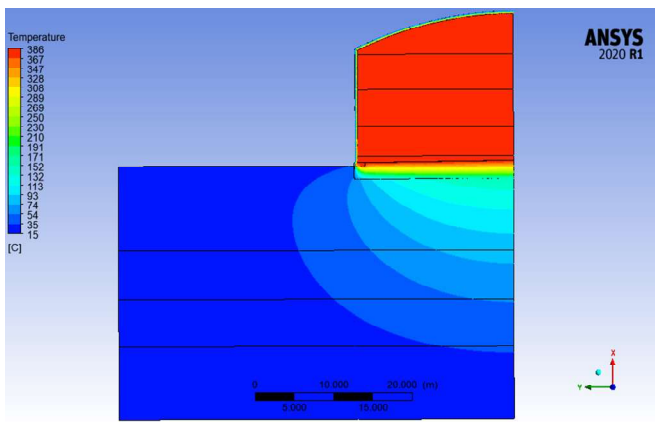


Figura 12. Contorno de temperaturas del tanque frío a plena carga. Vista general

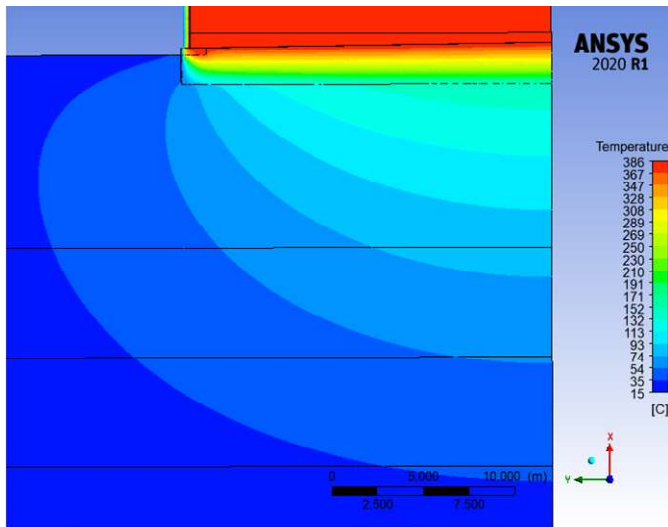


Figura 13. Contorno de temperaturas del tanque frío a plena carga. Vista detalle del terreno

Como puede observarse en las figuras 12 y 13 el flujo de calor hacia el suelo provoca que se eleve la temperatura del mismo. Al ser este hecho de importancia para el estudio civil de la cimentación de los tanques se obtiene de la simulación las figuras 14 y 15, donde se representa la temperatura del suelo respecto a su profundidad, tanto para el tanque caliente como el frío. Cabe destacar que, como se puede observar en el perfil de temperatura, la caída inicial de la misma es más pronunciada debido al aislamiento de Arlita de la base del tanque.

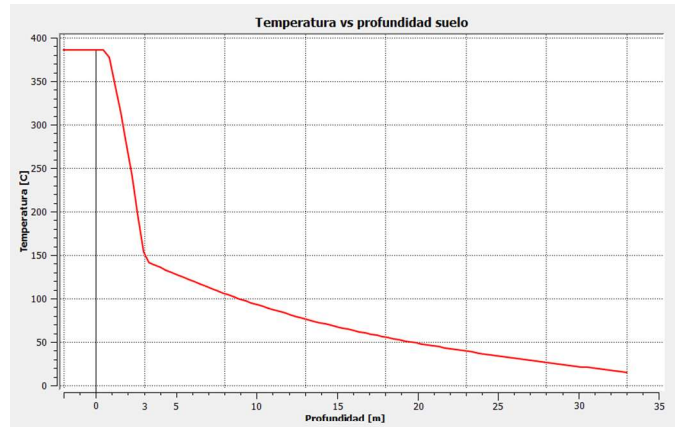


Figura 14. Perfil de temperaturas en el terreno para el tanque frío tomado en el centro del mismo

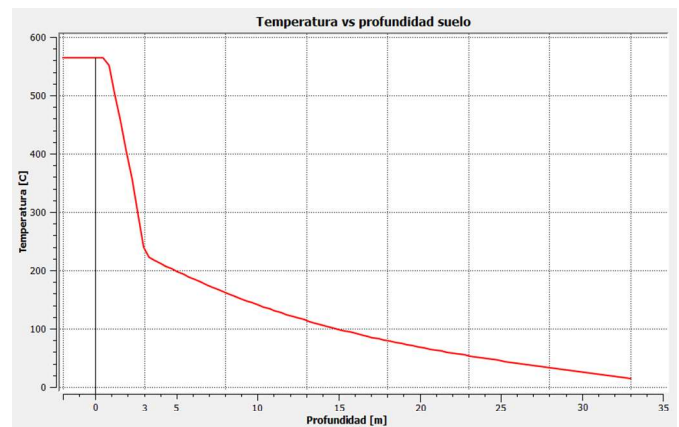


Figura 15. Perfil de temperaturas en el terreno para el tanque caliente tomado en el centro del mismo



Se obtiene también el perfil de temperaturas en el espesor del aislante (figuras 16 y 17), para corroborar que las propiedades del mismo se están tomando variables con la temperatura. Si la conductividad térmica fuera constante el perfil sería lineal, sin embargo, al variar con la temperatura podemos observar que es un perfil parabólico. Es por esto por lo que existe una pequeña diferencia entre el cálculo analítico y el numérico.

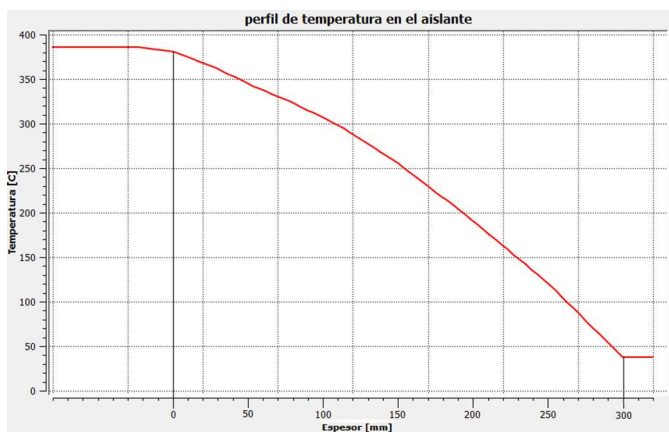


Figura 16. Perfil de temperaturas en el aislante para el tanque frío.

