



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Autor: Luis Elías Orti

Director: Alberto David Jáñez Cordero

Madrid

Agosto de 2025

Esta página está dejada intencionalmente en blanco.

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Análisis de pérdidas térmicas a través de la base en depósitos de sales fundentes en plantas
termosolares

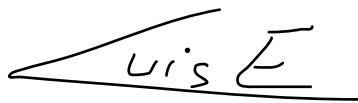
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luis E' with a stylized flourish at the end.

Fdo.: Luis Elías Orti

Fecha: 07/08/2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Alberto David Jáñez Cordero

Fecha: 09/08/2025

Esta página está dejada intencionalmente en blanco.



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Autor: Luis Elías Orti

Director: Alberto David Jáñez Cordero

Madrid

Esta página está dejada intencionalmente en blanco.

Agradecimientos

A mi madre, Teresa, que siempre me insiste en hacer bien las cosas

Esta página está dejada intencionalmente en blanco.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Autor: Elías Orti, Luis.

Director: Jáñez Cordero, Alberto David.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo analiza las pérdidas térmicas a través de la base de depósitos de sales fundentes en plantas termosolares de concentración, con especial atención a su impacto energético y económico. Se han empleado dos metodologías complementarias: un modelo bidimensional en Excel y simulaciones numéricas mediante Ansys Fluent CFD, evaluando distintos espesores de aislamiento de arlita. Los resultados muestran que, aunque aumentar el espesor reduce las pérdidas térmicas, el beneficio económico no siempre justifica la inversión, identificándose un espesor óptimo en torno a 1,7 m.

Palabras clave: energía termosolar, sales fundentes, pérdidas térmicas, aislamiento, CFD, Excel, LCOE, arlita

1. Introducción

Las plantas termosolares con almacenamiento térmico en sales fundentes permiten generar electricidad incluso en ausencia de radiación solar, gracias a la capacidad de almacenar energía a alta temperatura. Sin embargo, uno de los puntos críticos de su eficiencia es la pérdida de calor a través de la base de los depósitos de almacenamiento, causada por el fuerte gradiente térmico entre las sales (380–565 °C) y el terreno (15–25 °C).

En este trabajo se estudian los factores que influyen en estas pérdidas y se evalúa el impacto de aumentar el espesor del aislamiento de arlita, buscando un equilibrio entre reducción de pérdidas y viabilidad económica.

2. Definición del proyecto

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar y optimizar el aislamiento térmico en la base de depósitos de sales fundentes en plantas termosolares, con el fin de reducir pérdidas energéticas y valorar su impacto económico.

Como punto de partida, se ha realizado un análisis del estado del arte que abarca:

- Principales tecnologías termosolares en operación comercial, incluyendo plantas de torre central y de colectores cilindro-parabólicos, con sus características de operación, rangos de temperatura y sistemas de almacenamiento [DUT17; APAR20; ELAM25].
- Tipos de pérdidas térmicas en depósitos de sales fundentes (conducción, convección y radiación) y cuantificación de su impacto sobre la eficiencia global [PRIE16].
- Enfoque específico en las pérdidas por la base, identificadas como un punto crítico debido al elevado gradiente térmico entre las sales fundentes (380–565

°C) y el terreno (15–25 °C), así como a la gran superficie de contacto en depósitos de gran diámetro [ZHAN19].

- Factores de diseño y materiales de aislamiento empleados actualmente, analizando su conductividad térmica, espesor típico y limitaciones mecánicas y económicas [PRIE24].

Con esta base, se han desarrollado dos metodologías complementarias para el estudio:

- Modelo bidimensional en Excel para estimar de forma rápida las pérdidas por conducción a través de la base, evaluando distintos espesores de arlita y sirviendo como herramienta preliminar para la toma de decisiones.
- Simulaciones CFD en Ansys Fluent, que reproducen con mayor realismo la distribución de temperaturas y el flujo de calor en el sistema, validando las tendencias obtenidas con el modelo simplificado.

Finalmente, ambos análisis se han vinculado a un estudio económico que calcula el periodo de retorno de la inversión (payback period) y el Coste Nivelado de Energía (LCOE), determinando así la viabilidad de aumentar el espesor de aislamiento desde un punto de vista técnico y financiero.

3. Descripción del modelo

Se desarrolló un modelo bidimensional en Excel basado en resistencias térmicas en serie, considerando capas con propiedades térmicas constantes y un perfil de temperatura interna uniforme. Este modelo permitió estimar pérdidas para diferentes espesores de aislamiento de arlita.

Posteriormente, se implementaron simulaciones CFD en Ansys Fluent, reproduciendo en detalle la geometría del depósito, las condiciones térmicas y la conducción de calor hacia el terreno. Esto permitió validar y refinar los resultados obtenidos en Excel.

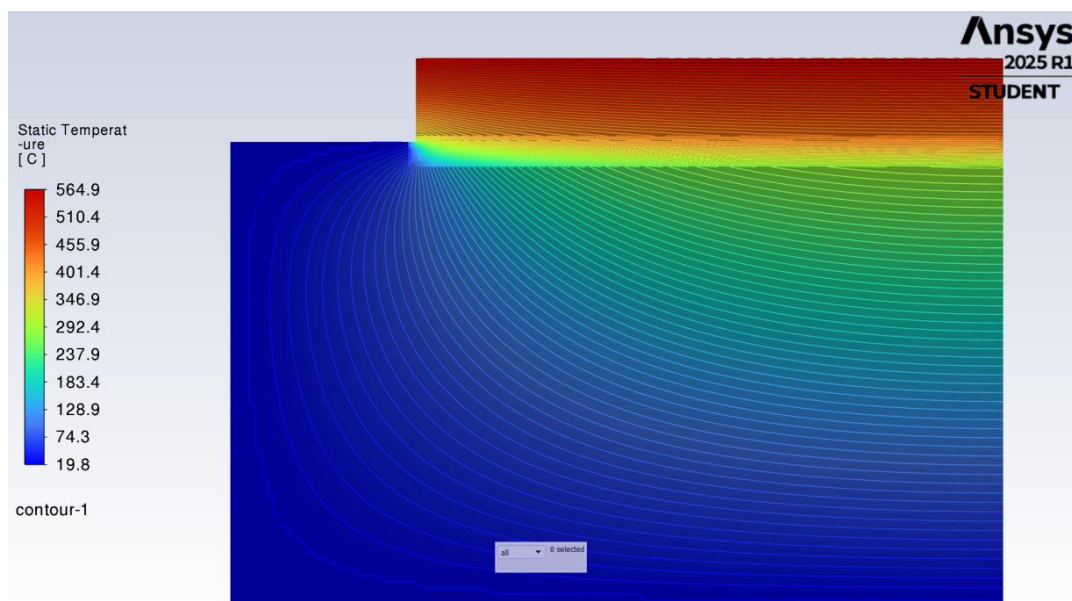


Ilustración 1. Distribución de temperaturas en el depósito y suelo – Caso 2F

4. Resultados

Excel:

- De 2 m a 3 m de arlita → reducción de pérdidas de ~ 47 kW → ahorro anual neto de 292 MWh.
- Payback: 19 años, demasiado próximo a la vida útil (30 años) para resultar rentable sin incentivos.

CFD:

- De 1,7 m a 2,0 m de arlita → reducción del flujo térmico superficial de 41,5 a 37,6 W/m².
- El análisis de LCOE mostró que el incremento de material no mejora significativamente el coste nivelado.

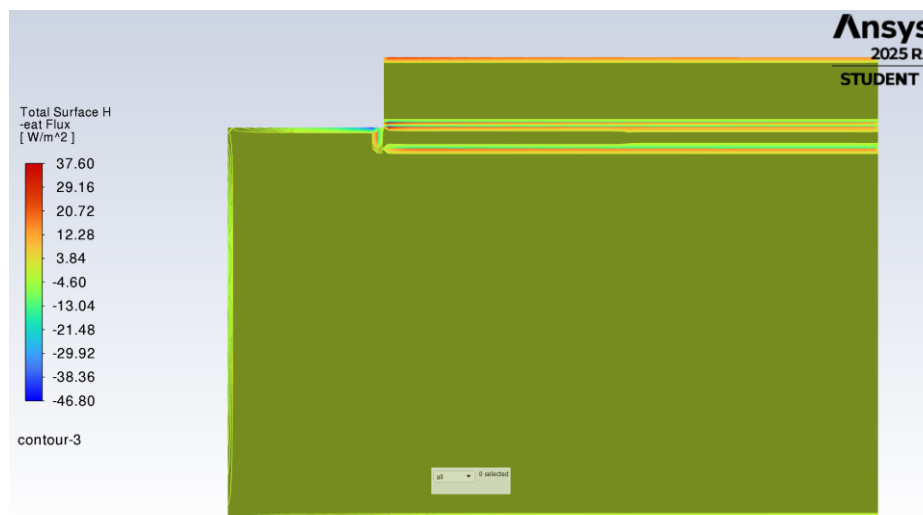


Ilustración 2. Transferencia de calor en las paredes del depósito – Caso 2F

5. Conclusiones

- El aislamiento de la base es clave para mejorar la eficiencia térmica, pero los rendimientos decrecientes limitan la viabilidad de espesores excesivos.
- Un espesor de $\sim 1,7$ m ofrece un balance favorable entre coste y ahorro energético.
- La inversión en más aislamiento no es rentable sin subvenciones o reducciones significativas en el coste de materiales.
- Se proponen como líneas futuras de investigación: simulaciones transitorias, nuevos materiales aislantes y análisis térmico-estructural acoplado.

6. Referencias

- [DUTT17] Dutta, P., “High temperature solar receiver and thermal storage systems”, Applied Thermal Engineering, vol. 124, pp. 624-632, 2017.
- [APAR20] Aparicio, M. P., “Radiación solar y su aprovechamiento energético”, Marcombo, 2020.

- [ELAM25]** Elamine Abdesselem, M., Eddine Boukelia, T., Salah Mecibah, M., “Comparative analysis of integrating different power cycles into a concentrated solar power plant”, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 285, 2025.
- [PRIE16]** Prieto, C., Miró, L., Peiró, G., Oró, E., Gil, A., Cabeza, L.F., “Temperature distribution and heat losses in molten salts tanks for CSP plants.”, Solar Energy, vol. 135, pp. 518-526, 2016.
- [ZHAN19]** Zhang, X., Wu, Y., Ma, C., Meng, Q., Hu, X., Yang, C., “Experimental Study on Temperature Distribution and Heat Losses of a Molten Salt Heat Storage Tank.”, Energies, vol. 12, no. 10, 2019.
- [PRIE24]** Prieto, C., Blindu, A., Cabeza, L., Valverde, J., García, G., “Molten Salts Tanks Thermal Energy Storage: Aspects to Consider during Design.”, Energies, vol. 17, no. 1:22, 2024.

ANALYSIS OF THERMAL LOSSES THROUGH THE BASE OF MOLTEN SALT TANKS IN CONCENTRATED SOLAR POWER PLANTS

Author: Elías Orti, Luis.

Supervisor: Jáñez Cordero, Alberto David.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This study analyzes thermal losses through the base of molten salt tanks in concentrated solar power plants, with particular emphasis on their energy and economic impact. Two complementary methodologies have been employed: a two-dimensional model in Excel and numerical simulations using Ansys Fluent CFD, evaluating different arlite insulation thicknesses. The results show that, although increasing the thickness reduces thermal losses, the economic benefit does not always justify the investment, with an optimal thickness identified at around 1.7 m.

Keywords: energía termosolar, sales fundentes, pérdidas térmicas, aislamiento, CFD, Excel, LCOE, arlita

1. Introduction

Concentrated solar power plants with molten salt thermal storage can generate electricity even in the absence of solar radiation, thanks to their ability to store energy at high temperatures. However, one of the critical points affecting their efficiency is heat loss through the base of the storage tanks, caused by the strong thermal gradient between the salts (380–565 °C) and the ground (15–25 °C).

This study examines the factors influencing these losses and evaluates the impact of increasing the thickness of arlite insulation, aiming to find a balance between loss reduction and economic feasibility.

2. Project definition

The present work aims to evaluate and optimize the thermal insulation at the base of molten salt tanks in concentrated solar power plants, with the goal of reducing energy losses and assessing their economic impact.

As a starting point, a state-of-the-art analysis has been carried out, covering:

- Main solar thermal technologies in commercial operation, including central tower plants and parabolic trough collectors, along with their operating characteristics, temperature ranges, and storage systems [DUT17; APAR20; ELAM25].
- Types of thermal losses in molten salt tanks (conduction, convection, and radiation) and quantification of their impact on overall efficiency [PRIE16].
- A specific focus on base losses, identified as a critical point due to the high thermal gradient between molten salts (380–565 °C) and the ground (15–25 °C), as well as the large contact surface in wide-diameter tanks [ZHAN19].

- Design factors and insulation materials currently in use, analyzing their thermal conductivity, typical thickness, and mechanical and economic limitations [PRIE24].

On this basis, two complementary methodologies have been developed for the study:

- A two-dimensional Excel model to quickly estimate conduction losses through the base, assessing different arlite thicknesses and serving as a preliminary decision-making tool.
- CFD simulations in Ansys Fluent, which more realistically reproduce the temperature distribution and heat flow in the system, validating the trends obtained with the simplified model.

Finally, both analyses have been linked to an economic study calculating the payback period and the Levelized Cost of Energy (LCOE), thereby determining the feasibility of increasing insulation thickness from a technical and financial perspective.

