



# Modelado y simulación de tanques de almacenamiento térmico para ciclos de potencia Brayton supercríticos

<https://doi.org/10.53358/ideas.v3i1.555>

Jenifer C. González G<sup>1</sup>, Juan M. García de María<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Madrid, Ronda de Valencia, 3. 28012. Madrid, España

## RESUMEN

Hoy en día, la forma de aprovechar las energías renovables es un tema de interés para la comunidad científica, principalmente la energía solar por ser la más abundante, inagotable y disponible en todo el mundo. A fin de aprovechar esta energía en forma de calor los investigadores han diseñado diferentes tecnologías, siendo limitadas en su mayoría por la intermitencia que caracteriza a la energía solar. Como técnica para reducir el impacto por la intermitencia se plantea el diseño de un sistema de almacenamiento, diseño que consta de un tanque para almacenamiento térmico y un fluido de transferencia térmica. En el presente trabajo se presenta el diseño paramétrico del tanque de almacenamiento térmico para una planta de energía solar concentrada que trabaja con ciclos de potencia Brayton supercríticos, diseño que toma en cuenta las sugerencias y disposiciones mencionadas en la norma API-650.

**Palabras Clave:** Ciclos de Potencia Brayton, Diseño Paramétrico, Energía Solar, Norma API 650, Plantas de Energía Solar Concentrada, Tanque de Almacenamiento Térmico.

optical assembly to design and build.

## Introducción

La utilización de energías renovables para la generación de energía eléctrica ha tenido un claro crecimiento en su aplicación debido a los intentos de reemplazar los combustibles fósiles y contrarrestar las emisiones contaminantes generadas por el uso de estos durante años; además, han desempeñado un papel muy importante en la reforma del equilibrio natural y en la satisfacción de la demanda creciente [1].

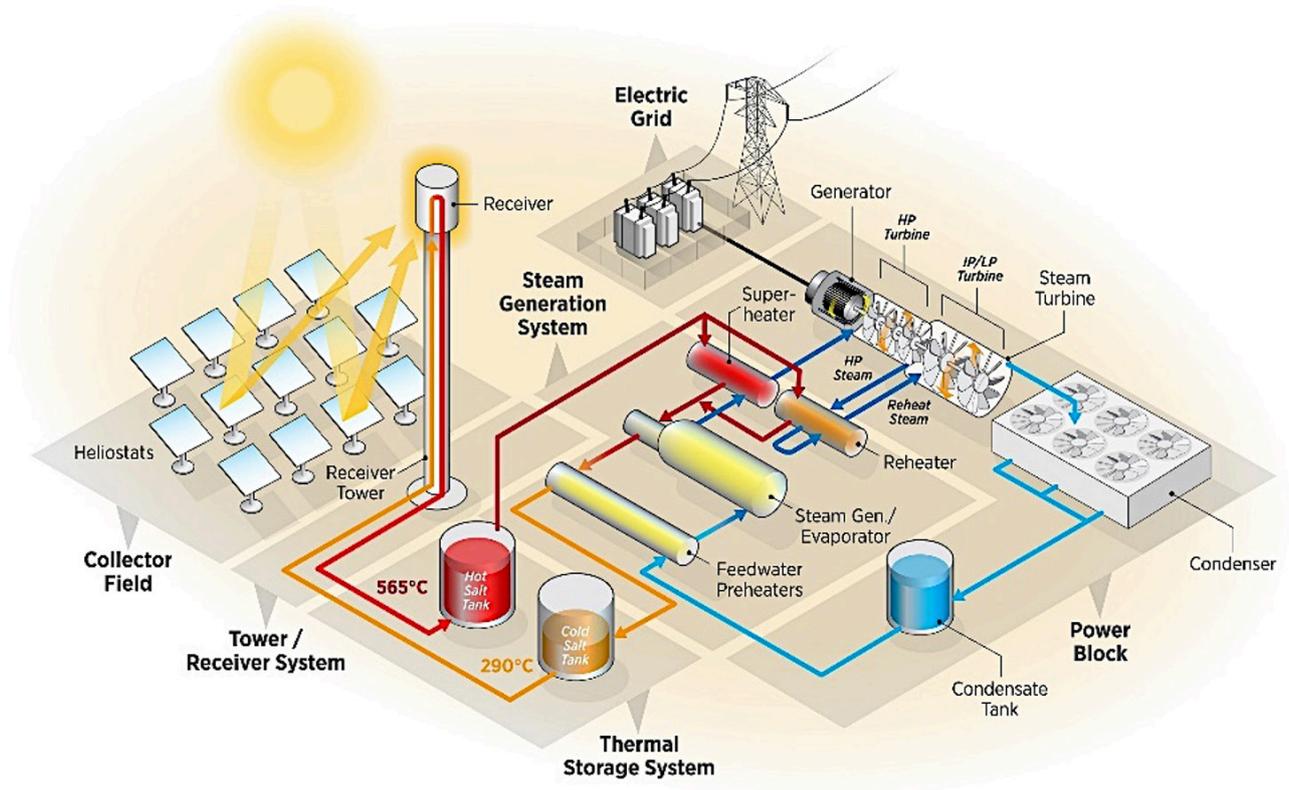
Como área de investigación principal para el presente trabajo se considera la energía a partir de la radiación solar, las plantas de energía solar concentrada, con su traducción en inglés Concentrating Solar Power y sus siglas (CSP); específicamente las plantas con tecnología de ciclo de potencia Brayton supercrítico, las cuales trabajan a altas temperaturas (energía térmica), generando el movimiento de un motor de turbina de gas (energía mecánica) y produciendo energía eléctrica por medio de un transformador.