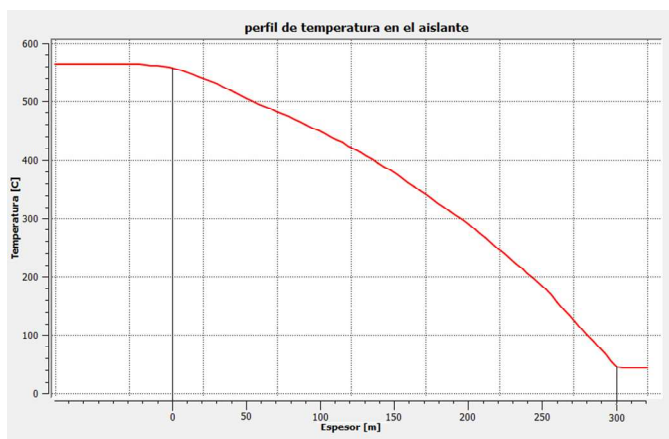


Figura 17. Perfil de temperaturas en el aislante para el tanque caliente.

Tras el análisis detallado del contorno de temperaturas obtenido del cálculo numérico, se puede observar una zona de alta temperatura cerca de la cimentación, entre la placa de fibra de vidrio encargada de calorifugar la zapata de hormigón refractario y el aislante de lana de roca que rodea el tanque. Esto se muestra en la figura 18.

Desde el punto de vista de disminuir al máximo las pérdidas de calor al ambiente, dotando a la central de una mayor autonomía, sería interesante plantear un recubrimiento que minimice las pérdidas de calor por esta zona.

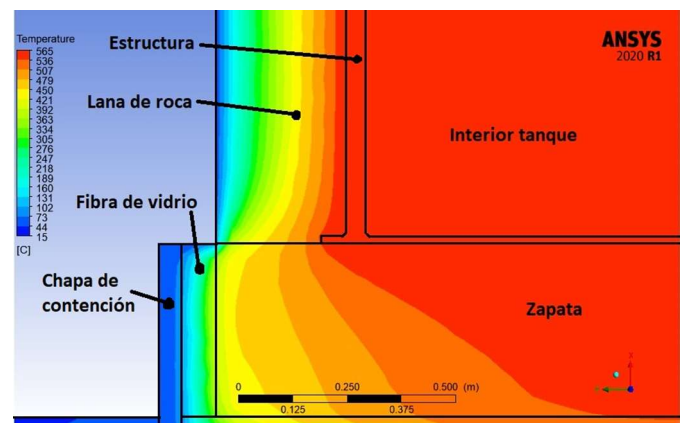


Figura 18. Detalle del puente térmico en la base del tanque caliente

3.2.2.- MODELO TEMPERATURA DIFERENTE ENTRE FASES

Debido a la gran diferencia de densidad energética por volumen entre las sales y el nitrógeno, se dan diferencias de temperatura entre ambas fases durante la carga y la descarga del tanque, ya que el nitrógeno del tanque que se carga es trasladado al tanque que descarga. Por esto, se realizan simulaciones que permitan estudiar las interacciones entre las fases, así como obtener en los distintos supuestos las pérdidas térmicas de los tanques.

Para la simulación se realizan dos supuestos: con la temperatura del nitrógeno a 250°C y a 100°C debido a que estas son las temperaturas de operación del nitrógeno en los tanques. En cada



supuesto se realizan simulaciones para 4 niveles de llenado del tanque caliente y del frío. Las pérdidas de calor obtenidas en cada uno de los 16 casos simulados se representan en la figura 19.

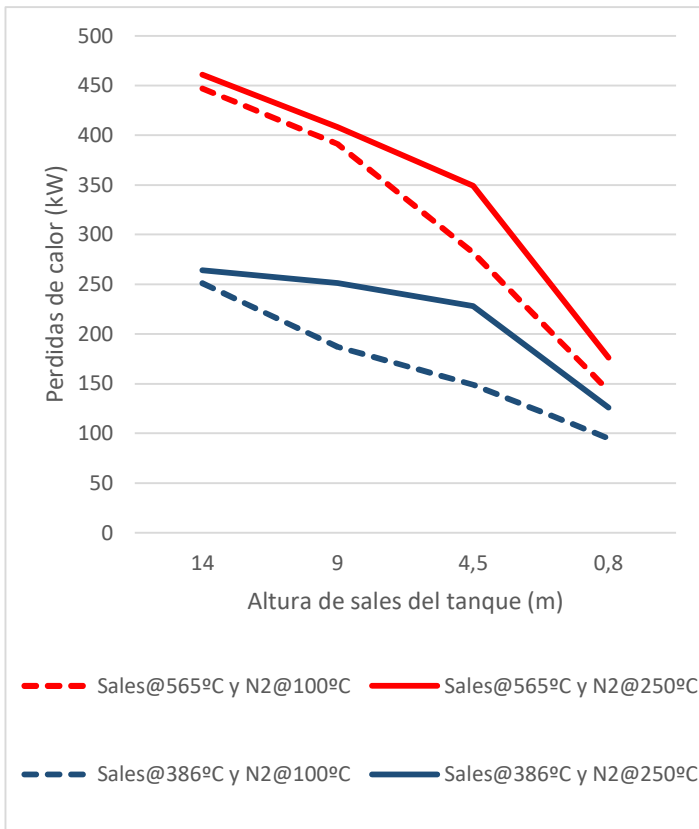


Figura 19. Pérdidas de calor frente a altura de sales y para distintas temperaturas de sales y nitrógeno

Como puede observarse en la figura 19, las pérdidas de calor disminuyen si lo hace el nivel de sales para todos los casos. Esto es debido a que el gas en contacto con las paredes del tanque pierde temperatura rápidamente, mientras que las sales tardan más. Por tanto, cuanto mayor superficie esté expuesta al gas y no a las sales, disminuirán las pérdidas térmicas. Cabe esperar también como se observa en la figura 19, que las pérdidas de calor sean mayores para el tanque caliente.