3. Model description

A two-dimensional Excel model was developed based on thermal resistances in series, considering layers with constant thermal properties and a uniform internal temperature profile. This model enabled the estimation of losses for different arlite insulation thicknesses.

Subsequently, CFD simulations were implemented in Ansys Fluent, accurately reproducing the tank geometry, thermal conditions, and heat conduction into the ground. This allowed the validation and refinement of the results obtained in Excel.

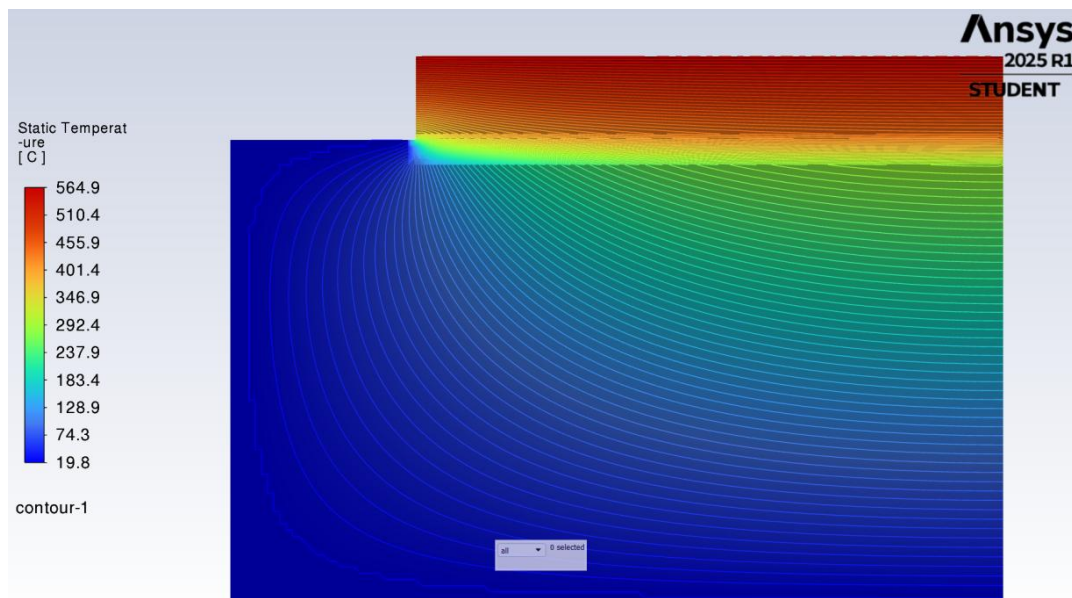


Figure 1. Temperature distribution in the tank and ground – Case 2F

4. Results

Excel:

- From 2 m to 3 m of arlita → reduction of losses by approximately 47 kW → net annual savings of 292 MWh.
- Payback: 19 years, too close to the useful life (30 years) to be profitable without incentives.

CFD:

- From 1.7 m to 2.0 m of arlita → reduction of surface heat flux from 41.5 to 37.6 W/m².
- The LCOE analysis showed that the increase in material does not significantly improve the levelized cost.

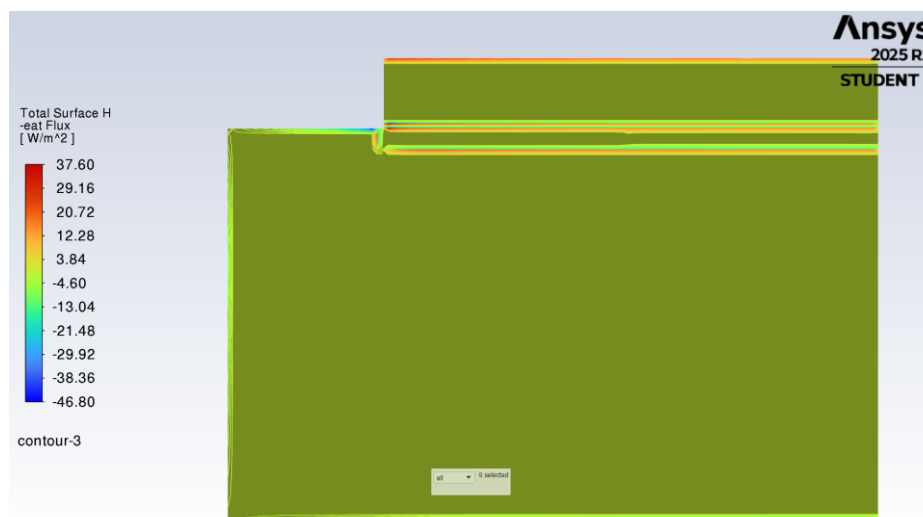


Figure 2. Heat transfer in the tank walls – Case 2F

5. Takeaways

The insulation of the base is key to improving thermal efficiency, but diminishing returns limit the viability of excessive thicknesses.

A thickness of approximately 1.7 m offers a favorable balance between cost and energy savings.

Investment in additional insulation is not profitable without subsidies or significant reductions in material costs.

Future research directions proposed include transient simulations, new insulating materials, and coupled thermal-structural analysis.

6. References

[DUTT17] Dutta, P., “High temperature solar receiver and thermal storage systems”, Applied Thermal Engineering, vol. 124, pp. 624-632, 2017.

[APAR20] Aparicio, M. P., “Radiación solar y su aprovechamiento energético”, Marcombo, 2020.

[ELAM25] Elamine Abdesslem, M., Eddine Boukelia, T., Salah Mecibah, M., “Comparative analysis of integrating different power cycles into a concentrated solar power plant”, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 285, 2025.

[PRIE16] Prieto, C., Miró, L., Peiró, G., Oró, E., Gil, A., Cabeza, L.F., “Temperature distribution and heat losses in molten salts tanks for CSP plants.”, Solar Energy, vol. 135, pp. 518-526, 2016.

[ZHAN19] Zhang, X., Wu, Y., Ma, C., Meng, Q., Hu, X., Yang, C., “Experimental Study on Temperature Distribution and Heat Losses of a Molten Salt Heat Storage Tank.”, Energies, vol. 12, no. 10, 2019.

[PRIE24] Prieto, C., Blindu, A., Cabeza, L., Valverde, J., García, G., “Molten Salts Tanks Thermal Energy Storage: Aspects to Consider during Design.”, Energies, vol. 17, no. 1:22, 2024.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	6
1.1 Motivación del proyecto.....	7
Capítulo 2. Plantas Termosolares.....	11
2.1 Generación de energía en plantas termosolares.....	11
2.1.1 Radiación solar y su aprovechamiento	11
2.1.2 Ciclos termodinámicos empleados	13
2.2 Tipos de plantas termosolares	14
2.2.1 Concentradores cilíndrico-parabólicos (CCP)	14
2.2.2 Torre o receptor central	15
2.2.3 Reflectores lineales de Fresnel.....	17
2.2.4 Disco parabólico (Stirling).....	19
2.2.5 Comparativa de costes y rendimientos	20
2.3 Tanques de almacenamiento de sales	22
2.3.1 Importancia de los tanques de sales fundentes en plantas CSP	22
2.3.2 Diseño de un tanque	24
Capítulo 3. Pérdidas Térmicas.....	33
3.1 Estudios históricos.....	33
3.2 Tipos de pérdidas térmicas y su impacto.....	36
3.2.1 Mecanismos de transferencia térmica	37
3.2.2 Tipos de pérdidas térmicas en el tanque de sales fundentes	38
3.2.3 Impacto en la eficiencia y costos operativos	40
3.2.4 Métodos actuales de mitigación de las pérdidas térmicas	42
3.3 Pérdidas térmicas a través de la base.....	43
3.3.1 Importancia de la base para la eficiencia térmica	44
3.3.2 Factores que influyen en las pérdidas térmicas por la base	45
Capítulo 4. Modelado Básico de las Pérdidas por la Base.....	48
4.1 Ley de Fourier	48
4.1.1 Ecuaciones básicas de conducción.....	48
4.1.2 Hipótesis y simplificaciones consideradas	49

4.2	Propiedades de los materiales empleados.....	50
4.3	Cálculos y aproximación en Excel	50
4.3.1	Descripción de la metodología.....	50
4.3.2	Casos Analizados.....	52
4.3.3	Cálculos.....	54
4.4	Modelado en Fluent.....	55
4.4.1	Descripción del software.....	55
4.4.2	Hipótesis y simplificaciones	57
4.4.3	Diseño del modelo	57
Capítulo 5.	<i>Análisis de Resultados e Impacto Económico.....</i>	61
5.1	Aproximación en Excel	61
5.1.1	Resultados	61
5.1.2	Análisis de resultados e impacto económico.....	63
5.2	Simulaciones CFD.....	65
5.2.1	Resultados	65
5.2.2	Análisis de resultados e impacto económico.....	70
Capítulo 6.	<i>Conclusiones.....</i>	72
Capítulo 7.	<i>Bibliografía.....</i>	75
ANEXO I	79	

Índice de figuras

Figura 1. Perfil horario promedio de la energía solar térmica sobre la generación total española (%) [1].....	6
Figura 2. Mapa de recurso solar de España – Irradiación Directa Normal media anual (1994-2018) [4]	8
Figura 3. Potencia termosolar instalada en España [1].....	9
Figura 4. Generación de energía solar térmica en España [1]	9
Figura 5. Diagrama de un ciclo Rankine de vapor [ELAM25]	14
Figura 6. Esquema de una planta CCP [PRIE24]	15
Figura 7. Esquema de planta con torre central [PRIE24]	16
Figura 8. Esquema de planta con receptores lineales de Fresnel [9]	18
Figura 9. Colector de demostración Fresnel lineal MAN instalado en la Plataforma Solar de Almería [11]	19
Figura 10. Disco parabólico Stirling [12]	20
Figura 11. Transformación de calor en energía eléctrica [14]	22
Figura 12. Tanques de sales fundidas [13]	24
Figura 13. Esquema sencillo de un sistema de doble tanque.....	26
Figura 14. Esquema típico de un tanque de sales molten con aislamiento y base estratificada	31
Figura 15. Esquema típico de un tanque de almacenamiento de sales fundentes [VARE20]	32
Figura 16. Tipos de pérdidas térmicas.....	38
Figura 17. Tipos de pérdidas térmicas en el tanque de sales fundentes.....	40
Figura 18. Análisis bidimensional del caso 1E (espesor de 2m de arlita).....	53
Figura 19. Análisis bidimensional del caso 2E (3m de espesor de arlita).....	54
Figura 20. Representación del modelo CFD en SpaceClaim	58
Figura 21. Mallado del modelo CFD.....	59

Figura 22. Esquematización de los cuerpos del modelo CFD.....	60
Figura 23. Distribución de temperaturas en el depósito y suelo – Caso 1F	65
Figura 24. Primer plano de la distribución de temperaturas en el exterior del depósito – Caso 1F	66
Figura 25. Transferencia de calor en las paredes del depósito – Caso 1F	67
Figura 26. Primer plano de la transferencia de calor en el borde del depósito – Caso 1F ..	67
Figura 27. Distribución de temperaturas en el depósito y suelo – Caso 2F	68
Figura 28. Primer plano de la distribución de temperaturas en el exterior del depósito – Caso 2F	68
Figura 29. Transferencia de calor en las paredes del depósito – Caso 2F	69
Figura 30. Primer plano de la transferencia de calor en el borde del depósito – Caso 2F ..	69

Índice de tablas

Tabla 1. Comparativa técnica y económica de tecnologías CSP.....	21
Tabla 2. Propiedades de los materiales empleadas en los análisis de Excel y Fluent CFD	50
Tabla 3. Conductividades y temperaturas medias de los materiales – Caso 1E.....	61
Tabla 4. Pérdidas de calor a través de la base – Caso 1E	62
Tabla 5. Conductividades y temperaturas medias de los materiales – Caso 2E.....	62
Tabla 6. Pérdidas de calor a través de la base – Caso 2E	63
Tabla 7. Comparativa de pérdidas para los casos 1E y 2E	63
Tabla 8. Tabla de precios de arlita y de la energía	64
Tabla 9. Análisis “Payback” del incremento de arlita en el caso 2E.....	64
Tabla 10. Análisis “Payback” del incremento de espesor de arlita	70
Tabla 11. Comparativa de los LCOE del Caso 1F y Caso 2F	71

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Las plantas de generación de energía solar térmica o CSP (por sus siglas en inglés, Concentrating Solar Power) han emergido como una tecnología clave en la transición hacia un sistema energético más sostenible, ofreciendo una solución viable para la generación de electricidad a partir de la radiación solar. A diferencia de otras fuentes renovables, las plantas termosolares permiten el almacenamiento de energía en forma de calor, utilizando sales fundentes como medio de almacenamiento térmico. Este almacenamiento ofrece la ventaja de poder generar electricidad incluso en ausencia de radiación solar directa, mejorando la estabilidad y gestionabilidad del sistema eléctrico. La figura 1 muestra el uso de la energía termosolar por horas en España, destacando cómo se sigue generando durante la noche.