Teniendo en cuenta que dicha tecnología tiene como desventaja la intermitencia de la energía solar, es necesario aplicar otras tecnologías que permitan el trabajo continuo del sistema, aplicando generalmente el Almacenamiento de Energía Térmica, con su traducción en inglés Thermal Energy Storage y sus siglas (TES), el cual permite aumentar las horas de funcionamiento de la central [2]. Esta tecnología se integra fácilmente a las CSP dándole ventaja sobre las otras tecnologías ya que permite mantener el suministro de manera continua [3].

Los TES pueden disminuir el consumo de los combustibles fósiles en millones de GWh por año, además se estima que su implementación permite una reducción de millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> en los sectores de la industria y la construcción en Europa, mejorando el rendimiento y la fiabilidad térmica del sistema; es por ello por lo que el diseño de sistemas TES eficientes y económicos es de gran importancia y tema de investigación actualmente [1].

Al momento de diseñar un sistema TES para una planta de CSP se debe tener en cuenta los siguientes factores: normativa para la elaboración de tanques de almacenamiento a alta temperatura, localización de la planta solar, tipo de sal solar, temperaturas de trabajo, horas de trabajo y almacenamiento de la planta, materiales a implementar y condiciones del lugar [4].

En general, los TES de las plantas se basan en el sistema de doble tanque (caliente y frío) como se muestra en la figura 1, siendo el primero para almacenamiento de fluido caliente el cual será suministrado al generador del enfriamiento y transportado posteriormente al



segundo almacenamiento [5].

Fig. 1. Planta de energía solar concentrada con sistema de almacenamiento térmico. [6]

En el presente trabajo se diseñará los tanques para TES, teniendo en cuenta que los sistemas dependen de sus datos de partida y HTF; además el diseño del tanque debe cumplir de manera correcta con la normativa vigente para el diseño paramétrico a base de las condiciones de trabajo previstas [5]. La manera de estudiar los sistemas TES es por medio del modelado y simulación dinámicos desde el punto de vista del análisis del proceso; empleando como software de simulación al programa ANSYS para las diferentes propuestas a fin de identificar la que mejor rendimiento y eficiencia genere.

### Normativa Vigente

Dentro de la política energética nacional, encontramos que el desarrollo de las fuentes renovables de energía es uno de los aspectos claves debido a que:

- Contribuyen a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Disminuye la dependencia de los productos petrolíferos.
- Diversifica las fuentes de suministro al promover recursos autóctonos.

“La Directiva de 2009/28/CE del Parlamento Europeo y de Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, fija como objetivos generales conseguir una cuota del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía de la Unión Europea (UE) y una cuota del 10% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía en el sector del transporte en cada Estado miembro para el año 2020”, [7].

A día de hoy, algunas fuentes renovables son económicamente competitivas y se espera que la gran mayoría lo sean a corto o mediano plazo en comparación con las energías convencionales. Las centrales eólicas, minihidráulicas y las instalaciones de solar térmica de baja temperatura han alcanzado el umbral de rentabilidad, mientras que la solar fotovoltaica o la solar de alta temperatura necesitan desarrollar su tecnología y la promoción. La política española de estas energías está contenida en el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) 2011-2020, la cual ha avanzado con la evolución de los precios del petróleo, distribución geográfica de las reservas de energía, preocupación medioambiental y la inflación sobre las fuentes de energía primaria debido al crecimiento de los países emergentes [8].

La política energética en España se ha singularizado para dar respuesta a los principales retos que caracterizan al sector energético español:

- Consumo energético por unidad de producto interno más elevado; para corregir esta tendencia se han realizado esfuerzos en materia de ahorro y eficiencia energética.
- Elevada dependencia energética; esta dependencia introduce fuentes de riesgo adicionales sobre los procesos productivos, tales como la garantía del suministro energético o la volatilidad de los precios de los mercados internacionales.
- Elevadas emisiones de gases de efecto invernadero; debido al crecimiento de la generación eléctrica y de la demanda de transporte durante las últimas décadas.

A fin de dar respuesta a estos retos, la política energética en España se ha desarrollado alrededor de tres ejes:

- Incremento de la seguridad de suministro.
- Mejora de la competitividad de la economía.
- Garantía de un desarrollo sostenible económica, social y medioambiental.

Resaltando que las energías renovables constituyen una apuesta prioritaria de la política energética española debido a los múltiples efectos positivos como: sostenibilidad de sus fuentes, la reducción en las emisiones contaminantes, el cambio tecnológico, creación de formas de energía más distribuidas, reducción de la dependencia energética y del déficit de la balanza comercial, el aumento del empleo y el desarrollo rural [7].

## Fundamento Teórico

### Plantas de Energía Solar Concentrada.

Estas plantas generan electricidad mediante la energía solar concentrada (CSP) utilizando el calor de la irradiación solar concentrada en un área pequeña, para recoger ese calor se usa espejos donde se refleja la luz solar para ser absorbida por el transportador de energía térmica, este transportados circula hacia el sistema de almacenamiento, los intercambiadores y posteriormente a la zona de las turbinas produciendo que estas se muevan y generen electricidad [9].