A continuación, se obtienen los contornos de temperatura, que permiten ver cómo se transmite el calor desde las sales hacia el nitrógeno. En las

figuras 20, 21, 22, 23 se observan los contornos de temperatura obtenidos para las alturas de sales de 0,8, 4,5, 9 y 14 metros, respectivamente. Como puede observarse en estas figuras, para una altura mayor de sales, será una mayor superficie del tanque la que esté expuesta a la temperatura de estas, que resulta mayor que la del nitrógeno y, por tanto, las pérdidas de calor serán mayores.

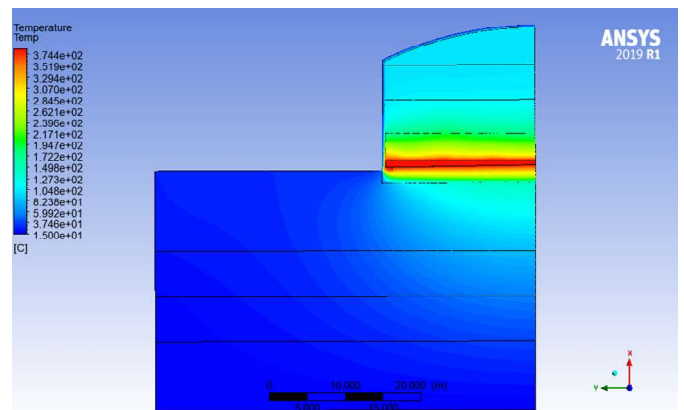


Figura 20. Contorno de temperaturas del tanque para 0.8 m de altura de sales

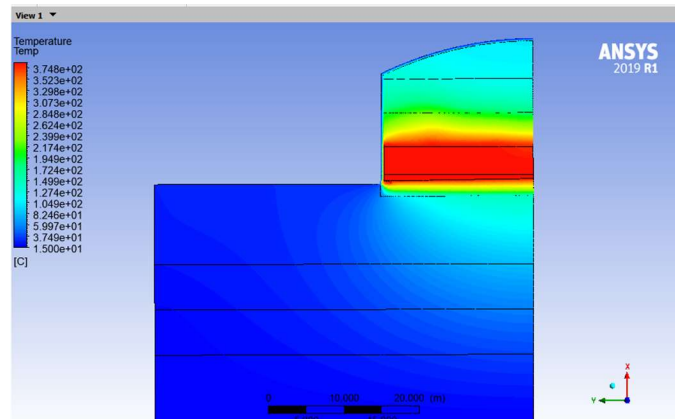


Figura 21. Contorno de temperaturas del tanque para 4.5 m de altura de sales

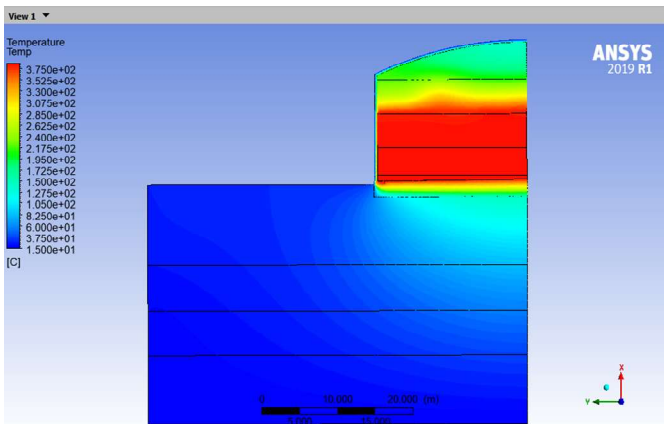


Figura 22. Contorno de temperaturas del tanque para 9 m de altura de sales

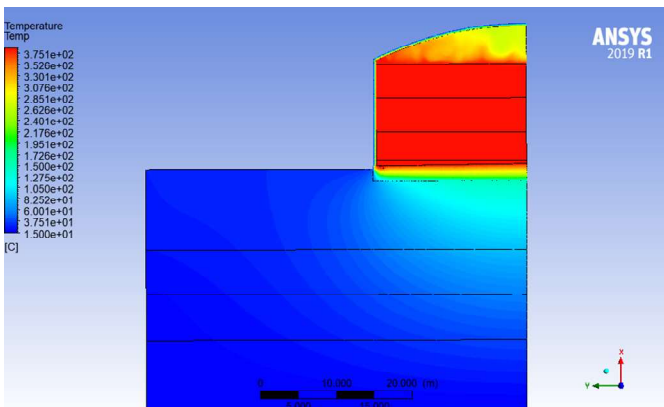


Figura 23. Contorno de temperaturas del tanque para 14 m de altura de sales

3.2.3.- MODELO CON DIFERENTES ESPESORES DE AISLAMIENTO

Se pretende realizar un estudio sobre la influencia de aumentar el espesor del aislamiento, determinando así las pérdidas térmicas totales en función del mismo. Se escoge aumentar el aislamiento original de 300 milímetros en otros 300, en tramos de 100 milímetros. Se obtienen así 3 casos de simulación adicionales al espesor original del aislante. Para cada espesor de aislamiento, se simulan los tanques frío y caliente.

En la figura 24 se observa la disminución de las pérdidas de calor conforme aumenta el espesor del aislamiento exterior del tanque. Al no ser una relación lineal, si no ligeramente exponencial, por cada capa extra de aislante que se añada, las pérdidas de calor evitadas serán menores que en la anterior capa. Es por esto que deberá encontrarse equilibrio entre las capas de aislamiento instaladas y las pérdidas de calor máximas que se pueden permitir en el tanque.