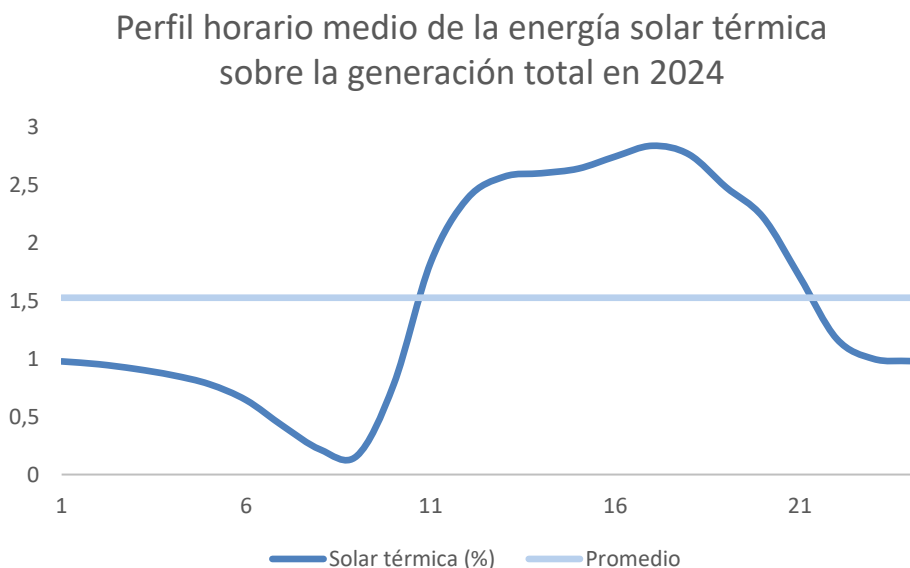


Figura 1. Perfil horario promedio de la energía solar térmica sobre la generación total española (%) [1]

Sin embargo, uno de los desafíos principales en este tipo de plantas es la pérdida de calor durante el almacenamiento, lo que impacta directamente en la eficiencia del sistema. Dentro de estas pérdidas, las que ocurren a través de la base de los depósitos de sales fundentes son

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

particularmente relevantes debido a la transmisión térmica al terreno y a la dificultad de implementar soluciones de aislamiento efectivas. Reducir estas pérdidas térmicas es crucial para mejorar la eficiencia de las plantas y reducir los costos operativos.

Este trabajo tiene como objetivo analizar en profundidad las pérdidas térmicas a través de la base de los depósitos de sales fundentes en plantas termosolares, evaluando distintos métodos de mitigación y su impacto en la eficiencia del sistema. Para ello, se llevará a cabo un análisis del estado del arte de la tecnología termosolar, seguido de un estudio teórico y computacional de la transmisión de calor en la base de los depósitos, utilizando la ley de Fourier y simulaciones en Fluent. Finalmente, se realizará un análisis económico para cuantificar el impacto de las pérdidas térmicas y evaluar la viabilidad de las soluciones propuestas.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Dadas sus condiciones geográficas, España es uno de los líderes a nivel mundial en energías renovables. El fuerte peso que el país ha situado sobre las energías renovables ha promovido el crecimiento de las distintas tecnologías, incluyendo a la solar térmica, cuya potencia instalada ha surgido desde prácticamente cero en 2007, a unos 2.300 MW en 2014, manteniéndose estable hasta la actualidad, según Red Eléctrica Española [2].

Parte del crecimiento de esta tecnología se explica por la gran cantidad de recurso solar con el que cuenta la península Ibérica, presentado en la Figura 2. En la imagen se muestra un mapa de irradiación solar directa (DNI) de España, destacando las zonas en color rojo/naranja, como Andalucía, Murcia, Badajoz. El Atlas de Radiación Solar en España de la Agencia Estatal de Meteorología [3] muestra que estas regiones reciben más de 2.000 kWh/m²/año de irradiación directa normal (DNI), lo que las convierte en zonas ideales para la implementación de tecnologías solares térmicas.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES



Figura 2. Mapa de recurso solar de España – Irradiación Directa Normal media anual (1994-2018) [4]

La energía termosolar ha logrado consolidarse en el mix energético tanto en España como a nivel internacional. Según datos recientes de REE, la potencia instalada en España en plantas termosolares alcanza los 2304 MW, mientras que la generación anual se sitúa en 4696 GWh. Mientras que la fotovoltaica, y otras tecnologías, han crecido considerablemente en potencia

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

instalada en los últimos años, la termosolar se ha estancado tal y como se observa en la Figura 3.

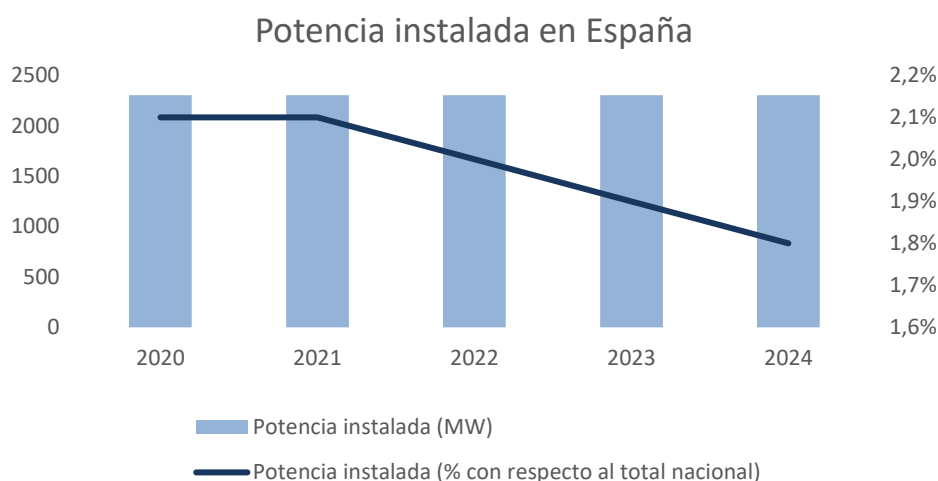


Figura 3. Potencia termosolar instalada en España [1]

Pese a esta ralentización en el desarrollo de nuevas plantas, su participación en el mix energético se ha mantenido constante en torno al 1,7% (Figura 3), lo que demuestra que, aun teniendo una participación minoritaria, las plantas CSP son útiles y necesarias.

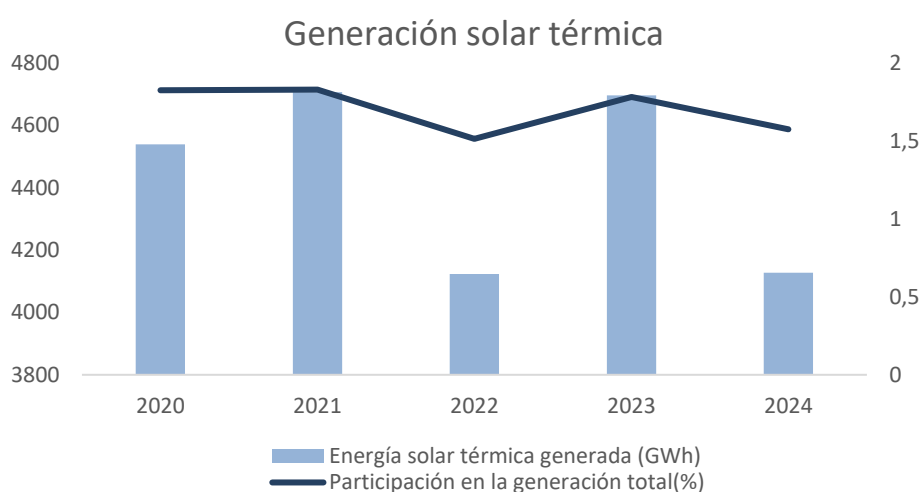


Figura 4. Generación de energía solar térmica en España [1]

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Sin embargo, no son tan eficientes como otros tipos de generación.: para que las plantas CSP sean competitivas en términos de gastos, es necesario diseñar sistemas con eficiencias de ciclo significativamente superiores e innovar en sistemas y materiales de almacenamiento rentables [DUTT17].

Según los datos de Red Eléctrica de España (REE), en septiembre de 2024 el país contaba con 50 plantas termosolares distribuidas a lo largo de su territorio, alcanzando una potencia instalada total de 2304 MW. Plantas como la plataforma Solar Extremadura, la planta de Los Arenales o Gemasolar, son referentes en España. La primera, ubicada en Cáceres y con 200 MW de capacidad, destaca por su extenso campo de colectores cilíndrico-parabólicos y eficiencia operativa. Los Arenales, en Andalucía, incorpora un sistema de almacenamiento térmico mediante sales fundentes que le confiere hasta siete horas de autonomía, mientras que Gemasolar, pionera en receptor central de sales fundentes, permite generar electricidad durante 15 horas sin radiación solar.

Estas tres instalaciones evidencian el liderazgo español al integrar sistemas de almacenamiento de calor, esenciales para el desarrollo de la tecnología, sin embargo, sólo 18 de las 50 plantas en territorio español disponen de esta capacidad.

Este trabajo nace fruto de un deseo de promover, o por lo menos, investigar, la consolidación y optimización de la tecnología en España. Para llevar esto a cabo, se ha decidido centrar el análisis en las pérdidas térmicas de la base de los depósitos de sales, un aspecto crítico, pero poco abordado en la literatura científica. Abordar esta problemática no solo permitirá comprender mejor los mecanismos de disipación de calor que afectan la eficiencia de las plantas CSP, sino también sentar las bases para el desarrollo de soluciones innovadoras que potencien la competitividad y rentabilidad de este tipo de instalaciones, contribuyendo así a reforzar el papel de la energía termosolar en el mix energético nacional.

Capítulo 2. PLANTAS TERMOSOLARES

El diseño de una planta termosolar integra la captación y concentración de la radiación solar, la transformación del calor en energía eléctrica y, en muchos casos, el almacenamiento térmico. Según la forma de concentración y la tecnología de conversión, se distinguen sistemas de colectores cilindro-parabólicos, plantas de torre central, concentradores Fresnel o discos parabólicos, cada uno con características únicas en cuanto a eficiencia y costos. Además, algunas instalaciones incorporan depósitos de sales fundentes u otros medios de almacenamiento, mientras que otras operan sin ese respaldo. Este capítulo explora los principales tipos de plantas termosolares, sus características fundamentales y la comparativa de eficiencia y costos, brindando una visión clara de los criterios esenciales para concebir y dimensionar una instalación de energía solar térmica de manera óptima.

2.1 GENERACIÓN DE ENERGÍA EN PLANTAS TERMOSOLARES

La generación de energía en plantas termosolares se basa en captar la radiación solar directa y transformarla en calor para producir electricidad mediante ciclos termodinámicos. Este apartado resume cómo se aprovecha la radiación solar y qué ciclos, como Rankine y Brayton, permiten su conversión eficiente, destacando la importancia del emplazamiento y el uso de almacenamiento térmico.

2.1.1 RADIACIÓN SOLAR Y SU APROVECHAMIENTO

La energía solar se fundamenta en la radiación electromagnética emitida por el Sol, resultado de procesos de fusión nuclear en su núcleo. Esta radiación interactúa con la atmósfera y la superficie de la tierra, provocando que la radiación se divida en tres componentes: directa, que incide sin modificar su dirección; difusa, que se dispersa al interactuar con moléculas de aire, polvo y nubes; y reflejada, que refleja en la superficie terrestre. De entre los tres tipos, la radiación directa es la mayor y más importante en las aplicaciones fotovoltaicas y

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

fototérmicas. Aunque en días nubosos (por cuestiones meteorológicas) en los que no se recibe radiación directa (o debido a otro obstáculo), se continúa recibiendo radiación solar sobre la superficie debido a la radiación difusa. A dichos días se les denomina días de poca radiación solar [APAR20].

La evaluación de la radiación solar se realiza mediante parámetros fundamentales, entre los que destaca la irradiancia, medida en W/m^2 , que indica la potencia de la radiación que incide sobre una superficie. En el diseño de plantas termosolares, se emplea de manera especial la Direct Normal Irradiance (DNI), la cual cuantifica la radiación directa sobre un plano perpendicular a los rayos solares. La variación diaria y estacional de la radiación, así como las condiciones climatológicas, influyen directamente en la producción de electricidad y en la necesidad de incorporar sistemas de almacenamiento. Por ello, las regiones con altos valores de DNI, como aquellas ubicadas en zonas desérticas o en áreas mediterráneas con clima árido, son especialmente atractivas para el desarrollo e implantación de estas tecnologías.

La generación de energía en las plantas termosolares inicia con la conversión de la radiación solar directa en calor. La radiación solar en la superficie terrestre posee una potencia adecuada para la producción de agua caliente con colectores solares planos, pero no para un ciclo termodinámico eficiente debido a su baja temperatura. Por tanto, resulta necesario concentrar los rayos solares para aumentar la densidad de radiación para alcanzar temperaturas medias y elevadas ($300\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) en el fluido caloportador o HTF (por sus siglas en inglés, *Heat Transfer Fluid*), mejorando la eficiencia en la conversión del calor en electricidad [PLAC16]. No obstante, factores atmosféricos como la nubosidad, la humedad y la presencia de partículas en el aire pueden disminuir la cantidad de radiación directa disponible, haciendo imprescindible la selección de un emplazamiento óptimo para garantizar un rendimiento adecuado.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

2.1.2 CICLOS TERMODINÁMICOS EMPLEADOS

La conversión de calor en energía eléctrica se realiza mediante distintos ciclos termodinámicos, y van desde el ciclo Rankine hasta el ciclo Brayton [PLAC16]. Actualmente, la mayoría de las plantas termosolares utilizan el ciclo Rankine, aunque se están investigando e introduciendo ciclos avanzados para aprovechar de manera óptima las altas temperaturas alcanzables en ciertas configuraciones.