Las plantas de CSP se encuentran formadas por 3 partes; Campo solar, almacenamiento térmico y bloque de potencia; como se muestra en la figura 2, y de un fluido caloportador, estas partes se describen a continuación:

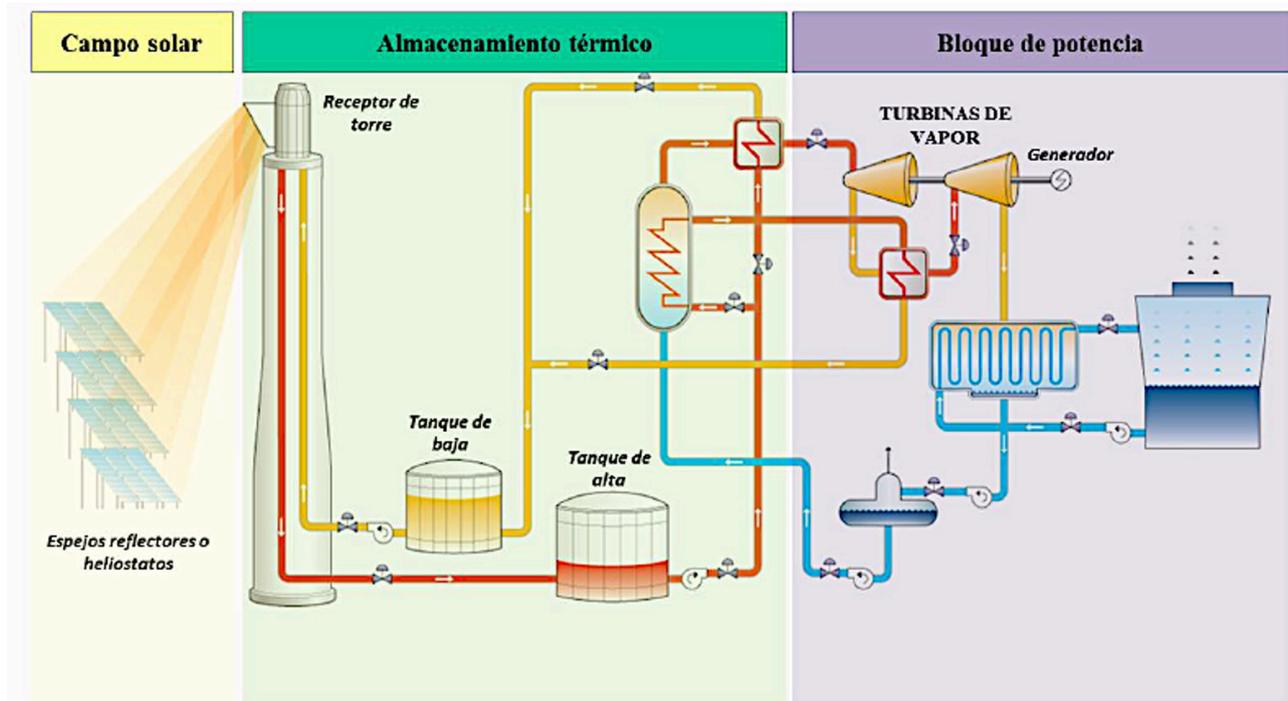


Fig. 2. Esquema de una planta de concentración solar (CSP) tipo torre. [10]

### Almacenamiento Térmico.

Las plantas de concentración solar que trabajan con la tecnología de colectores cilindro-parabólicos y de torre central, como se muestra en la figura 2, debido a que presentan la opción de incorporar un sistema de almacenamiento; esta incorporación permite que la central produzca energía de manera continua, disminuyendo el impacto de los días con radiación baja (nubosidad) y durante la noche. Actualmente los sistemas de almacenamiento térmico se dividen en tres tecnologías [10]:

- Calor sensible
- Calor latente
- Termoquímica

### Bloque de potencia.

Para la generación de energía eléctrica es necesaria la implementación de un ciclo termodinámico, el cual transformará la energía calorífica en energía mecánica por medio del paso de un fluido con determinadas características de temperatura y presión para poder generar el movimiento de una turbina el cual estará acoplado a un generador eléctrico para la generación de energía eléctrica.

Los principales ciclos termodinámicos empleados para la generación de energía son el ciclo Rankine, Brayton y el ciclo combinado [11].

## Diseño Paramétrico y Simulación.

El diseño trata de un tanque que almacena un fluido a alta temperatura para una estación termosolar, posiblemente ubicada en la provincia de Almería-España; además, para el diseño partimos de los datos de conductancia del intercambiador de calor (kW/K), caudales (kg/s), temperatura de la sal (°C) y la eficiencia térmica del ciclo Brayton de recompresión (%), expuestos en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de partida

UA (kW/k)	Caudal (kg/s)	Temperatura (K)	Temperatura (°C)	Eficiencia (%)
5000	472,00	973,15 923,15 893,15	700 650 620	38,57
10000	480,51	973,15 923,15 893,15	700 650 620	42,85
15000	502,69	973,15 923,15 893,15	700 650 620	42,85
20000	511,93	973,15 923,15 893,15	700 650 620	45,64
25000	519,12	973,15 923,15 893,15	700 650 620	46,26
30000	512,91	973,15 923,15 893,15	700 650 620	46,61

### Sal Solar.

Como fluido de transferencia de calor (HTF) tenemos dos tipos de sales las cuales se mencionan en la tabla 2

Tabla 2. Datos de fluidos de transferencia de calor (HTF)

Compuesto	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Capacidad térmica (kJ/kgK)	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura máxima de trabajo (°C)	Conductividad térmica (W/mK)
KCl- MgCl <sub>2</sub> (62,55%, 37,5%)	1940	1,03	426	>800	0,5047
LiF- NaF- KF (46,5% ,11,5%, 42%)	2530	1,88	454	700	0,92

## Materiales.

Los materiales implementados para el diseño del tanque de almacenamiento térmico para el caso de estudio son los mencionados en la tabla 3:

**Tabla 3. Datos de los tipos de materiales empleados en el diseño**

Materiales	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Precio (€/m <sup>3</sup> )
Acero AISI 37L	8000	14,6	571-600	20000
Hormigón	2200	1,5	750-1130	75
Perlita	216	0,06	840	38,448
Vermiculita	0,0525	0,046	1000	15,0675
Arcilla	1900	0,114	860-880	120