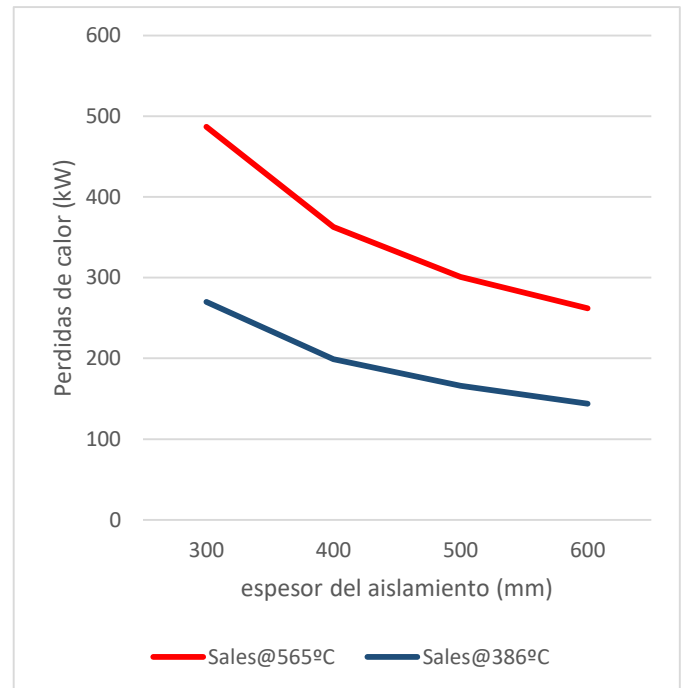


Figura 24. Disminución de las pérdidas de calor con los distintos espesores de aislamiento.

Para observar el comportamiento por separado de la envolvente, el techo y la cimentación, se representan los flujos de calor por estas zonas en función del espesor del aislamiento. Como se puede observar en la figura 25, el flujo de calor por la base de Arlita del tanque apenas varía. Esto es lógico ya que solo se ha variado el espesor del aislante instalado en la envolvente y en el techo.

Podemos observar también que para el caso de 600mm de aislante casi llega a igualarse el flujo de calor por la base del tanque con el flujo de calor por la envolvente y por el techo.

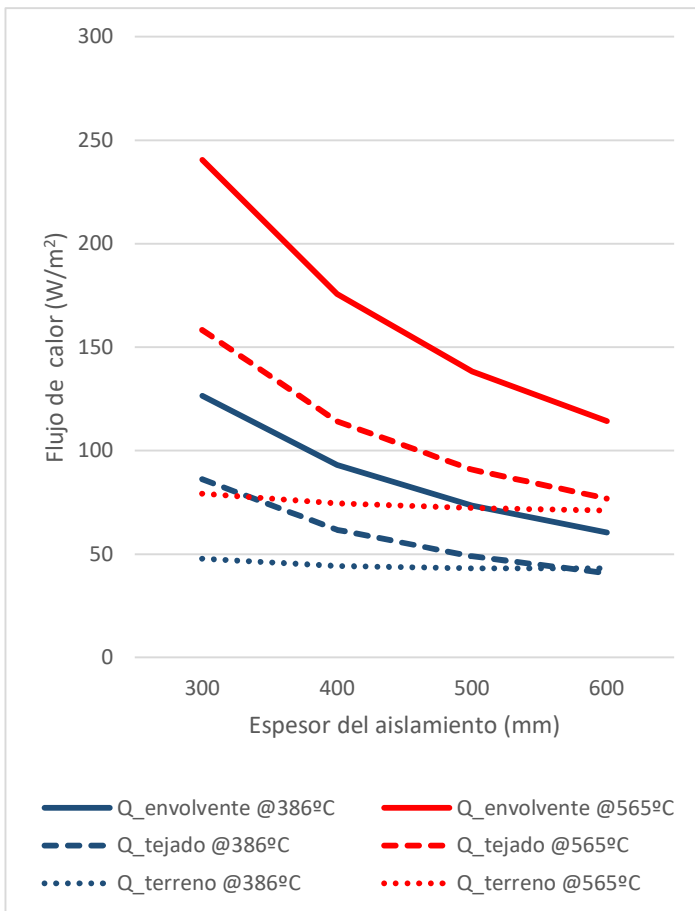


Figura 25. Evolución del flujo de calor para distintos valores de aislamiento.

Debido a la disminución de las pérdidas de calor al aumentar el espesor del aislante, es necesario realizar un estudio económico para determinar la rentabilidad de aumentar las capas de aislante para disminuir las pérdidas de calor.

A partir de las pérdidas térmicas de los tanques obtenidas de la simulación, puede obtenerse la producción anual prevista de la central mediante el modelo matemático utilizado en la empresa. También se conoce el coste del material, así como de la instalación de cada capa aislante, por lo que puede calcularse el coste final de la obra para los distintos casos de espesor del aislante y obtener un ratio que relacione la producción anual frente al coste final de la obra.

Este ratio se representa en la figura 26. Como puede observarse, no tiene una tendencia lineal, es decir, llegará un punto que, al aumentar el gasto en aislante, este gasto no se vea reflejado en un aumento de la producción energética anual de la planta.