En este sentido, aunque el ciclo Rankine se basa en la conversión del agua en vapor para accionar una turbina y luego volver a condensarlo para reintegrarlo al circuito, ofreciendo gran fiabilidad gracias a su madurez y la estandarización de los equipos, su eficiencia se ve limitada por la temperatura máxima alcanzable. Para mejorar su rendimiento y facilitar el almacenamiento térmico, se está introduciendo el ciclo Clausius-Rankine con sales fundentes, que opera a temperaturas de entre 500 °C y 600 °C y permite seguir generando electricidad incluso sin radiación solar, aunque resulta crítico evitar la solidificación de las sales en tuberías y depósitos. Por otro lado, se investigan configuraciones de alta temperatura, como el ciclo Brayton supercrítico, que puede ofrecer un rendimiento superior al operar con CO₂ supercrítico o aire, pero aún se encuentra en etapas preliminares y requiere materiales capaces de resistir condiciones muy exigentes.

Mohamed Elamine comparó tres de los ciclos más empleados a nivel industrial: Rankine a vapor, Rankine orgánico y Kalina. Estas tres configuraciones se analizaron a lo largo del año para determinar la opción más adecuada en función del rendimiento y del costo. El ciclo de Rankine a vapor logró la mayor generación anual de electricidad, consiguiendo un 6,1% más que el ciclo Kalina y un 8,6% más que el Rankine orgánico. En términos de costo nivelado de la electricidad (LCOE), el ciclo Kalina presentó el valor más alto, alcanzando 17,45 ¢\$/kWh, un 8,4% por encima del Rankine a vapor y un 7,1% más que el Rankine orgánico [ELAM25].

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

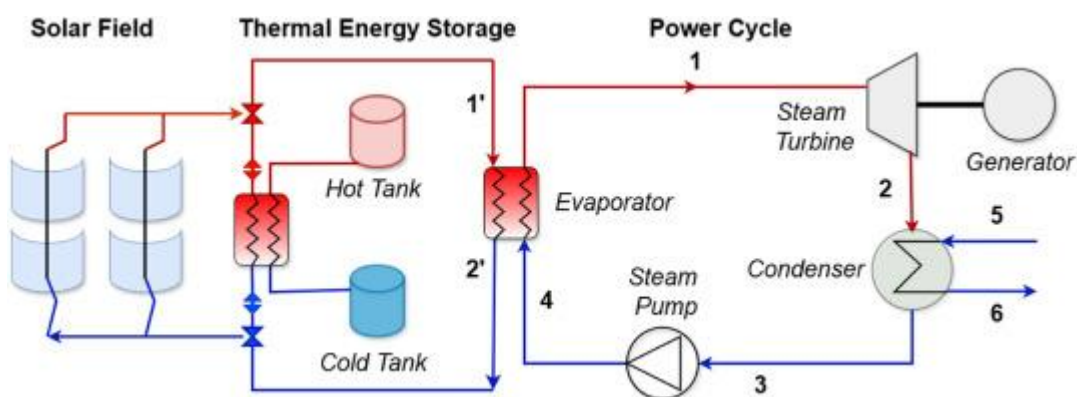


Figura 5. Diagrama de un ciclo Rankine de vapor [ELAM25]

2.2 TIPOS DE PLANTAS TERMOSOLARES

Las plantas termosolares se pueden clasificar en función de la forma en que concentran la radiación solar y de la tecnología empleada para transformar la energía térmica en electricidad. Adicionalmente, cabe distinguir qué plantas cuentan con sistemas de almacenamiento térmico, normalmente en depósitos de sales fundentes, y cuáles operan sin él. A continuación, se describen los principales tipos de plantas termosolares, así como sus características fundamentales, la comparativa de eficiencia y gastos.

2.2.1 CONCENTRADORES CILÍNDRICO-PARABÓLICOS (CCP)

Los CCP constituyen una de las tecnologías de concentración solar más consolidadas desde el punto de vista comercial, abarcando aproximadamente el 90% de las plantas construidas [5]. Se basan en colectores de forma parabólica que concentran la radiación en un tubo receptor por donde circula un fluido caloportador (típicamente aceite sintético, aunque también se emplean sales fundentes). Esto permite alcanzar temperaturas en un rango de 300–400 °C con aceite, y superiores a los 500 °C con sales fundentes.

Gracias a esta capacidad de concentrar y transferir calor de manera eficiente, los CCP alcanzan una eficiencia solar-eléctrica neta de alrededor del 15% [6]. Aunque es algo menor que la de la tecnología de torre central, su larga trayectoria operativa y la madurez de sus

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

procesos constituyen ventajas clave. Además de la generación de electricidad en plantas termosolares, se utilizan para suministrar vapor industrial y para cogeneración de calor y electricidad.

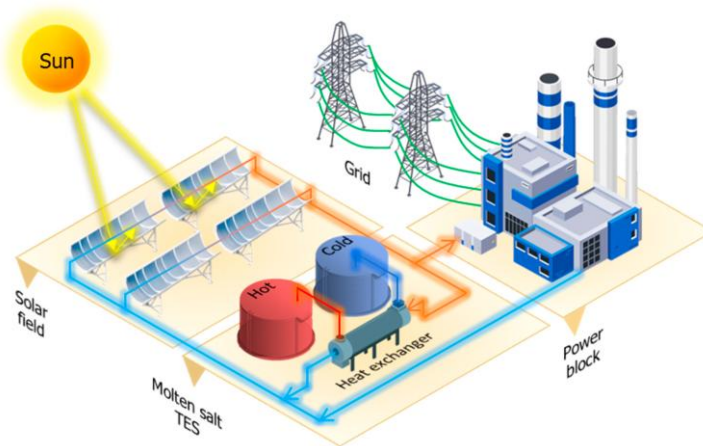


Figura 6. Esquema de una planta CCP [PRIE24]

Históricamente, los CCP han requerido inversiones relativamente elevadas (CAPEX típico ~ 5 M€/MW [SERR18]), llegando hasta 6–7 M€/MW en proyectos de 2010 que incluían almacenamiento térmico de 7 horas [BENI14]. Sin embargo, la amplia experiencia acumulada ha permitido reducir costes gradualmente. El mantenimiento (O&M) se ha optimizado tras alrededor de 15 años de operación, situándose en valores de 0,02–0,04 €/kWh. El LCOE ha descendido desde 0,18–0,22 €/kWh hasta aproximadamente 0,14 €/kWh proyectado, reflejando la competitividad creciente de esta tecnología.

Los CCP siguen siendo una opción confiable para aplicaciones industriales y energéticas gracias a su eficiencia consolidada, experiencia comercial y perspectivas de reducción de costes. Aun así, requieren un seguimiento solar preciso y un mantenimiento periódico de sus espejos para garantizar el máximo rendimiento.

2.2.2 TORRE O RECEPTOR CENTRAL

Los sistemas de torre central, también llamados de receptor central, emplean un gran campo de heliostatos (espejos móviles con seguimiento de dos ejes) para redirigir y concentrar la

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

radiación solar hacia un receptor situado en la parte superior de una torre. En este receptor, un fluido caloportador (a menudo sales fundentes) absorbe el calor y lo transfiere posteriormente a un circuito de agua-vapor, generando electricidad a través de una turbina.

Una de las principales ventajas de esta tecnología es la posibilidad de alcanzar temperaturas entre 500 °C y 600 °C, lo que permite rendimientos más elevados que otros sistemas de concentración solar y facilita la integración de almacenamiento térmico en sales. Se han registrado eficiencias netas superiores al 20% [7], con un potencial de mejora a medida que se aumentan las temperaturas y se perfeccionan los ciclos de potencia.

La alta temperatura alcanzada en el receptor central favorece la eficiencia de los procesos termodinámicos y, sobre todo, contribuye a la viabilidad de grandes sistemas de almacenamiento, otorgando mayor estabilidad a la generación eléctrica. No obstante, su implementación requiere superficies extensas para la disposición de los heliostatos y un cuidadoso control del flujo de sales fundentes.

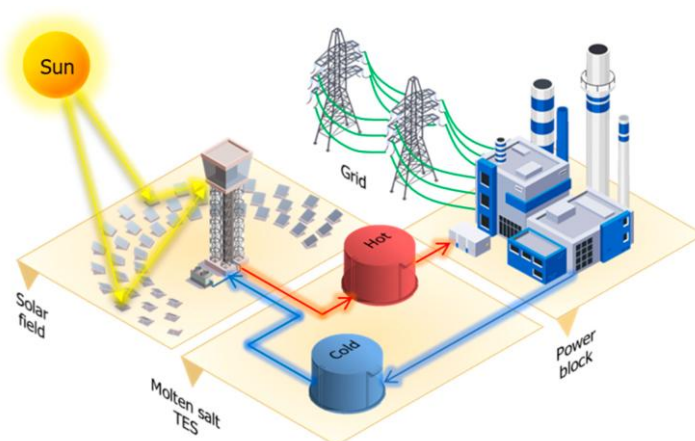


Figura 7. Esquema de planta con torre central [PRIE24]

Los sistemas de torre central implican un CAPEX inicial elevado (en proyectos pioneros se cifró en torno a ~7 M€/MW) debido al alto coste de la torre, la precisión requerida en el diseño de los heliostatos y la complejidad del receptor. Sin embargo, su escalabilidad (plantas de más de 100 MW) y la incorporación de almacenamiento térmico en sales

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

permiten reducir gradualmente el LCOE, situándolo en la franja de 0,12–0,15 €/kWh en zonas de alta irradiación [8].

Entre los desafíos técnicos y económicos asociados, destacan:

- El elevado coste de construcción de la torre y el campo de heliostatos.
- La complejidad en la gestión de las sales fundentes y en el diseño del receptor.
- La necesidad de grandes extensiones de terreno para una óptima disposición de los heliostatos.

Pese a estos retos, la tecnología de torre central se considera prometedora en el ámbito de la energía solar de concentración, especialmente por su capacidad de almacenamiento a gran escala, lo que contribuye a una mayor firmeza en la producción de electricidad.

2.2.3 REFLECTORES LINEALES DE FRESNEL

Los reflectores lineales de Fresnel constituyen una opción más sencilla y económica frente a los colectores cilíndrico-parabólicos (CCP). Se basan en un conjunto de espejos planos (o ligeramente curvados) dispuestos en líneas paralelas, que concentran la radiación solar en un tubo receptor suspendido sobre dichos espejos. En algunos diseños, se añade un reflector adicional encima del tubo para aumentar la concentración de la radiación.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

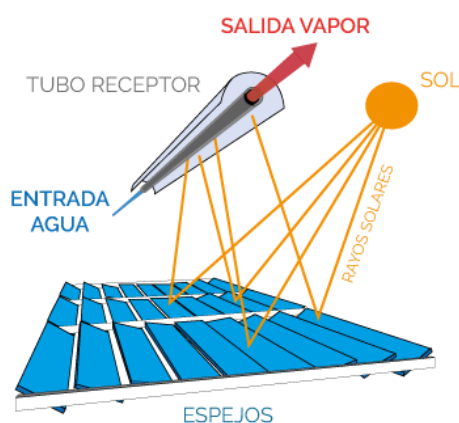


Figura 8. Esquema de planta con receptores lineales de Fresnel [9]

La concentración de energía y las temperaturas alcanzadas por estos sistemas son menores que las de los CCP o las torres centrales, traduciéndose en una eficiencia solar-eléctrica de alrededor de 10–12% [10]. Esta limitación se debe, en parte, a las mayores pérdidas ópticas y al menor grado de concentración que proporcionan los espejos planos.

Pese a su menor eficiencia, los sistemas de Fresnel ofrecen ciertas ventajas:

- Menor coste de fabricación y mantenimiento por usar espejos planos.
- Diseño estructural más simple, que requiere menos espacio.
- Facilidad de integración en entornos industriales con restricciones de terreno.

No obstante, y precisamente debido a su eficiencia relativamente baja, su adopción masiva sigue siendo limitada frente a otras tecnologías de concentración solar.

El diseño simplificado y el uso de espejos planos abaratan sensiblemente la construcción, reduciendo el CAPEX en aproximadamente un 10–20% respecto a los CCP, situándose en torno a ~4 M€/MW [10]. Asimismo, el OPEX es menor por la menor complejidad de componentes. Sin embargo, al requerir una mayor área de captación para generar la misma potencia (debido a su menor eficiencia), el LCOE se ubica en el rango de 150–200 €/MWh.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

En la actualidad, la implantación comercial de los reflectores lineales de Fresnel es todavía limitada, con pocos datos acerca de plantas de gran tamaño.



Figura 9. Colector de demostración Fresnel lineal MAN instalado en la Plataforma Solar de Almería [11]

2.2.4 DISCO PARABÓLICO (STIRLING)

Los sistemas de disco parabólico destacan por utilizar un reflector con geometría parabólica para concentrar la radiación solar en un único punto focal, donde se sitúa un receptor térmico acoplado habitualmente a un motor Stirling. Este alto factor de concentración permite alcanzar temperaturas muy elevadas (se han logrado récords de hasta 31,25% en eficiencia de conversión [5], con temperaturas de trabajo cercanas a 750 °C [MUÑO14]).

Debido a la concentración en un punto y a la alta temperatura de operación, los discos parabólicos ofrecen una eficiencia térmica mayor que la de otros sistemas de concentración solar. Además, su diseño modular facilita aplicaciones descentralizadas, sin necesidad de grandes infraestructuras.