## Volumen y Diámetro.

Con los datos de partida se procede a calcular el volumen y diámetro para cada uno de los casos, para el calculo se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \frac{\text{tiempo (s)} * \text{caudal (kg/s)}}{\text{densidad (kg/m}^3\text{)}} \quad (1)$$

$$\text{Diámetro (m)} = \sqrt{\frac{\text{volumen (m}^3\text{)} * 4}{\pi * \text{altura (m)}}} \quad (2)$$

## Norma Standard API-650.

Para el diseño de tanques a nivel industrial, específicamente en la industria del petróleo, se ha establecido estándares que recopilan información sobre criterios de fabricación, normas de seguridad, montaje, inspección, aspectos ambientales y/o de higiene y reparación basada en experiencia de compradores y fabricantes de tanques; dando como resultado la creación de los códigos API-620, API-650 y API-653 con respecto a la fabricación de tanques por parte del Instituto Americano del Petróleo, con sus siglas en ingles American Petroleum Institute (API).

De los estándares indicados se empleará el código API-650 debido a que en este código se presentan los cálculos para un diseño de tanque de almacenamiento vertical cilíndrico adecuado, indicando las formas y ecuaciones para el cálculo de tamaño, espesores, diseño de tapas y características de la base como requerimientos mínimos, mas no sugiere un diseño ideal para un fin definido [12]. A continuación, se describen los cálculos mencionados en la norma:

## Cálculo para Definir el Espesor del Acero.

La norma establece como primer punto un valor mínimo de espesor de carcasa basado en el diámetro de esta, dichos valores se indican en la tabla 4:

Tabla 4. Espesor de carcasa requerido según API 650 [13]

Diámetro nominal del tanque		Espesor nominal de la placa	
(m)	(ft)	(mm)	(in.)
<15	<50	5	3/16
15 a <36	50 a <120	6	1/4
36 a 60	120 a 200	8	5/16
>60	>200	10	3/8

La norma API, en su apartado 3.6.3 sugiere para el cálculo del espesor requerido para el tanque el método de un pie, el cual consiste en un estudio del espesor tomando en cuenta las condiciones del diseño y por prueba hidrostática, indicados a continuación en las ecuaciones (3) y (4) respectivamente [13]:

$$t_d = \frac{4,9D(H - 0,3)G}{S_d} + CA \quad (3)$$

$$t_t = \frac{4,9D(H - 0,3)G}{S_t} \quad (4)$$

#### Cálculo para Definir el Espesor de la Base.

En la sección 3.5.2 de la norma, indica que el espesor mínimo para la base es de 600mm, y para obtener un valor de acuerdo con las dimensiones del tanque se emplea la ecuación (5) referente para el cálculo del espesor de la base [13].

$$\frac{215t_b}{(HG)^{0,5}} \quad (5)$$

#### Espesor de la Tapa.

La norma API-650 establece como espesor mínimo de diseño 5mm y un valor máximo de 13mm, y una altura no mayor a los 2m, para el presente diseño se tomará como dato de referencia para el diseño el espesor máximo de 13mm y la altura máxima de 2m [13].

#### Espesor de Hormigón.

En la ACI350 2R-04 de Concrete Structures for Containment of Hazardous Material, indica los espesores mínimos para muros de hormigón reforzado, según la altura y si se trata de concreto vaciado o prefabricado, esta información se observa en la tabla 5 [13].

Tabla 5. Espesores mínimos para hormigón [14]

Descripción	Altura del muro	Espesor mínimo	Ubicación del acero de refuerzos
Concreto vaciado en sitio	Más de 3m	30cm	Ambas caras
	Entre 1,2m y 3m	25cm	Ambas caras
	Menos de 1,2m	15cm	Centro del muro
Concreto prefabricado	1,2m o más	20cm	Centro del muro
	Menos de 1,2m	10cm	Centro del muro

### Coeficiente de Convección.

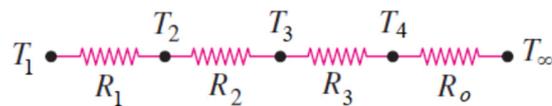
El presente trabajo se lo realiza en el rango de valores de la tabla 6 para el coeficiente de convección:

**Tabla 6. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección [15].**

Tipo de convección	h, (W/m <sup>2</sup> °C)
Convección forzada de gases (h)	25
	100
	125
	175
	250

### Cálculo de Temperatura por Capas.

Para el cálculo de la temperatura final se emplea las ecuaciones de resistencia tanto para conductividad como para convección y finalmente se calcula la temperatura de cada capa; para ello se establece primero la red de resistencias, misma que se observa en la figura 3 la cual hace referencia al caso a desarrollar.



*Fig. 3. Esquema de una planta de concentración solar (CSP) tipo torre. [10]*

### Resistencia por Conductividad y Convección

Al estar formado por varias capas, el tanque presenta una resistencia por conducción (6), y al encontrarse al aire libre, la estructura se encuentra expuesta a los fenómenos ambientales, entre ellos el viento, razón por la cual se calcula la pérdida por convección forzada (7). Las ecuaciones a usar son las siguientes:

$$R(^{\circ}\text{C}/\text{W}) = \frac{\ln\left(\frac{r_f}{r_i}\right)}{2 * \pi * k * L} \quad (6)$$

$$R_o(^{\circ}\text{C}/\text{W}) = \frac{1}{h * A} \quad (7)$$

### Cálculo de pérdida de calor

Para determinar la pérdida de calor se emplea la siguiente ecuación (8)

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_{\infty}}{R_{total}} \quad (8)$$

Y, para determinar la pérdida de calor en cada capa se emplea la siguiente ecuación (9)

$$\Delta T = R * \dot{Q} \quad (9)$$

## Cálculo de la Temperatura por Capas y Temperatura Final

A fin de calcular la temperatura por capas se aplica la ecuación:

$$T = T_i - \Delta T_{\text{capa}} \quad (10)$$

Finalmente, para el cálculo de la temperatura final, procedemos a despejar la  $T_{\text{final}}$  de la ecuación de calor recibido, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$T_f(^{\circ}\text{C}) = T_i - \frac{Q}{c * m} \quad (10)$$

## Simulación en ANSYS

Considerando los datos obtenidos se procede a hacer una selección de los casos a simular, tomando en cuenta el valor de convección del aire, la temperatura ambiente, la temperatura de trabajo de las sales fundidas, el tiempo de almacenamiento y el tipo de material aislante.