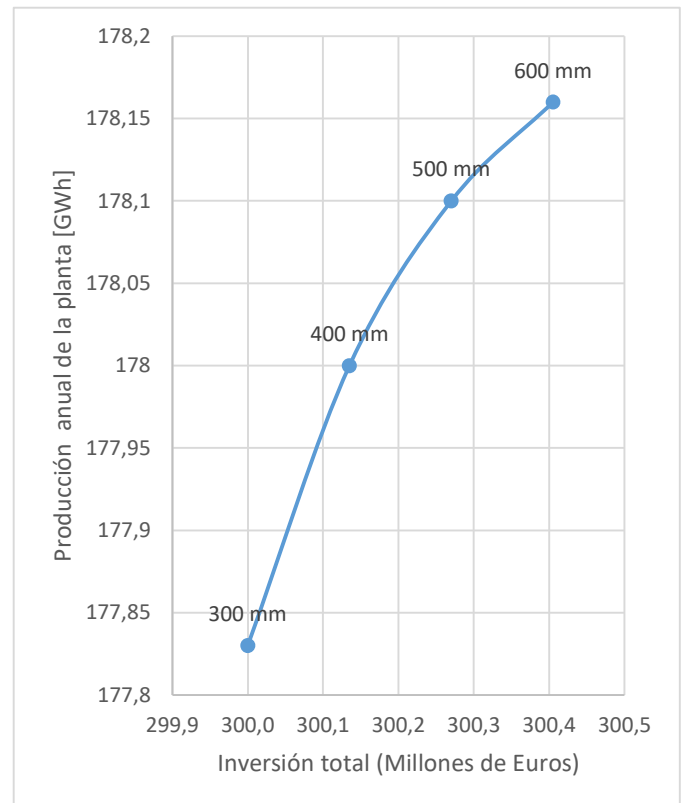


Figura 26. Producción de energía anual frente a inversión inicial en la planta

Con los datos económicos disponibles, se calcula también el incremento de ganancias anuales derivado de aumentar cada capa de aislante (a partir del incremento de producción anual de energía) y, comparándolo con la inversión inicial de instalar cada capa de aislante, se obtiene el Payback (formula 10), es decir, cuánto tiempo se tardaría en recuperar la inversión de instalar la capa extra de aislante.

$$Payback = \frac{Inversión}{Flujo de caja} \quad (10)$$



Como se aprecia en la tabla 6, al no tener una dependencia lineal las pérdidas de calor respecto al espesor del aislante, la tasa de retorno de la inversión aumenta conforme aumentan las capas añadidas de aislamiento.

Tabla 6. Inversión en aislante

Δ espesor (mm)	Δ presupuesto (EUR)	Δ energía (GWh/año)	Δ ganancias (EUR/año)	Payback (años)
100	135.059	0,17	20.400	6,6
200	270.119	0,27	32.400	8,3
300	405.178	0,33	39.600	10,2

3.2.4.- MODELO VARIANDO LA TEMPERATURA AMBIENTE

Otro de los parámetros que tiene una gran influencia en las pérdidas de calor es la temperatura del ambiente exterior. Se realiza, por tanto, un estudio en el que se varía este parámetro a fin de observar y cuantificar el impacto que una variación en las condiciones meteorológicas tendría sobre los tanques.

En el estudio se han realizado simulaciones para un rango de temperaturas ambientales asumibles para una localización tipo de una central termosolar. Los resultados de pérdidas de calor por la envolvente, el techo y el terreno se recogen en las tablas 7 y 8.

Tabla 7. Pérdidas de calor en el tanque caliente

Temperatura (°C)	$\dot{Q}_{envolvente}$ (KW)	\dot{Q}_{techo} (KW)	\dot{Q}_{suelo} (KW)	\dot{Q}_{total} (KW)
10	242	160	81	483
20	241	159	80	479
30	240	158	79	477
40	235	156	79	470

Tabla 8. Pérdidas de calor en el tanque frío

Temperatura (°C)	$\dot{Q}_{envolvente}$ (KW)	\dot{Q}_{techo} (KW)	\dot{Q}_{suelo} (KW)	\dot{Q}_{total} (KW)
10	131	88	49	268
20	129	85	49	263
30	126	86	48	260
40	125	83	48	254

Como puede observarse en los resultados expuestos en las tablas 7 y 8, se puede afirmar que la temperatura ambiental apenas tiene una leve influencia en las pérdidas de calor del tanque. A pesar de que la influencia es mínima observamos una tendencia decreciente en las pérdidas de calor conforme aumenta la temperatura exterior. Esto es debido a que el fenómeno de transmisión de calor va directamente ligado a la diferencia de temperaturas, en este caso, entre el ambiente exterior y las sales. Al ser esta diferencia de temperaturas de un orden muy superior a las variaciones estudiadas que podrían tener lugar en un ambiente natural, esta variación paramétrica apenas representa un ligero cambio en las pérdidas de calor ocasionadas en la envolvente.

Por otra parte, como puede observarse en las tablas 7 y 8, las pérdidas de calor por el suelo apenas varían. Esto es debido a que sólo se ha modificado en esta simulación la temperatura exterior, y por tanto las pérdidas al terreno se mantienen constantes.



3.2.5.- MODELO VARIANDO EL COEFICIENTE DE PELÍCULA EXTERIOR

Es necesario realizar un estudio sobre el coeficiente de película exterior del tanque, que se ve influenciado principalmente por la velocidad del viento incidente hacia el tanque. Pueden darse dos casos: en ausencia de viento el fenómeno operativo sería el de convección natural, y el coeficiente de película tendría valores muy bajos, mientras que si existe un viento incidente en los tanques el fenómeno que rige la transmisión de calor es la convección forzada, y, cuanto mayor sea la velocidad del viento incidente, más aumentará el coeficiente de transmisión de calor.

Con el objetivo de evaluar las pérdidas de calor bajo los dos fenómenos, el de convección natural, así como el de convección forzada, se realizan simulaciones haciendo variar el coeficiente de película desde 1 W/m²K hasta 100 W/m²K.

En la figura 28 se muestra la evolución de las pérdidas de calor para los distintos valores del coeficiente de película considerados en la simulación. Como puede observarse, para valores inferiores a 20 W/m²K el fenómeno de la convección es el que tiene mayor importancia en la transmisión de calor, debido a que es el que opone mayor resistencia a la misma. Esto se hace notar en una brusca variación de las pérdidas térmicas totales del tanque para valores del coeficiente de película comprendidos entre 1 y 20 W/m²K. Por encima del valor de 20 W/m²K para el coeficiente de película exterior, el factor limitante de la transmisión de calor es la conductividad térmica de la pared del tanque y por eso en la gráfica puede observarse como se estabiliza el valor de las pérdidas totales térmicas. Para observar mejor el fenómeno de convección natural se representan también en la figura 29 las pérdidas térmicas para valores comprendidos entre 1 y 20 W/m²K