No obstante, existen dificultades para su escalado a grandes potencias, ya que cada unidad de disco parabólico funciona de manera independiente. Esto, a su vez, incrementa la complejidad de la operación y el mantenimiento cuando se agrupan múltiples unidades.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES



Figura 10. Disco parabólico Stirling [12]

Pese a la alta eficiencia puntual, cada sistema de disco parabólico requiere componentes de alta precisión (reflector y motor Stirling), lo que conlleva un CAPEX muy elevado (>10.000 €/kW en prototipos). Además, carece de sistemas de almacenamiento térmico, y sus costes de mantenimiento (individuales para cada disco) también son altos, dificultando su competitividad en grandes instalaciones. Por ello, su LCOE no resulta competitivo a gran escala.

No obstante, su modularidad y eficiencia los hacen atractivos para aplicaciones específicas o zonas remotas, donde se necesita una fuente autónoma de generación eléctrica sin requerir grandes plantas solares. Tal como se resume en la tabla de datos, los sistemas de disco parabólico representan una alternativa enfocada a nichos concretos, más que a instalaciones de gran capacidad.

2.2.5 COMPARATIVA DE COSTES Y RENDIMIENTOS

Los datos sobre costes y rendimientos aproximados se muestran de forma resumida en la tabla 1:

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

<i>Tecnología CSP</i>	<i>Eficiencia neta</i>	<i>CAPEX (€/kW)</i>	<i>O&M (€/MWh)</i>	<i>LCOE (€/MWh)</i>	<i>actual</i>
<i>CCP</i>	<i>~15%</i>	<i>~5.000</i>	<i>20–40</i>	<i>150–220</i> <i>(mejorando)</i>	
<i>Torre central (CRS)</i>	<i>~20%</i>	<i>~7.000</i>	<i>25–50</i> <i>(estimado)</i>	<i>120–150 (a la baja)</i>	
<i>Fresnel lineal</i>	<i>~10–12%</i> <i>(baja)</i>	<i>~4.000 (est.)</i>	<i>15–30 (bajo)</i>	<i>~150–200</i> <i>(poca data)</i>	
<i>Disco parabólico</i>	<i>25–30% (alta)</i>	<i>(>10.000)</i> <i>prototipo</i>	<i>n/d</i>	<i>n/d (no comercial)</i>	

Tabla 1. Comparativa técnica y económica de tecnologías CSP

Fuentes: IRENA, IEA, estimaciones sectoriales. CAPEX/OPEX aproximados para plantas con almacenamiento estándar.

Sus aplicaciones y escalabilidad se resumen en los siguientes puntos:

- Torres Centrales: Aptas para grandes plantas (50–150 MW o más). Integran sistemas de almacenamiento en sales y ofrecen producción eléctrica firme.
- CCP: Muy extendidas en plantas de ~50 MW, con posibilidades de almacenamiento tanto directo como indirecto.
- Fresnel Lineal: Suele destinarse a instalaciones de tamaño mediano o aplicaciones industriales de calor de proceso.
- Disco Parabólico-Stirling: Limitaciones de escalabilidad; su uso se enfoca en menor escala, autoconsumo o proyectos de I+D.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

2.3 TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE SALES

2.3.1 IMPORTANCIA DE LOS TANQUES DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS CSP

La implantación de tanques térmicos permite a la planta CSP mantener la producción eléctrica de forma continua, superando la intermitencia inherente de la energía solar. Cuando la irradiación solar cesa (puesta de sol o pasos de nubes), el calor almacenado en las sales fundentes se transfiere al generador de vapor, sosteniendo la generación eléctrica sin interrupción. De este modo, la planta puede abastecer la red durante los picos de demanda en la tarde-noche o funcionar de base por varias horas tras la caída del sol. Este almacenamiento otorga una gran flexibilidad: el operador puede decidir cuándo turbinar la energía almacenada, adaptándose a precios de mercado o requerimientos de estabilidad del sistema eléctrico.

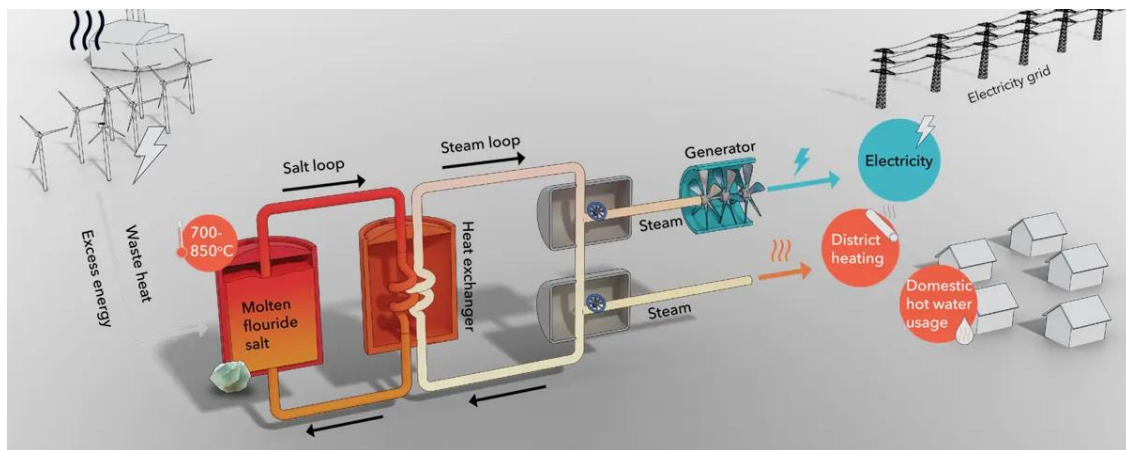


Figura 11. Transformación de calor en energía eléctrica [14]

El almacenamiento térmico en sales fundentes se ha consolidado como una tecnología esencial para viabilizar la generación continua de electricidad a partir del sol. Este sistema emplea típicamente una mezcla eutéctica de nitratos (conocida como solar salt, ~60% NaNO_3 y 40% KNO_3) como medio de almacenamiento sensible de calor. La incorporación de

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

tanques de sales fundentes permite almacenar el calor recogido durante las horas de sol y liberarlo cuando se requiera, adaptando así la producción a la demanda eléctrica. Gracias a ello, las plantas CSP pueden ser operadas de forma flexible o “despachable”, generando energía incluso de noche o bajo nublados, lo que aumenta su factor de capacidad y confiabilidad en el suministro [OSOR24]. Por ejemplo, en una planta típica de torre de 100–110 MW con ~10 horas de almacenamiento, los tanques pueden guardar del orden de 1.100 MWh térmicos, suficientes para mantener la producción al 100% durante todo el período nocturno. En términos operativos, la incorporación de almacenamiento térmico reduce el *curtailment* (energía solar desaprovechada) y mejora la economía del proyecto al incrementar las horas anuales de generación y disminuir el costo nivelado de la energía (LCOE) [OSOR24].

La elección de sales fundentes en tanques como medio de almacenamiento se debe a varias ventajas clave. En primer lugar, presentan una elevada estabilidad térmica: las sales nitrato operan comúnmente hasta ~565 °C sin descomponerse, temperatura que hoy en día se considera el estado del arte en CSP [OSOR24]. Esta alta temperatura de trabajo permite almacenar gran cantidad de energía en volumen moderado (densidad energética de ~70–200 kWh/m³, dependiendo del salto térmico disponible) [PRIE24] [BARR23], y mejora la eficiencia del ciclo térmico (Rankine) al generar vapor sobrecalentado a mayor temperatura. Asimismo, las sales fundentes tienen propiedades físicas y químicas favorables: bajo vapor de presión, no son inflamables ni tóxicas, y mantienen su capacidad calorífica prácticamente constante en el rango operativo (300–565 °C). También exhiben larga vida útil y ciclabilidad: pueden soportar del orden de 10.000 ciclos de carga/descarga (equivalente a ~30 años de operación diaria) con degradación mínima, ya que el material de almacenamiento no sufre cambios de fase ni reacciones químicas significativas en cada ciclo. Estas características hacen que el almacenamiento en tanques de sales fundentes tenga una eficiencia energética muy alta, cercana al 99% en plantas comerciales. En otras palabras, las pérdidas térmicas son muy reducidas (del orden del 1% de la energía almacenada), gracias al buen aislamiento térmico de los tanques y a la operación optimizada, como se ha observado en proyectos como Andasol (planta cilindroparábólica en España) o Solar Two

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

(prototipo de torre en EE.UU.) [PRIE24]. Esto posiciona a los tanques de sales fundentes como una solución sumamente eficiente para almacenar energía solar.

En resumen, la configuración de dos tanques de sales fundentes (uno caliente y otro frío) se ha convertido en la tecnología de almacenamiento térmico preferida en aplicaciones CSP, especialmente en plantas cilindro-parabólicas y de torre. Es una solución probada a escala comercial, con decenas de plantas operando exitosamente en todo el mundo desde 2010, y aunque presenta desafíos de ingeniería, estos son manejables comparados con las limitaciones de las alternativas.

2.3.2 DISEÑO DE UN TANQUE

Una vez tomada la decisión de incorporar almacenamiento térmico mediante sales fundentes, resulta crítico un diseño riguroso del tanque (o tanques) para garantizar la seguridad, eficiencia y durabilidad del sistema. A continuación, se resumen los criterios básicos de diseño estructural y térmico para tanques de sales fundentes en plantas CSP, considerando las mejores prácticas documentadas en la literatura técnica.



Figura 12. Tanques de sales fundidas [13]

2.3.2.1 Consideraciones generales

1. Configuración general y dimensiones:

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

La solución típica es un sistema de dos tanques atmosféricos de acero al carbono o inoxidable (un tanque “caliente” y otro “frío”), instalados a nivel del suelo. El tanque frío almacena las sales a la temperatura baja del ciclo ($\approx 290\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la mayoría de plantas), y el tanque caliente contiene las sales elevadas a la temperatura máxima ($\approx 390\text{ }^{\circ}\text{C}$ en colectores cilindro-parabólicos, hasta $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ en torres de potencia). Ambos tanques suelen ser de forma cilíndrica vertical, con diámetros del orden de 20–40 m y una altura óptima de aproximadamente 14 m. Esta altura estándar obedece a un compromiso: tanques más altos reducirían las pérdidas térmicas (menor área superficial por volumen), pero en la práctica se limita a unos 14 m por restricciones mecánicas de las bombas sumergidas (la longitud de eje máxima de las bombas de sales impide mayor altura).

La capacidad de almacenamiento se define en función de las horas de autonomía deseadas a plena carga y la potencia térmica del ciclo; por ejemplo, para 6 h de almacenamiento en una planta de 50 MWe ($\approx 1200\text{ MWhr}$ térmicos requeridos), se dimensiona el volumen total de sales mediante la fórmula $Q = mc_p\Delta T$, considerando el salto térmico utilizable (entre tanque frío y caliente) y las propiedades termofísicas de la sal (densidad $\sim 1800\text{--}2100\text{ kg/m}^3$, calor específico $\sim 1.5\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$). En la práctica, esto se traduce en decenas de miles de toneladas de sal, por lo que el diseño estructural del tanque debe soportar grandes cargas de peso y presión hidrostática (aunque al ser líquido a presión atmosférica, la presión interna es moderada, e.g. $\sim 2\text{--}3\text{ bar}$ en el fondo) [PRIE24].

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

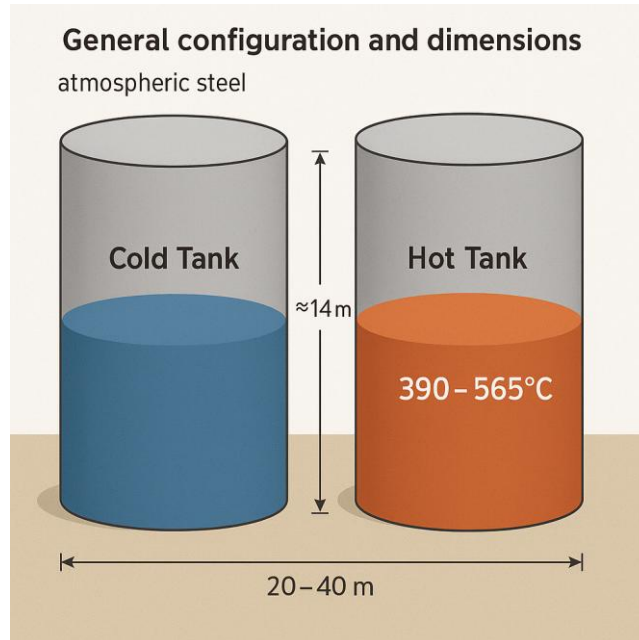


Figura 13. Esquema sencillo de un sistema de doble tanque

2. Diseño estructural y normativas:

Actualmente no existe un código de diseño unificado específico para tanques de sales fundentes, por lo que se emplean normativas análogas combinadas con criterios especiales. En la práctica, el estándar del *American Petroleum Institute* API 650 (tanques soldados de almacenamiento a presión atmosférica) se utiliza como base, ampliándolo mediante sus Apéndices M (diseño a temperaturas elevadas) y N (uso de materiales no contemplados originalmente) para cubrir las condiciones operativas de alta temperatura [APIS18]. Adicionalmente, se incorporan criterios del código ASME BPVC: en concreto, la Sección II, Parte D proporciona las propiedades mecánicas de los materiales (aceros) en función de la temperatura, y la Sección VIII, División 2 suministra reglas de diseño por análisis de esfuerzos (incluyendo métodos de análisis por Elementos Finitos) [ASME20]. Estas guías permiten considerar la reducción de la resistencia mecánica del acero a alta temperatura y evaluar mediante simulaciones FEA las tensiones y la fatiga esperadas bajo ciclos térmicos, asegurando la integridad estructural del tanque [PRIE24].