Como programa para el diseño de cada capa del tanque se usó el software Inventor ya que permite realizar un diseño en 3D, ensamblar y generar archivos en formato .igs; para el diseño de las capas del tanque se toma en cuenta las dimensiones obtenidas de la aplicación de las ecuaciones anteriores; como resultado tenemos 4 cilindros (fluido, acero, aislante-perlita y hormigón) como se observa en la figura 4.



Fig. 4. Diseño por capas en Inventor. [16]

Para realizar la simulación en el programa ANSYS se selecciona la opción de Steady-State Thermal; esta opción permite obtener los resultados necesarios para casos de transferencia de calor [17], como es el caso desarrollado en este trabajo.

Con la aplicación de este software obtenemos como resultado el análisis de la temperatura en el tanque, como se observa en la figura 5:

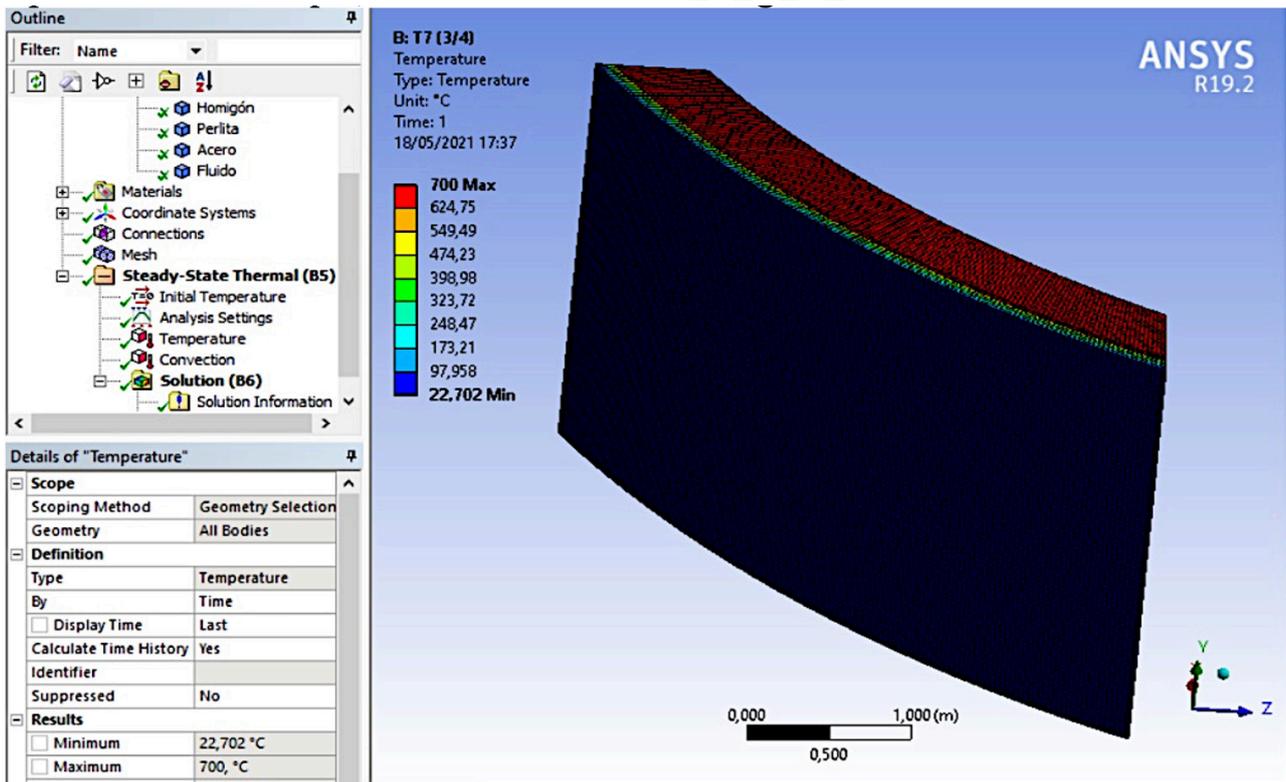


Fig. 5. Resultado obtenido en ANSYS. [17]

El software ANSYS también nos permite un análisis de la temperatura por capas: acero, aislante y hormigón, como se muestra en las figuras 6, 7 y 8 respectivamente:

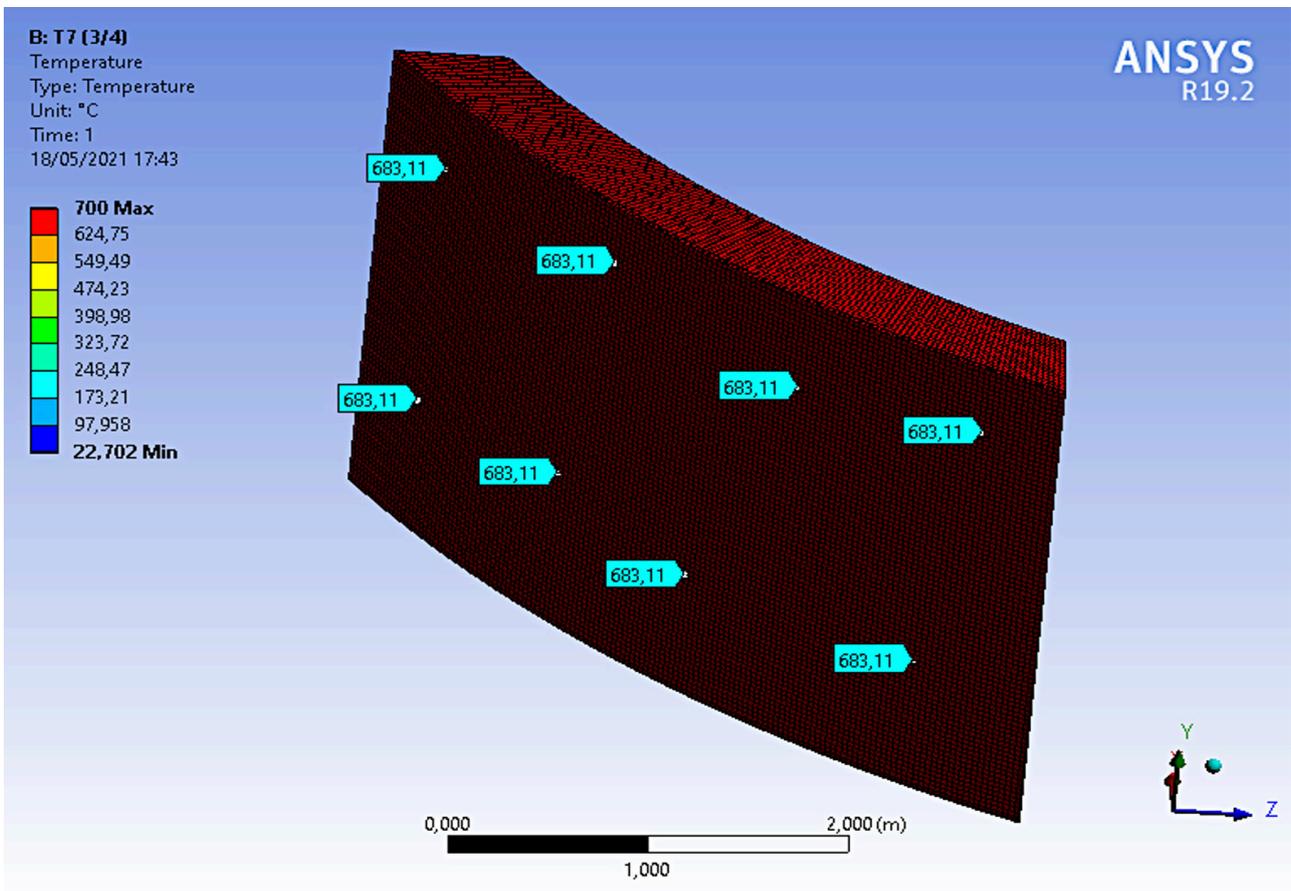


Fig. 6. Resultado exterior capa de acero. [17]