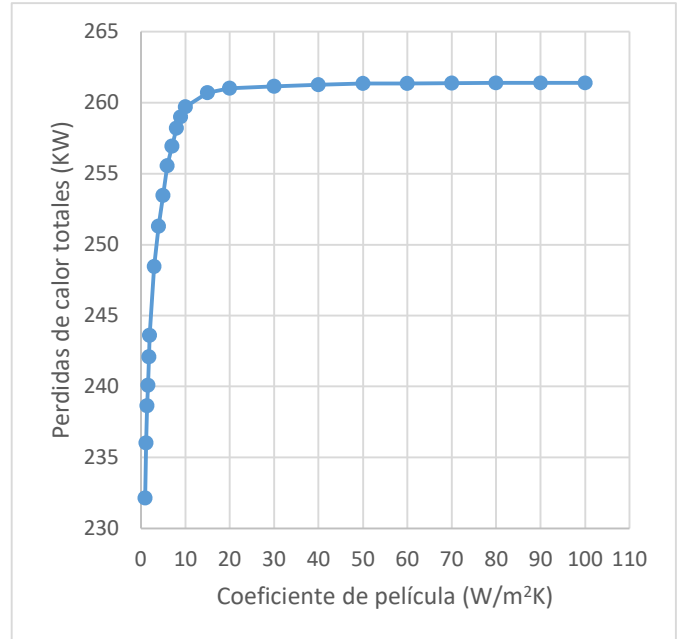


Figura 28. Perdidas de calor para el tanque frío en función del coeficiente de película exterior

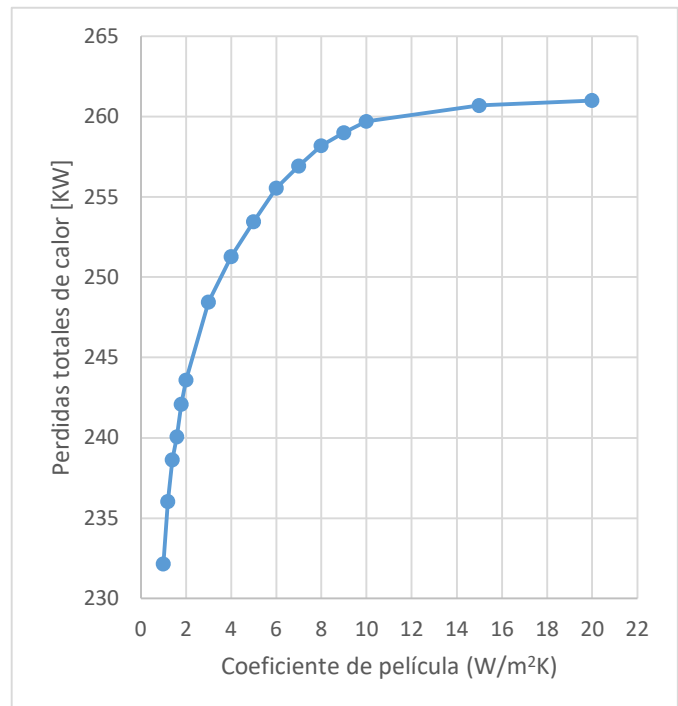


Figura 29. Detalle de las pérdidas térmicas para valores del coeficiente de película comprendidos entre 1 y 20 W/ m²K



3.3.- MODELO NUMÉRICO TRANSITORIO

La realización del modelo transitorio nos permite ver los contornos de temperatura durante el llenado del tanque y su posterior enfriamiento, debido a que las sales son introducidas a una temperatura de 485°C para compensar la caída de temperatura ocasionada por las pérdidas térmicas del tanque, que provocan que la temperatura pueda bajar localmente hasta los 305°C en casos extremos.

Se realiza un nuevo modelo geométrico que incluye el sistema de distribución de sales, que consta de un anillo central por el que circulan las sales e inyectores distribuidos equidistantes en el anillo que introducen las sales en el tanque tal y como se muestra en las figuras 30 y 31.

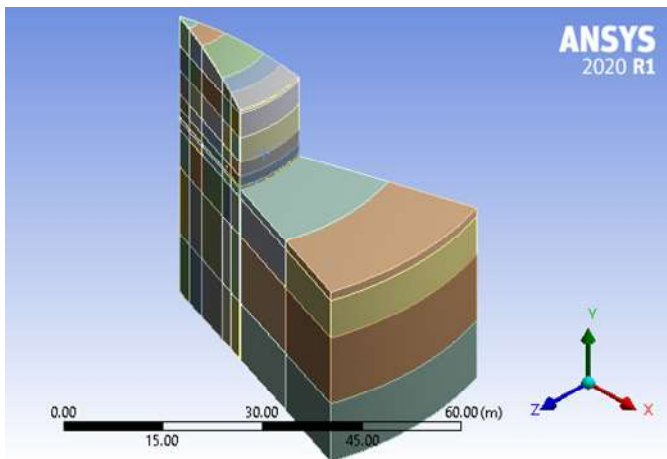


Figura 30. Vista general del modelo transitorio (sector de 36°)

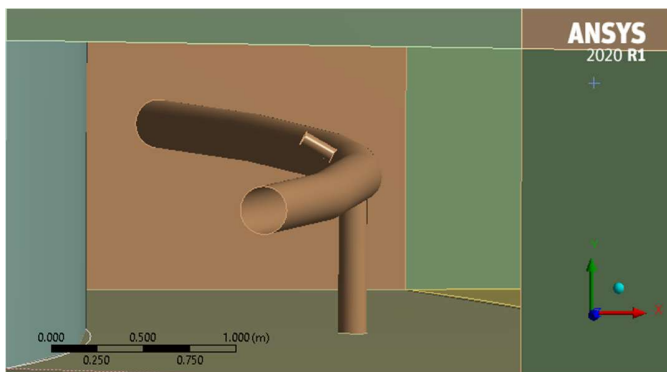


Figura 31. Vista del anillo de distribución de sales con un inyector

Al disponer de 10 inyectores de sales en el sistema, la geometría se compone de 10 sectores simétricos. Por tanto, se puede simplificar la geometría para la simulación en un sector de 36°. En la figura 30 puede apreciarse una vista general del modelo y en la figura 31 en detalle el anillo de distribución de sales.

Para realizar la malla, se intenta reducir el número de elementos de forma selectiva, pues habrá sectores, como la región de fluido, que requieren un mallado más fino, y otros, como el terreno, en el que un mallado más grosero será suficiente. Esto puede apreciarse en la figura 17.