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

En términos de material, el acero al carbono (ASTM A516 Gr.70) suele emplearse para el tanque frío y tuberías asociadas, dado que opera por debajo de $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ y ofrece buena resistencia mecánica y económica en ese rango [OSOR24]. Para el tanque caliente en plantas torre ($\sim 565\text{ }^{\circ}\text{C}$), a menudo se eligen aceros aleados de mayor resistencia al calor y corrosión, como aceros inoxidables estabilizados (ej. AISI 347H, 321H) o inoxidables de baja densidad de carbono (316L, 304L con tratamiento) [PRIE24]. Estos materiales soportan mejor la temperatura máxima sin comprometer la integridad a largo plazo, a costa de un mayor costo.

En cualquier caso, se incorpora un margen de corrosión en el espesor: dado que las sales fundentes (particularmente si contienen impurezas como cloruros) pueden provocar corrosión lenta en el acero, se sobredimensiona el espesor de las paredes para garantizar la vida útil deseada (típicamente 30 años). Se han reportado tasas de corrosión del orden de 0.008 mm/año para acero al carbono a $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0.024 mm/año para aceros inoxidables a $\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que se aplican tolerancias acordes a estos valores para no comprometer la seguridad [FERN19].

3. Efectos térmicos y gestión de dilataciones:

Un aspecto esencial en el diseño es acomodar las dilataciones térmicas del tanque y sus accesorios. Cuando un tanque de acero de 14 m de altura se calienta de, por ejemplo, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300+\text{ }^{\circ}\text{C}$, su altura y diámetro pueden aumentar varios milímetros por dilatación. Por tanto, se deben incluir juntas de expansión y soportes deslizantes en las tuberías conectadas a los tanques, permitiendo movimiento relativo sin causar esfuerzos en las boquillas. Igualmente, el techo o domo del tanque (si es fijo) y las estructuras adyacentes deben contemplar la expansión. Se procura mantener los gradientes de temperatura en la estructura lo más bajos posible: diferencias significativas de temperatura entre distintas zonas del tanque pueden inducir tensiones.

En operación normal, las sales dentro del tanque caliente tienden a estratificarse térmicamente con ligeras diferencias entre la parte superior e inferior; sin embargo, un diseño adecuado de los difusores de entrada/salida de sal minimiza estas diferencias. Se

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

recomiendan análisis térmicos 3D por computador (FEA) para evaluar los gradientes entre el fondo y la pared, especialmente durante transitorios de carga/descarga. Si se detecta una alta discrepancia de temperaturas (por ejemplo, el fondo mucho más frío que la pared durante la carga inicial), pueden adoptarse medidas como precalentamiento del fondo, incrementos graduales de potencia, o refuerzos locales (anillo inferior más robusto, placas de enfriamiento controlado, etc.) [PRIE24]. En definitiva, el tanque debe diseñarse para resistir ciclos térmicos repetitivos (arranques y paradas diarios) sin fatiga prematura. Los estudios han identificado la fatiga de bajo ciclo en soldaduras, el shock térmico por cargas abruptas, y la relajación de tensiones en zonas calientes como posibles modos de falla si no se gestionan adecuadamente las transiciones térmicas [OSOR24].

4. Seguridad y fiabilidad:

La integridad de los tanques de sales fundentes es prioritaria por razones de seguridad operacional. A diferencia de otros medios, las sales fundentes no son inflamables ni presurizadas, lo cual reduce riesgos de incendio o explosión. Sin embargo, las consecuencias de una fuga de sal caliente pueden ser graves: si el tanque presentase un escape o rotura, el derrame de cientos de toneladas de sal a $\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ podría causar daños materiales severos, por lo que se implementan diques de contención alrededor de los tanques (similares a los de tanques de hidrocarburos) para confinar cualquier derrame.

El diseño debe prevenir fugas mediante soldaduras de alta calidad y selección de materiales resistentes a la corrosión por las sales. Se utilizan técnicas de ensayos no destructivos (ultrasonidos, radiografías) en las uniones soldadas críticas durante la construcción, y se pueden instalar sensores de temperatura o detectores en la cubeta de contención para alertar de posibles filtraciones pequeñas.

Adicionalmente, el techo del tanque debe considerar eventuales sobrepresiones o vacío: aunque los tanques operan a presión atmosférica, cambios bruscos de temperatura pueden generar presiones internas ligeramente positivas o negativas. Por ello, muchos tanques tienen

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

venteo controlado y a veces un diseño de techo abovedado elíptico, capaz de soportar tanto sobrepresión moderada como vacío parcial sin colapsar.

En general, los tanques de sal se consideran seguros en comparación con otras tecnologías, pero deben seguir estrictos estándares de diseño y mantenimiento para asegurar su fiabilidad a largo plazo [PRIE24]. Los informes de feedback operativo han documentado algunos fallos tempranos en tanques comerciales (fisuras en soldaduras, deformaciones en el fondo, corrosión acelerada) atribuidos a deficiencias de diseño o control de calidad, subrayando la necesidad de seguir las mejores prácticas de ingeniería [OSOR24]. Por ejemplo, en la planta Crescent Dunes (EE.UU., 2015) se registraron problemas de fugas y tensiones térmicas en el tanque caliente tras pocos años, lo que llevó a costosas reparaciones. Estas lecciones han motivado iniciativas de la industria (NREL, Sandia Labs) para desarrollar guías de diseño específicas (best practices) que complementen los códigos existentes.

2.3.2.2 Consideraciones para el aislamiento térmico

Mantener una alta eficiencia de almacenamiento (cercana al 99 %) es posible, pero exige que el tanque minimice las pérdidas de calor tanto a la atmósfera como al subsuelo. Para conseguirlo se combinan dos estrategias complementarias: el aislamiento de la envolvente (paredes y techo) y una cimentación multicapa que atenúa el flujo térmico descendente.

En la envolvente exterior se colocan mantas de lana mineral, sílice amorfa u otros paneles de baja conductividad capaces de soportar los casi 600 °C que pueden alcanzar las sales en servicio. Estas mantas se protegen con una chapa metálica que actúa como barrera mecánica y frente a la intemperie. El techo se aísla con el mismo sistema para frenar la convección natural del aire caliente que, de otro modo, se estabilizaría sobre la superficie superior. Gracias a esta configuración, en la planta comercial de Andasol se midieron pérdidas inferiores al 1 % del contenido energético en un periodo de 24 h, lo que confirma la eficacia del aislamiento superficial. Cuando la instalación detiene la circulación de sales, por mantenimiento o parada prolongada, entra en funcionamiento un trazado eléctrico (o de fluido térmico) que mantiene el fluido por encima de su punto de fusión (~220 °C para la

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

mezcla nitrato), evitando obstrucciones y daños estructurales asociados a la solidificación [PRIE24].

La base del tanque se concibe como un sistema estratificado de capas cuyas funciones térmicas y estructurales se complementan para contener el enorme peso de las sales fundentes y, al mismo tiempo, atenuar el flujo de calor hacia el subsuelo. En el perímetro se dispone un anillo de acero envuelto en una zapata circular de hormigón armado, que sostiene el casco cilíndrico y confina lateralmente los materiales aislantes de la cimentación. Sobre la losa, justo bajo la placa de fondo, se extiende una delgada capa de arena de nivelación que garantiza el contacto uniforme y evita concentraciones puntuales de carga.

A continuación, se intercala una capa de grava o zahorra compactada que, aunque aporta poco aislamiento por sí misma, reparte las cargas sobre el aislante principal y previene asentamientos diferenciales. Bajo esta grava se coloca el material aislante más importante: arlita granulada de alta porosidad, cuya conductividad en torno a $0,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ reduce de forma drástica la conducción térmica hacia la losa de hormigón y el terreno. La arlita actúa así como barrera térmica primaria dentro de la cimentación multicapa. Todo el paquete queda contenido por el propio anillo perimetral; para impedir que este elemento metálico se convierta en un puente térmico, se recubre con material aislante o se encapsula en el hormigón, de modo que el calor no se canalice hacia el exterior.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

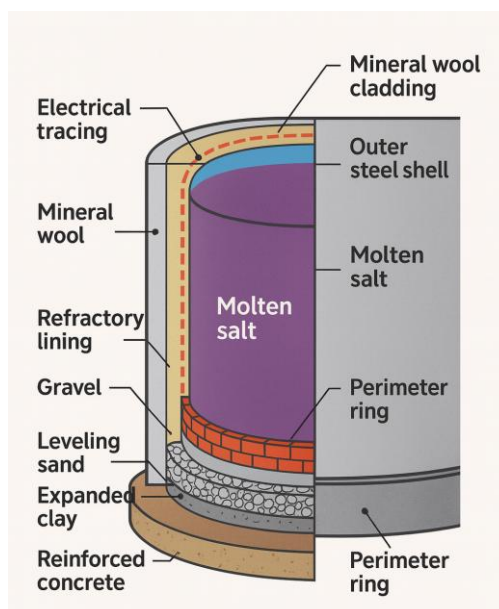


Figura 14. Esquema típico de un tanque de sales molten con aislamiento y base estratificada

Por encima del fondo de acero, que distribuye la presión hidrostática y soporta las sales, se instala un revestimiento refractario de ladrillo o hormigón denso. Este forro absorbe parte del gradiente térmico, mantiene la placa metálica a menor temperatura y añade un escalón adicional de protección frente a la corrosión y la fatiga térmica. El conjunto se completa, en diseños avanzados, con tubos de refrigeración dispuestos dentro de la losa de hormigón, capaces de evacuar calor en caso de alcanzar temperaturas demasiado altas, y con redes de termopares que monitorean los gradientes a través de cada estrato y permiten detectar desviaciones antes de que se comprometa la integridad del tanque [PRIE24].

Gracias a esta configuración multicapa, la mayor parte del salto térmico entre las sales calientes y el ambiente se absorbe dentro de la cimentación misma; el terreno se mantiene a temperaturas muy inferiores a las de operación, se limitan las deformaciones térmicas y las pérdidas de calor por la base permanecen en valores manejables, contribuyendo decisivamente a la eficiencia global del sistema.

La interacción entre la envolvente y la base estratificada es crucial: mientras el aislamiento exterior frena la radiación y la convección hacia el ambiente, la cimentación multicapa

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

bloquea la conducción descendente, de forma que la mayor parte del salto térmico se absorbe dentro del propio sistema de capas y no llega a deformar el terreno. Al complementar estas barreras con el sistema de trazado y protocolos de recirculación durante paradas, el diseño integral permite que las pérdidas globales queden alrededor de ese 1 % diario medido en operación y que la temperatura de la sal permanezca estable, garantizando así tanto la eficiencia energética como la longevidad estructural del tanque [PRIE24].

En la figura 15 se muestra esquemáticamente una sección típica de la base de un tanque de sales fundentes, con los elementos descritos: anillo perimetral empotrado en cemento, relleno interno (arena + arlita + grava), placa base de acero y ladrillos refractarios internos.

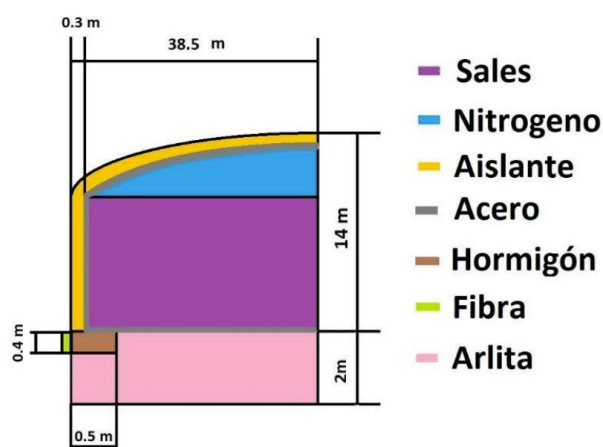


Figura 15. Esquema típico de un tanque de almacenamiento de sales fundentes [VARE20]

Capítulo 3. PÉRDIDAS TÉRMICAS

A pesar de las cuidadosas medidas de diseño de los tanques, el flujo de calor hacia el exterior no puede eliminarse por completo. Es por ello por lo que muchos investigadores han abordado la cuantificación de las pérdidas térmicas por la base en tanques de sales.

3.1 ESTUDIOS HISTÓRICOS

Herrmann y colaboradores, en 2004, realizaron uno de los primeros estudios experimentales exhaustivos sobre pérdidas térmicas en tanques de almacenamiento de sales fundentes. Ensayaron prototipos de tanques bajo condiciones reales, midiendo los flujos de calor disipados y desarrollando correlaciones empíricas para cuantificar dichas pérdidas en función de parámetros operativos como la temperatura de las sales y las condiciones ambientales [HERR04]. Estas correlaciones proporcionaron una base para estimar las pérdidas de calor de los tanques en plantas termosolares, evidenciando la magnitud relativamente baja de pérdidas (del orden del 1% de la energía almacenada por día) gracias a un buen aislamiento, pero destacando a la vez las zonas críticas de disipación. En particular, sus resultados señalaron que una parte sustancial de las pérdidas ocurre a través de las superficies expuestas del tanque (paredes, techo y base), sentando las bases para trabajos de modelado posteriores orientados a minimizar dichas pérdidas.