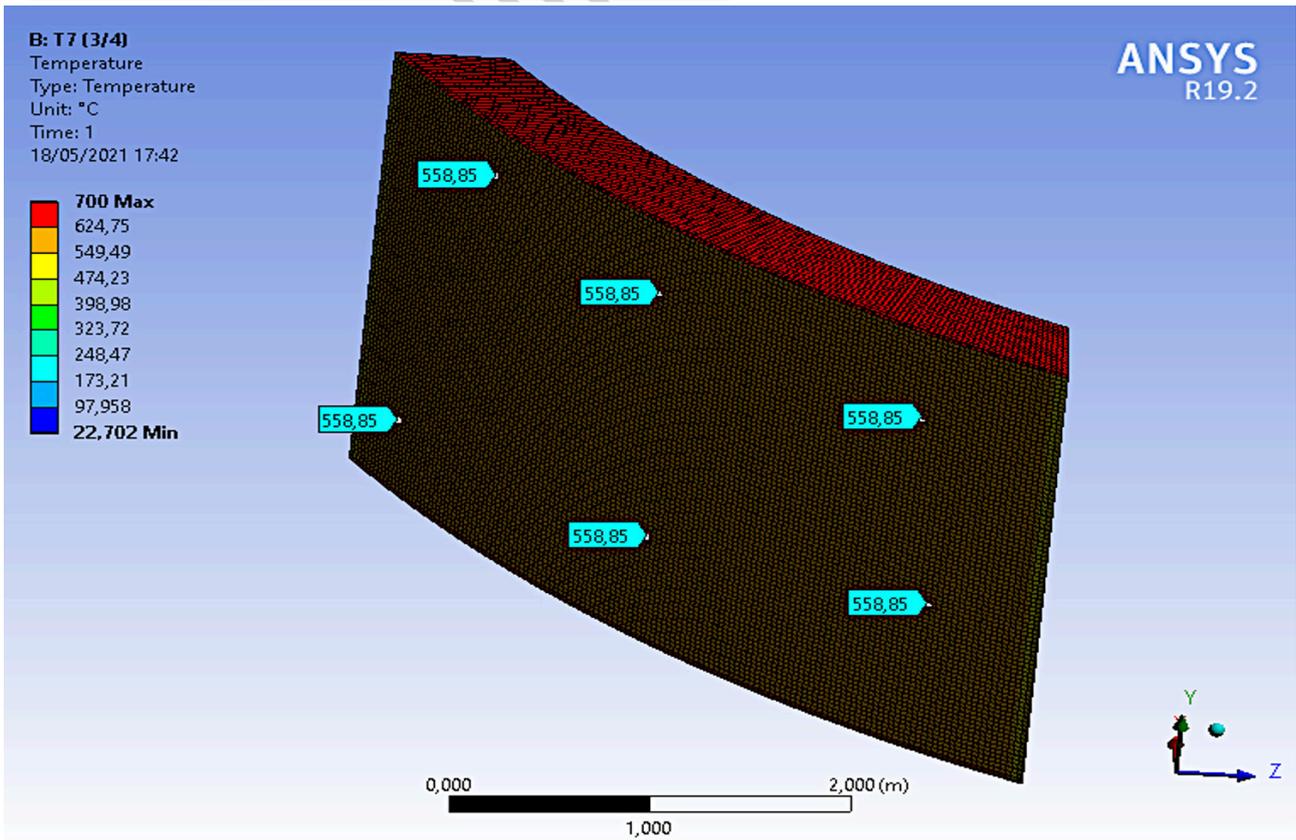


Fig. 6. Resultado exterior capa de aislante. [17]

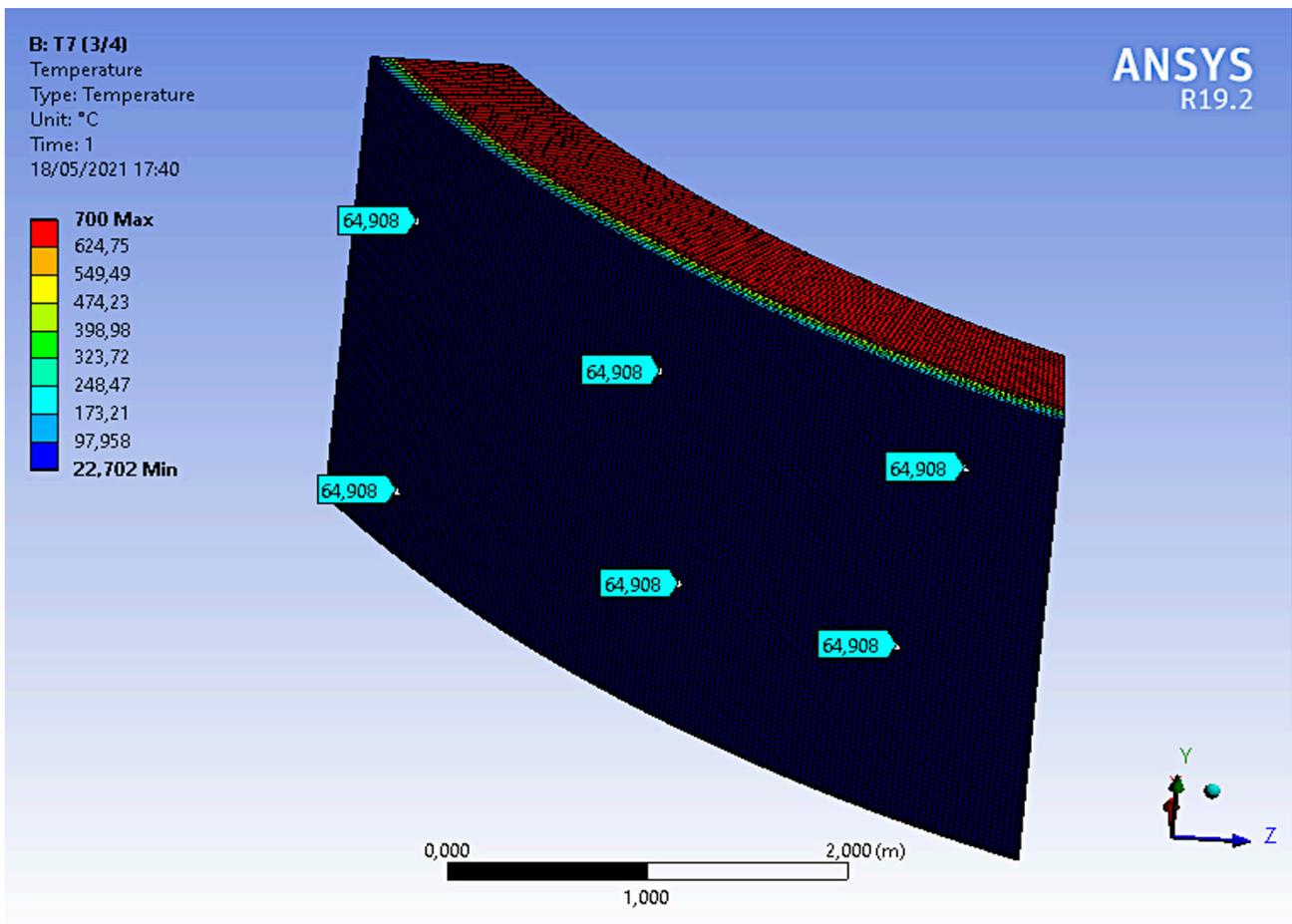


Fig. 6. Resultado exterior capa de hormigón. [17]

## Resultado

Después de realizar todos los cálculos y las simulaciones se obtiene como resultado un tanque con las características indicadas en la tabla 7, teniendo un costo estimado de 1.451.062,55 €

**Tabla 7. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección [15].**

Material aislante	Vermiculita
Largo (m)	12
Radio interior (m)	8
Espesor Acero (m)	0,027
Espesor Base (m)	1,20
Espesor aislante (m)	0,025
Espesor hormigón (m)	0,1
Costo total (€)	1.451.062,55
Costo total (\$)	1.715.903,23

## Conclusiones y trabajos futuros

La aplicación de la norma API va desde el cálculo de espesor mínimo, en donde se toma en cuenta los resultados obtenidos de aplicar el método de un pie para condición de diseño por medio de la extrapolación de datos y la aplicación de la ecuación correspondiente. La norma también indica una ecuación para calcular el espesor de la base, a más de establecer un valor mínimo que es de 600mm. Otro aspecto a considerar es la tapa, para ello la norma hace referencia a diferentes tipos de techo según el fin del tanque de almacenamiento. Al no ser un fluido volátil, pero si emitir gases se considera como mejor opción el techo tipo cónico, el cual también tiene como característica un menor costo con relación a los demás diseños. Para el espesor del techo la norma establece un máximo de 13mm, dato que será utilizado para el análisis de costos.