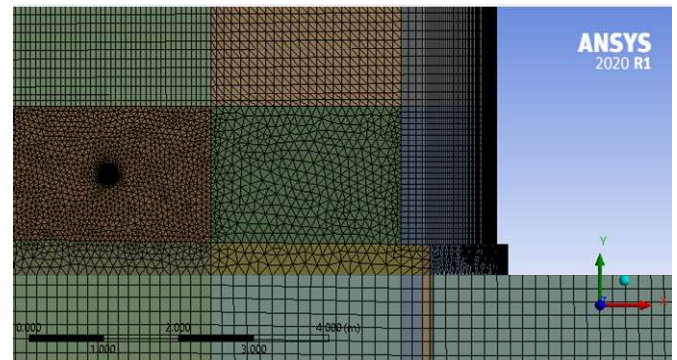


Figura 32. Vista en detalle de la malla

Como se realizó en el caso 2D, es necesario comprobar la calidad de la malla para asegurar una buena convergencia y unos buenos resultados. Se vuelven a comprobar los parámetros Skewness y Orthogonal Quality obteniendo las estadísticas que se muestran en las figuras 33 y 34.

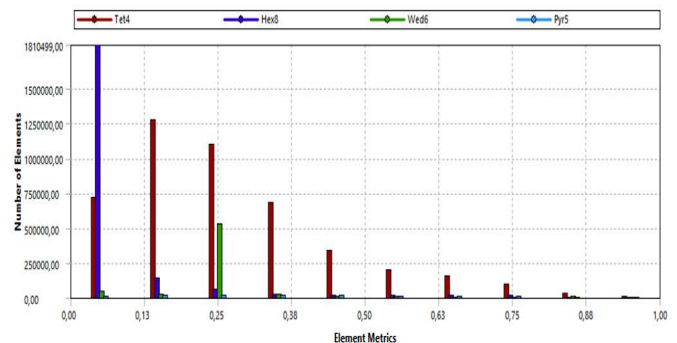


Figura 33. Parámetro Skewness en la malla generada

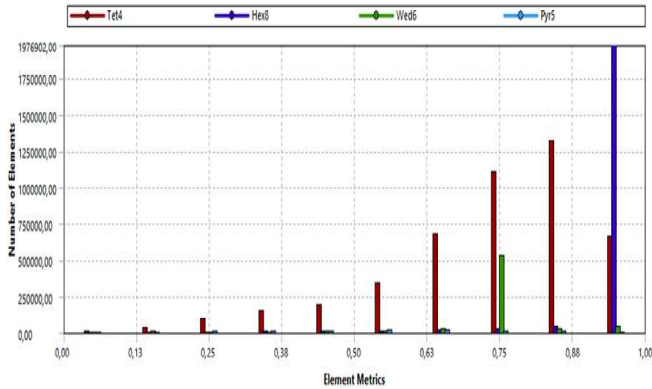


Figura 34. Parámetro Ortogonal Quality en la malla generada

Una vez realizada la malla se procede a implementar las condiciones de contorno del problema, así como las propiedades de los materiales dependientes de la temperatura. Antes de resolver el problema transitorio se realiza una simulación de un caso estacionario para obtener una solución desde la que iniciar el cálculo del transitorio.

Se realiza una simulación que consta de 25 minutos de inyección de sales a través del anillo de distribución con el objetivo de observar la influencia de la mezcla de sales a distinta temperatura y después se corta la inyección para observar el enfriamiento de las sales en función del tiempo.

Como se puede observar en la figura 35, la temperatura media del tanque se elevó rápidamente durante los 25 minutos de inyección de sales debido a que estas se introducen a una mayor temperatura que la de operación del tanque para compensar las pérdidas térmicas. Tras el corte de inyección de sales, el tanque sigue teniendo pérdidas de calor hacia el exterior, y por eso se observa en la gráfica una tendencia decreciente de la temperatura media de las sales.

En la figura 36 puede apreciarse en detalle uno de los inyectores y el contorno de temperatura de las sales debido a las diferencias de temperatura entre las sales del tanque y las inyectadas al mismo. Cabe destacar que los inyectores forman un ángulo de 30° con la horizontal para mejorar el proceso de mezcla de las sales y homogeneizar la temperatura.

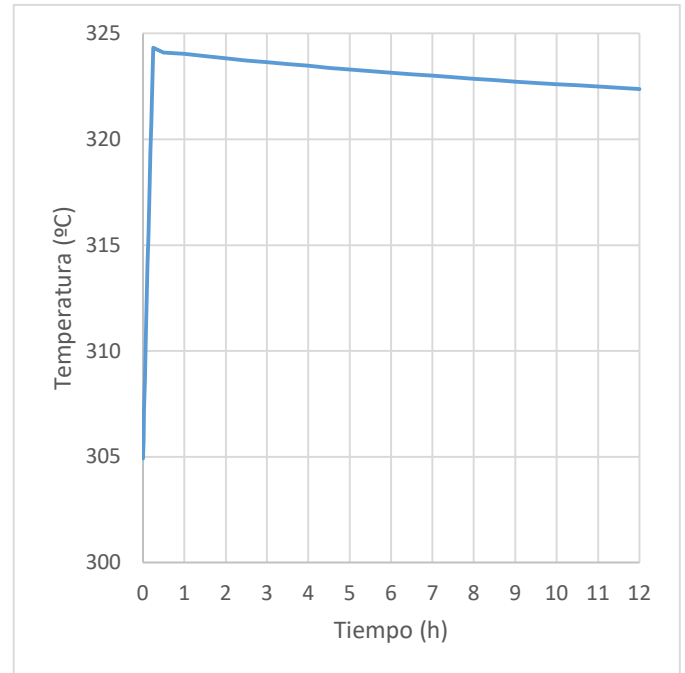


Figura 35. Evolución de la temperatura media de las sales durante el llenado y el enfriamiento (12 horas en total).