Gabbrielli y Zamparelli, en 2009, avanzaron este análisis mediante el desarrollo de modelos teóricos y numéricos integrales del comportamiento térmico y estructural de tanques de sales fundentes. En su trabajo, formularon por un lado un modelo global de energía para predecir tanto el perfil de temperaturas interno del fluido como las pérdidas de calor hacia el exterior bajo condiciones estacionarias, y por otro un modelo transitorio para simular el enfriamiento del tanque durante periodos de inactividad (stand-by) a causa de las pérdidas térmicas. Complementariamente, incorporaron un análisis mecánico por elementos finitos del tanque, evaluando las tensiones térmicas en sus componentes (principalmente en las placas del fondo

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

y las paredes) derivadas de los gradientes de temperatura [GABB09]. Este enfoque combinado permitió identificar restricciones de diseño óptimo: por ejemplo, Gabbrielli y Zamparelli concluyen que un tanque de acero al carbono con aislamiento interno puede diseñarse para mantener la temperatura del acero bajo límites seguros y minimizar costos, definiendo dimensiones óptimas (altura ~11 m, diámetro ~22 m en su caso estudiado) que equilibran capacidad térmica, pérdidas de calor y requerimientos estructurales. Sus modelos destacaron la influencia de la geometría del tanque en las pérdidas (tanques más altos tienen relativamente menos área expuesta por unidad de volumen, reduciendo pérdidas) y subrayaron la importancia de un buen aislamiento en el fondo del tanque, dado que el contacto con la cimentación fría puede inducir fuertes gradientes térmicos y esfuerzos en esa zona crítica.

Ya en 2012, Pérez-Segarra y colaboradores llevaron a cabo un estudio numérico detallado que amplió la comprensión de las pérdidas térmicas, introduciendo simulaciones CFD 3D transitorias de tanques de sales bajo diversas configuraciones. Su modelo incluyó de forma explícita todos los mecanismos de transferencia de calor y las distintas partes del sistema: la convección natural dentro del fluido fundido, la estratificación y el intercambio radiativo en el espacio de gas sobre las sales, la conducción a través de las paredes metálicas y sus capas de aislamiento, así como el flujo de calor hacia la fundación (cimentación) bajo el tanque. Examinaron diferentes tamaños de tanque y volúmenes de carga de sal, evaluando cómo estas variables afectan la tasa de enfriamiento y la distribución de temperaturas internas. Los resultados numéricos obtenidos por Pérez-Segarra y colaboradores mostraron una coherencia notable con las correlaciones empíricas previas (e.g. las propuestas por Herrmann), validando así su aplicabilidad en escalas y diseños variados [PERE12]. En particular, constataron que el interior del tanque permanece casi isoterma, incluso durante la disipación de calor, y como la convección natural tiende a homogeneizar la temperatura de las sales, se vio que las zonas más frías se localizan cerca de las superficies expuestas al ambiente, principalmente la superficie libre superior de las sales y el fondo del tanque en contacto con el suelo.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Consecuentemente, la mayor caída de temperatura ocurre a través de las paredes y, sobre todo, a través del fondo, atravesando las capas de aislamiento hasta la base de hormigón, lo que confirma que un diseño óptimo debe prestar especial atención al aislamiento de la base del tanque. En síntesis, este trabajo aportó una visión detallada y cuantitativa de cómo se distribuyen las pérdidas en el tanque, respaldando con evidencia numérica las tendencias observadas experimentalmente y facilitando la optimización térmica del diseño (aislamiento, geometría, materiales) de los tanques de sales fundentes.

Y en 2015, Suárez y compañía, por su parte, enfocaron el problema desde la perspectiva operativa, realizando un análisis transitorio del enfriamiento de un tanque de sales durante largos periodos sin carga, debido a las pérdidas de calor en modo de espera. Mediante simulaciones CFD, este estudio evaluó la evolución temporal de la temperatura del fluido almacenado bajo distintas condiciones iniciales (tanque “caliente” vs “frío”, niveles de llenado variables) y tasas de pérdida hacia el ambiente. Un aspecto crítico que abordaron fue el riesgo de solidificación de la sal (mezcla nitrito/nitrato con punto de fusión $\sim 221\text{ }^{\circ}\text{C}$) cuando el tanque permanece inactivo. Los resultados de Suárez mostraron que la probabilidad de cristalización local de las sales depende fuertemente del nivel de carga del tanque: con niveles de carga mínimos (poca altura de sal), el enfriamiento del fluido es más rápido y se pueden alcanzar temperaturas cercanas al punto de congelación en zonas bajas del tanque tras un periodo prolongado en espera, elevando el riesgo de formación de sólidos [SUAR15]. En cambio, con el tanque lleno (nivel de carga máximo), la inercia térmica es mucho mayor y el riesgo de solidificación es prácticamente nulo incluso durante paradas largas, ya que la temperatura de la sal se mantiene muy por encima de $221\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante semanas. Este trabajo cuantificó, para distintos escenarios, las curvas de enfriamiento transitorio y el tiempo hasta la posible aparición de sólidos, y propuso criterios operativos para evitar problemas: por ejemplo, determinar un nivel de carga seguro mínimo en función de la temperatura inicial de las sales y la duración esperada del stand-by [SUAR15]. Sus hallazgos complementan a los estudios previos de pérdidas térmicas estacionarias al poner el foco en la dinámica temporal y en situaciones de operación real, resaltando nuevamente

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

que las zonas periféricas del tanque (particularmente el fondo y las paredes cerca de la base) son las más propensas a enfriarse excesivamente durante las paradas prolongadas.

En conjunto, esta evolución del estado del arte ha permitido comprender en profundidad el fenómeno de las pérdidas térmicas en tanques de sales fundentes y cómo mitigarlas. Desde las correlaciones empíricas iniciales, hasta los modelos integrales y simulaciones avanzadas, los trabajos citados evidencian consistentemente que el aislamiento térmico y el diseño de la base del tanque son factores clave para reducir la disipación de calor no deseada. Todos los estudios coinciden en que el fondo del tanque constituye una vía de pérdida particularmente importante (debido al contacto directo con el suelo a temperatura mucho menor), concentrando gran parte del flujo térmico que escapa del sistema. Así, las contribuciones de Herrmann, Gabbrielli, Pérez-Segarra, Suárez y colaboradores han ido construyendo un conocimiento integrado sobre las pérdidas de calor en estos almacenamientos, proporcionando métodos de cálculo, datos experimentales y recomendaciones de diseño que sirven de fundamento a los análisis presentados en este capítulo. Cada enfoque suma una pieza al panorama general, consolidando las mejores prácticas para minimizar las pérdidas térmicas en tanques de sales fundentes y garantizar la alta eficiencia de los sistemas de almacenamiento térmico en plantas termosolares.

3.2 TIPOS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS Y SU IMPACTO

En los sistemas de almacenamiento térmico con sales fundentes utilizados en plantas termosolares, se producen diversas pérdidas de calor hacia el entorno que afectan al rendimiento global de la instalación. Aunque las tecnologías de doble tanque con sales fundentes presentan eficiencias muy elevadas (en operación comercial se consideran suficientemente altas [RIVA20], con valores de eficiencia de ciclo de carga-descarga superiores al 97%), minimizar las pérdidas térmicas sigue siendo crucial para mejorar la eficiencia y la competitividad del sistema. Estas pérdidas de calor provocan el enfriamiento del fluido almacenado y reducen la energía útil recuperable, obligando a consumir parte de la energía captada en compensar dichas pérdidas. De hecho, los tanques de sales suponen

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

una fracción importante de las pérdidas totales de una planta termosolar: en un estudio de una planta cilindro-parabólica (CCP) se observó que durante el periodo nocturno los depósitos de sales fundentes representan alrededor del 67% de las pérdidas térmicas totales, frente al ~31% atribuido al campo solar y apenas ~1% a las tuberías [ZAVE13]. Esto evidencia que los tanques de almacenamiento son focos predominantes de disipación de calor cuando el sistema está en espera, por lo que su adecuado aislamiento térmico es fundamental para mantener la energía almacenada y la eficiencia global.

3.2.1 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA TÉRMICA

En los sistemas termosolares, así como en cualquier otro sistema, la disipación de calor ocurre por tres mecanismos:

- Conducción: El calor se transfiere a través de materiales sólidos desde zonas de alta temperatura a zonas más frías. Este mecanismo es especialmente relevante en la base del depósito, donde el contacto directo con la cimentación y el terreno provoca que la energía se disipe de manera constante hacia el subsuelo.
- Convección: Se produce mediante el movimiento de fluidos (como el aire en el entorno del tanque). En la superficie externa de los depósitos, la convección –ya sea natural o forzada por el viento– contribuye a remover parte del calor, acelerando la disipación térmica hacia el ambiente.
- Radiación: Los cuerpos a alta temperatura emiten energía en forma de radiación electromagnética. Las superficies del tanque, al estar a temperaturas elevadas, irradian calor hacia el entorno, incluso en ausencia de contacto directo.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES



Figura 16. Tipos de pérdidas térmicas

3.2.2 TIPOS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS EN EL TANQUE DE SALES FUNDENTES

Existen varios mecanismos de pérdidas térmicas en un tanque de almacenamiento de sales fundentes de alta temperatura, asociados tanto a las diferentes partes del tanque como a los modos de transferencia de calor. A continuación, se resumen los principales tipos de pérdidas de calor en estos sistemas:

- Pérdidas por conducción a través de la base hacia el suelo:

El fondo del tanque (base) está en contacto con la cimentación y el terreno, los cuales se encuentran a una temperatura ambiente muy inferior a la de las sales calientes. El calor se transmite por conducción desde las sales a través del fondo del depósito y las capas de la cimentación hasta el subsuelo. Sin un adecuado aislamiento, el terreno actúa como un sumidero prácticamente infinito a temperatura ambiente, extrayendo calor de forma continua. Este mecanismo de pérdida es especialmente relevante debido a la gran superficie de base de los tanques y al alto gradiente térmico típico (por ejemplo, sales a $\sim 380^\circ\text{C}$ en tanques de plantas CCP, o hasta $\sim 565^\circ\text{C}$ en plantas de torre frente a $\sim 20^\circ\text{C}$ en el terreno) [SUAR15]. Las pérdidas por la base tienden a ser sostenidas incluso en ausencia de viento, y si no se controlan pueden suponer una porción significativa de las pérdidas totales del tanque.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

- Pérdidas a través de las paredes laterales y la cubierta superior:

Los tanques suelen ser cilindros metálicos con un techo o cubierta. A través de las paredes y techo se dan pérdidas de calor combinadas por conducción, convección y radiación. El calor interno se conduce por la pared del tanque (y sus capas de aislamiento, si las hay) hasta la superficie externa. Desde allí se disipa al aire ambiente por convección natural (y forzada si hay viento) y por radiación térmica hacia el entorno (incluido el cielo). Debido a la elevada temperatura de operación, estas pérdidas superficiales ocurren incluso con aislamiento, ya que siempre existirá cierta conducción y las superficies externas alcanzan temperaturas por encima de la ambiente [ZHAN19]. La magnitud de estas pérdidas depende del aislamiento lateral, la temperatura de la pared, la velocidad del viento (que influye en la convección) y la emisividad de la superficie externa (que influye en la radiación). Normalmente, los tanques comerciales se aíslan externamente con mantos de lana mineral u otros aislantes para reducir estas transferencias de calor convectivas/radiativas. Aun así, no pueden eliminarse por completo, y provocan un enfriamiento gradual del fluido almacenado desde las superficies expuestas, pudiendo generar además distribuciones de temperatura no uniformes en el interior del tanque.

- Pérdidas menores en accesorios y tuberías conectadas:

Además de las anteriores, pueden existir pérdidas de calor por conducción a través de las estructuras de soporte del tanque, las conexiones de tuberías, válvulas, etc. Estas suelen ser cuantitativamente menores comparadas con las del cuerpo principal del tanque, pero conviene mencionarlas. Por ejemplo, soportes metálicos o anclajes pueden crear puentes térmicos locales que conducen calor fuera del tanque. En este contexto, un área crítica identificada en estudios es la zona de la unión entre la pared lateral y la base del tanque, donde elementos estructurales (como el anillo de acero de la cimentación) pueden facilitar una fuga de calor considerable si no está bien aislada. Simulaciones CFD han mostrado que el flujo de calor perdido es especialmente intenso en los bordes inferiores del tanque, en la intersección entre el fondo y la pared lateral [SCHU08], lo que subraya la necesidad de un buen diseño térmico en esa región.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Cada uno de estos tipos de pérdidas contribuye a la disminución de la temperatura de las sales almacenadas y, por ende, a una merma de la eficiencia térmica del sistema de almacenamiento. La pérdida de calor al ambiente desde el tanque conlleva que parte de la energía capturada durante el día no esté disponible para la generación eléctrica posterior, reduciendo la eficiencia de conversión global de la planta. En casos extremos, una tasa de pérdida elevada podría incluso provocar la solidificación parcial de las sales (si la temperatura cae por debajo del punto de fusión en zonas locales), comprometiendo la operatividad. Por tanto, es imprescindible controlar y minimizar estos mecanismos de disipación.