Al estar el tanque ubicado al aire libre se encuentra expuesto a la pérdida de calor por convección forzada, parámetro que varía en relación con la temperatura ambiente y velocidad del viento. En Almería la temperatura va de 6 °C hasta 35 °C y presenta vientos de entre 11,7 km/h hasta 17,6 km/h razón por la cual se trabaja con varios valores para el coeficiente de convección a fin de establecer uno para todos los posibles escenarios. Al comparar los resultados se puede observar que los datos se vuelven lineales a partir de 125 W/m<sup>2</sup> °C para los parámetros de estudio.

El módulo para la simulación de los diseños de tanque en el programa ANSYS empleado es Steady State Thermal, el cual permite analizar la temperatura final por capas, requiriendo como datos de inicio las propiedades de los materiales y del HFT, un diseño en 3D y la colocación de las características del ambiente para proporcionar un resultado adecuado. Al comparar los resultados de las simulaciones con los resultados obtenidos de la aplicación de las ecuaciones se observa una similitud lo cual da una garantía del funcionamiento del diseño.

El presente trabajo se lo realiza a base de datos proporcionados por el grupo de investigación Modelización de Sistemas Termoenergéticos del Departamento de Ingeniería Energética de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII), de la Universidad Politécnica de Madrid, en base a su proyecto de investigación y a los resultados previos del grupo [18].

## Referencias

- I. Sarbu y C, Sebarchievici, "A comprehensive review of Thermal Energy Storage," MDPI Publisher of Open Access Journals, 2018, consultado en: May 25, 2020. [En línea]. Disponible en: [www.mdpi.com/journal/sustainability](http://www.mdpi.com/journal/sustainability)
- M. Liu, N.H. S. Tay, S. Bell, M. Belusko, J. Rhys, G. Will, W. Saman y F. Bruno, "Review on concentratin solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies," ELSEVIER, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 53, pp. 1411-1432, 2016.
- R. Tisketine, R. Oaddi, R. Ait El Cadi, A. Bazgaou, L. Bouirden, A. Aharoune y A. Ihlal, "Suitability and characteristics of rocks for sensible heat storage in CSP plants, ELSEVIER, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, no. 169, pp. 245-257, 2017.
- H. Zhang, J. Baeyens, G. Cáceres, J. Degre, y Y. Lv, "Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects," ELSEVIER, *Progress in Energy and Combustion*, no. 53, pp. 1-40, 2016.
- Q. Yu, X. Li, Z. Wang y Q. Zhang, "Modeling and dynamic simulation of thermal energy storage system for concentrating solar power plant," ELSEVIER, *Energy*, no. 198, código. 117183. 2020.
- M. Parzen, "Comparison of Heat Transfer Fluids (HTF) for Solar Tower Systems, "2017, consultado en: May 25, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/figure/Major-subsystems-in-a-molten-salt-power-tower-5fig1314258829>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Secretaria de estado de Energía "Energías renovables", (s/f), España, Consultado en: Abr 4, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://energia.gob.es/desarrollo/EnergiaRenovable/Paginas/Renovables.aspx>. España. Gobierno de España
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Secretaria de estado de Energía "Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020", (s/f), España, Consultado en: Abr 4, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://energia.gob.es/desarrollo/EnergiaRenovable/Paginas/paner.aspx>.
- P. Tafur, Diseño y simulación de ciclos de potencia Brayton s-CO<sub>2</sub> con CSP y almacenamiento térmico, Tesis Master, Ing. De la Energía., Univ. Politécnica de Madrid, Madrid, 2020.
- V. Encinas, "Recubrimientos protectores para plantas de concentración solar con almacenamiento térmico: Síntesis, deposición y caracterización," Tesis Ph.D., Dpto. Modelización y Experimentación en Ciencia y Tecnología., Univ. de Extremadura, España, 2019.

- R. Durán, Estudio termodinámico del taque de almacenamiento de sales en una central termosolar, Tesis Grado, Dpto.Ing. Térmica y de Fluidos., Univ. Carlos III de Madrid, Madrid, 2014
- J. Restrepo, "Código API 650 y 630: Diseño, montaje y construcción de tanques soldados de acero", Elite Trainig, Bogota, 2007.
- J. Restrepo, "Welded Steel Tanks for Oil Storage, API standard 650", American Petroleum Institute, Tenth Edition, N.W, Estados Unidos, 2003.
- "Guía de especificación para la construcción de tanques o estructuras de ingeniería ambiental de concreto" Euclid group, TOXEMENT, Medellin, Colombia, 2019.
- Y. Cengel, "Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico" McGraw-Hill Interamericana, Cuarta edición, Reno, Nevada, Estados Unidos, 2007.
- "Autodesk," Autodesk Inventor, 1999. J. Swanson, "ANSYS 19.2," ANSYS, Inc. Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos, 1970.
- R. Valencia, L. Coco y J. Muños, "Supercritical CO2 mixtures for advanced Brayton Power Cycles in line-focusing, Solar Power Plants," MDPI, Applied Sciences, no. 10, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/1/55/htm>