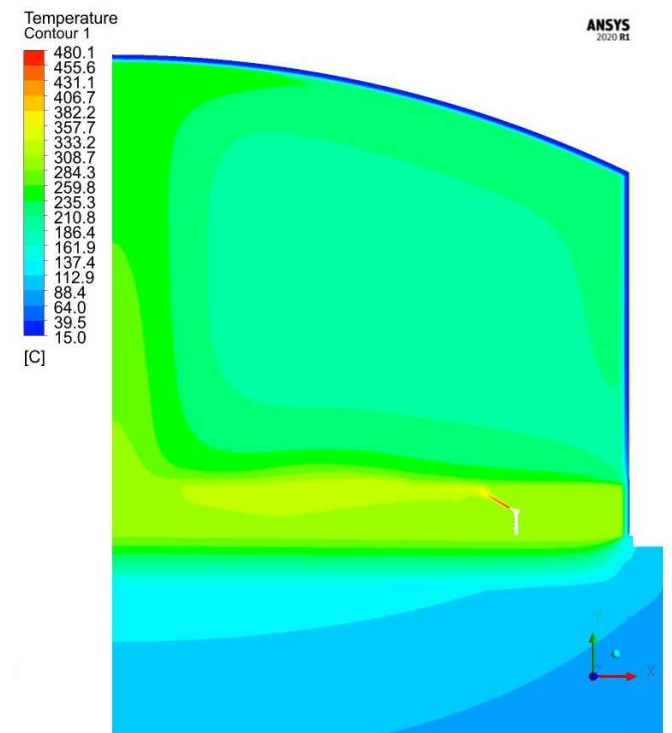


Figura 36. Perfil de temperatura en el tanque para 1 minuto de llenado



4.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que, de los parámetros estudiados, hay unos que tienen una influencia en las pérdidas de calor mucho más considerable que otros. Los parámetros más influyentes de los estudiados se tratan de la altura de las sales en el tanque y el espesor del aislante. Para el tanque caliente, la disminución de las pérdidas de calor entre el mayor y el menor nivel de sales supone un 61.8% respecto del total de las pérdidas y al duplicar el espesor del aislante para el mismo tanque, se obtiene una reducción de las pérdidas de calor totales del 46.2% respecto del total. En cuanto a los demás parámetros estudiados, su influencia es muy poco notoria en comparación con la altura de sales y el espesor del aislante. En el caso del estudio del coeficiente de película, este solo varía las pérdidas de calor en un 10.1% en el tanque caliente tomando en cuenta todo el rango de valores estudiados, y para la temperatura exterior, la influencia en las pérdidas térmicas del tanque caliente es del 2.7% tomando en cuenta también todo el rango de valores estudiados para el tanque caliente.

Respecto a la comparación de los resultados del cálculo numérico con el cálculo analítico, podemos validar el modelo para el cálculo numérico debido a la similitud de resultados obtenidos. Como se ha indicado antes la pequeña diferencia existente entre ambos modelos es debida a simplificaciones de cálculo en el modelo analítico, como la utilización de propiedades térmicas de los materiales no dependientes de la temperatura o la consideración de transmisión de calor en una sola dirección en el terreno.

Tal y como se ha comentado en los resultados previos, la temperatura del terreno alcanza niveles anormalmente elevados, que provocarían una evacuación de humedad del mismo, modificando sus características mecánicas.

Respecto a los modelos con distintas temperaturas entre la fase de las sales y la del gas, los resultados obtenidos son los esperados. Cuanto más lleno de sales está el tanque, mayores son las pérdidas de calor del mismo, y lo mismo ocurre con

la temperatura de la fase del gas, se producen más pérdidas de calor cuanto más alta sea esta temperatura.

Al realizar el estudio del espesor del aislamiento observamos una disminución en las pérdidas de calor en la envolvente y en el techo. Esta disminución no sigue una función lineal, si no levemente exponencial con tendencia decreciente. Por tanto, debe establecerse un espesor de aislante acorde tanto al criterio de las pérdidas de calor como al económico. Como era de esperar las pérdidas de calor por el terreno se mantienen constantes ya que no se varía el espesor de la Arlita.

Respecto a la influencia de la temperatura exterior al tanque, como se ha mencionado anteriormente, apenas tiene influencia en las pérdidas de calor del mismo.

Al estudiar la influencia del coeficiente de película exterior podemos concluir que existe un nivel a partir del cual no aumentan las pérdidas térmicas debido a que predomina el fenómeno de conducción de calor por la pared del tanque frente al de convección. Para valores muy bajos del coeficiente de película, las pérdidas de calor disminuyen, al ser la convección el mecanismo de transmisión de calor dominante. Por otra parte, para valores del coeficiente de película relativos a la convección natural, la temperatura superficial exterior del tanque aumenta considerablemente cuanto menor es el coeficiente de película.

Como trabajo futuro, queda patente la necesidad de realizar un estudio civil sobre cómo afecta la alta temperatura del terreno a las características mecánicas del mismo y a la cimentación de los tanques. Una posible solución sería incrementar el espesor de la base aislante de Arlita para evitar la transmisión de calor hacia el terreno.



REFERENCIAS

- [1] GARCÍA CASALS, X., Noviembre 2001, "La energía solar térmica de alta temperatura como alternativa a las centrales térmicas convencional y nuclear".
- [2] IDAE, 2011, "Evaluación del potencial de energía solar termoeléctrica".
- [3] Stine, W.B. y Harrigan, R.W., 1985, "Solar Energy Fundamentals and Design". Ed. John Wiley and Sons, New York, EEUU. ISBN: 0-471-88718-8
- [4] Duffie, J.A. y Beckman, W.A., 1991, "Solar Engineering of Thermal Processes". Ed. John Wiley & Sons, (2ª Edición), New York, EEUU. ISBN: 0-471-22371-9
- [5] Kuravi S, et al., 2013, "Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants", Progress in Energy and Combustion Science.
- [6] <https://esersarenovables.com/proyectos/cs-p-la-africana/> 23/07/2020
- [7] API-650 "Código de diseño para tanques atmosféricos de almacenamiento sobre la superficie".
- [8] ASME VIII Div.2, "Design & Fabrication of Pressure Vessels"
- [9] <http://www.ansys.com> 23/07/2020