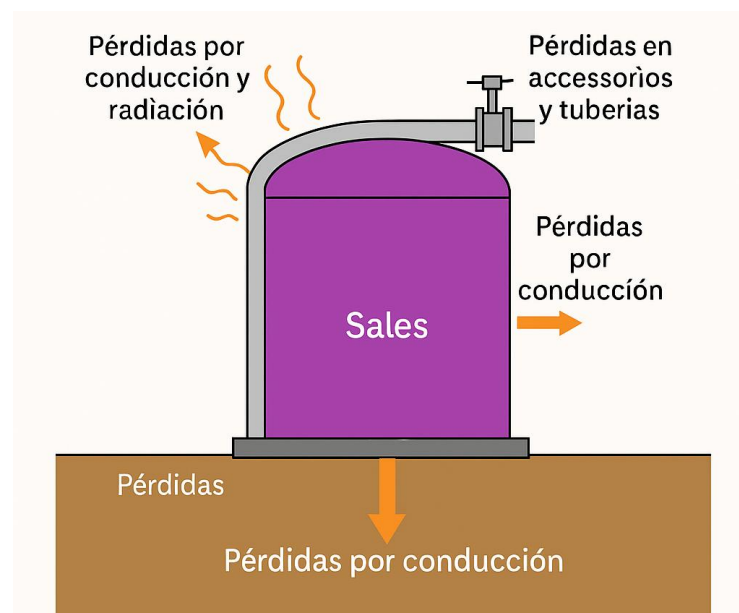


Figura 17. Tipos de pérdidas térmicas en el tanque de sales fundentes

3.2.3 IMPACTO EN LA EFICIENCIA Y COSTOS OPERATIVOS

Las pérdidas de calor desde los tanques de sales fundentes repercuten directamente en el rendimiento global de una planta termosolar y sus gastos operativos. La energía disipada no puede aprovecharse para generar electricidad, lo que obliga al sistema a compensarla invirtiendo energía adicional en recalentar el medio de almacenamiento. A continuación se detallan los efectos principales:

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

- Reducción de la eficiencia energética:

Cada unidad de calor perdida reduce la energía útil disponible para generación eléctrica. En la práctica, incluso en tanques bien aislados se registran pérdidas diarias de calor del orden del 1–5% de la energía almacenada. Estudios operativos indican que estas pérdidas diarias (en torno a 4–5% típicamente) disminuyen la eficiencia del ciclo de carga-descarga, pues parte de la energía captada durante el día debe destinarse a reponer el calor perdido en lugar de producir electricidad. Esto implica que la eficiencia del almacenamiento ronda el 95–99% en el mejor de los casos, quedando el resto disipado al ambiente [PRIE24]. Dicho de otro modo, cuanta más energía se escape como calor, menor será el rendimiento diario neto de la planta.

- Mayor consumo de energía y costos operativos:

Para mantener la temperatura de operación del sistema, el calor perdido debe compensarse mediante energía adicional (por ejemplo, usando parte de la radiación solar del día siguiente o sistemas de calefacción auxiliares). Este recalentamiento forzoso de las sales fundentes supone un consumo extra de energía que incrementa los costos operativos de la planta. En esencia, una fracción de la energía diaria captada se “desvía” a recuperar las pérdidas en vez de convertirse en electricidad vendible, elevando así el costo por unidad de energía útil entregada. Diversos proyectos CSP han evidenciado que fallos en el diseño térmico pueden conllevar impactos económicos significativos, al requerir más energía de la prevista para sostener las temperaturas de trabajo [PRIE24]. Minimizar estas pérdidas equivale a reducir consumos parasíticos y, por tanto, a menores gastos en operación (combustible, bombeo, etc.) a lo largo de la vida de la instalación.

- Degradación de aislantes y necesidad de mantenimiento:

Un flujo de calor constante atravesando los materiales aislantes puede acelerar su degradación con el tiempo, disminuyendo su efectividad. Si el aislamiento térmico se deteriora o presenta defectos de instalación, las pérdidas aumentarán aún más, creando un círculo vicioso de menor eficiencia y mayores requerimientos de energía. Estudios han

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

mostrado que defectos locales en el aislamiento o ensamblaje (por ejemplo, puntos sin suficiente aislante) pueden representar hasta un ~40% de las pérdidas totales en un tanque de almacenamiento, subiendo drásticamente la fracción de energía desperdiciada. Esto obliga a realizar tareas de mantenimiento preventivo y correctivo, como reemplazar o reparar el aislante térmico, aumentar espesores de aislamiento en la base, etc. Dichas intervenciones no solo implican costes adicionales de material y mano de obra, sino también posibles paradas de la planta. Por ejemplo, en la planta CSP Crescent Dunes se reportaron problemas en los tanques de sales (corrosión, fallos de aislamiento) que derivaron en desafíos de mantenimiento y sobrecostes operativos inesperados [PRIE24]. En conjunto, un aislamiento deficiente o envejecido afecta negativamente la economía del proyecto a largo plazo, al elevar los gastos de operación y mantenimiento necesarios para controlar las pérdidas térmicas.

En resumen, minimizar las pérdidas térmicas es crítico para la viabilidad económica y la competitividad de la tecnología termosolar. Un buen diseño e instalación de aislamiento (especialmente en la base del tanque) permiten conservar la mayor parte del calor almacenado, maximizando la producción eléctrica aprovechable y reduciendo costes operativos asociados. Por el contrario, descuidar este aspecto se traduce en una menor eficiencia del sistema y mayores gastos durante la vida útil de la planta, comprometiendo su rendimiento y rentabilidad.

3.2.4 MÉTODOS ACTUALES DE MITIGACIÓN DE LAS PÉRDIDAS TÉRMICAS

Para contrarrestar las pérdidas térmicas se han implementado diversas estrategias de mitigación, entre las que destacan:

- **Diseño Multicapa y Barreras Térmicas:**

La incorporación de materiales aislantes de baja conductividad en la cimentación permite reducir la transferencia de calor al terreno. Como se ha mencionado en apartados previos, la estrategia se basa en el diseño multicapa, donde cada estrato (por ejemplo, una capa de arena

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

compactada, seguida de una capa de material granular aislante y una capa de grava) contribuye a aumentar la resistencia térmica global del sistema.

Un sistema de aislamiento efectivo combina varios materiales con diferentes propiedades térmicas [RIVA20].

- Revestimientos Refractarios y Protecciones Activas:

En el interior de los tanques se emplean revestimientos refractarios que, además de proteger la estructura del depósito, actúan como barrera térmica. En algunos proyectos de I+D se han evaluado sistemas activos, como la recirculación controlada del fluido o enfriamientos localizados, para mantener de forma óptima la temperatura interna y reducir las pérdidas en momentos críticos.

- Optimización Geométrica y de Diseño:

El diseño del depósito se puede optimizar para reducir el área de contacto de la base o modificar la distribución del calor. La integración de barreras térmicas en zonas críticas (por ejemplo, en los bordes o en puntos de unión entre la base y las paredes laterales) ayuda a evitar concentraciones de flujo térmico que favorecen la disipación excesiva.

La aplicación de estos métodos no solo mejora la retención de energía, sino que también repercute positivamente en los costos operativos, ya que se reduce el consumo de energía destinado al re-calentamiento y se disminuyen los requerimientos de mantenimiento a lo largo del tiempo.

3.3 PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE

En los sistemas de almacenamiento térmico con sales fundentes, la base del tanque desempeña un papel crucial en la eficiencia global del sistema. A pesar de que las pérdidas térmicas pueden ocurrir por todas las superficies del tanque, el contacto directo de la base con el terreno la convierte en un punto especialmente sensible. Esta sección aborda tanto la

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

relevancia energética como los factores estructurales asociados a las pérdidas térmicas por la base, así como los principales elementos que influyen en su magnitud y control.

3.3.1 IMPORTANCIA DE LA BASE PARA LA EFICIENCIA TÉRMICA

Entre todos los mecanismos anteriores, las pérdidas por la base del tanque merecen una atención especial. La base constituye una superficie de gran área en contacto con un medio (suelo) de infinita masa térmica a baja temperatura relativa, lo que genera un potencial de pérdida significativo. Si el fondo de un tanque de sales fundentes careciera de aislamiento efectivo, el flujo de calor conducido hacia el terreno sería muy elevado y continuo, enfriando rápidamente el medio de almacenamiento. Incluso con las paredes laterales bien aisladas, un fondo mal aislado actuaría como “fuga” constante de energía térmica. Esto no solo reduce la cantidad de energía útil almacenada, sino que puede penalizar gravemente la eficiencia de ciclo: más energía solar deberá invertirse en recalentar las sales cada día en lugar de destinarse a generación eléctrica. Un buen diseño térmico del fondo del depósito puede marcar la diferencia entre una pérdida despreciable y una pérdida significativa de energía. Como referencia, los sistemas comerciales buscan limitar las pérdidas totales del tanque a solo unos pocos por ciento de la energía almacenada por día. Por ejemplo, mediante un aislamiento cuidadoso, es posible restringir las pérdidas del tanque a del orden de 4–5% diario de la energía almacenada [GIL17], logrando eficiencias de retención cercanas al 95–97%. Estas altas eficiencias (ejemplos reportados de ~97% en ciclos diarios) se logran principalmente añadiendo aislamiento térmico suficiente en todas las superficies, incluida la base. En ausencia de dicho aislamiento, las pérdidas por la base podrían por sí solas exceder esos valores.

Además del aspecto puramente energético, las pérdidas a través de la base tienen implicaciones estructurales y de seguridad. Si mucho calor penetra en el terreno, las capas del suelo bajo el tanque aumentan su temperatura. Esto puede inducir cambios en las propiedades mecánicas del suelo (dilataciones, reducciones de resistencia, cambios de humedad) que afecten la estabilidad de la cimentación. Por ejemplo, al instalar aislamiento en la base se mantiene el suelo subyacente a una temperatura mucho menor que la del interior

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

del tanque, reduciendo la variación de propiedades geotécnicas con la temperatura y aumentando la seguridad estructural de la instalación. En resumen, minimizar la transferencia de calor hacia el terreno no solo mejora la conservación de la energía, sino que protege la integridad de la infraestructura.

3.3.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PÉRDIDAS TÉRMICAS POR LA BASE

Las pérdidas de calor a través de la base dependen de varios factores físicos y de diseño, entre los que destacan:

- Diferencial de temperatura entre las sales y el terreno:

Es el motor principal de la conducción de calor. A mayor temperatura de las sales y menor temperatura del suelo, mayor será el gradiente térmico y el flujo de calor. En la práctica, la temperatura de operación del tanque (p. ej. $\sim 380^\circ\text{C}$ en plantas CCP, $\sim 565^\circ\text{C}$ en plantas de torre [ZHAN19]) frente a los $\sim 15\text{--}25^\circ\text{C}$ típicos del subsuelo genera gradientes del orden de cientos de grados, impulsando una pérdida significativa si no hay barreras térmicas.

- Área de la base y geometría del tanque:

La cantidad total de calor perdido por conducción es proporcional al área de contacto. Tanques de gran diámetro presentan bases muy extensas (varios miles de m^2), aumentando el potencial de pérdidas absolutas. Asimismo, la forma geométrica influye en cómo se distribuye el flujo de calor en el terreno; en tanques circulares grandes, el calor se difunde radialmente en el subsuelo. Los bordes del tanque (unión fondo-pared) suelen ser críticos porque concentran flujos de calor más intensos [ZHAN19].

- Propiedades térmicas del suelo y la cimentación:

La conductividad térmica del terreno subyacente y de los materiales de la cimentación determina qué tan fácilmente fluye el calor. Suelos secos y materiales porosos tienen menor conductividad (aislan mejor) que suelos saturados o rocas compactas. Por ejemplo, una grava compactada o suelo arenoso puede tener $k \approx 0,5\text{--}1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, mientras que materiales

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

aislantes especiales pueden tener $k < 0,2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Si el terreno es muy conductivo, rápidamente llevará el calor a capas profundas más frías, manteniendo un flujo sostenido. La presencia de agua subterránea también puede incrementar la disipación por convección dentro del suelo húmedo.

- Diseño y espesor de las capas aislantes en la base:

Este es el factor de control principal desde el punto de vista de ingeniería. La inclusión de materiales aislantes de baja conductividad en la cimentación reduce dramáticamente la pérdida de calor. El espesor de aislamiento efectivo y su conductividad k determinan la resistencia térmica de la base. Un aislamiento más grueso o con k más bajo implica menores flujos de calor. Tal y como se ha discutido en cuanto al diseño de un tanque, en la práctica se usan materiales como cementos o ladrillos refractarios (moderadamente aislantes y resistentes a altas T) y rellenos altamente aislantes bajo el tanque. Un correcto diseño equilibrará el coste y la viabilidad estructural de aumentar espesor de aislamiento contra la reducción obtenida de pérdidas.

- Estratificación térmica del fluido almacenado:

Durante los periodos de espera sin circulación, puede generarse estratificación de la temperatura dentro del tanque, formándose una capa inferior de sal ligeramente más fría que el resto del volumen. Este fenómeno, observado experimentalmente [ZHAN19], introduce una resistencia térmica adicional en el fondo del tanque, ya que la capa fría en contacto con la base reduce el ΔT efectivo entre las sales y la cimentación en ese punto. En otras palabras, la presencia de una termoclina interna cerca del fondo actúa como aislante pasivo que disminuye la tasa de pérdida por la base. No obstante, esta estratificación debe controlarse, pues también implica una distribución no uniforme de temperaturas en el tanque.

- Elementos estructurales que puedan actuar como puentes térmicos:

Cualquier componente con alta conductividad que atraviese o rodee la capa aislante de la base puede aumentar las pérdidas locales, como sucede con el anillo perimetral de acero que

*ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE
SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES*

conforma la base de muchos tanques. El acero tiene alta conductividad ($\sim 45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ para aceros al carbono a temperatura ambiente, mayor a temperaturas intermedias), por lo que si no está adecuadamente aislado, puede canalizar calor desde el fondo del tanque hacia el exterior. Los diseños suelen empotrar este anillo en concreto y aislarlo para mitigar el efecto, pero sigue siendo un punto a tener en cuenta [ZHAN19]. Del mismo modo, pernos, soportes o la propia placa base de acero del tanque requieren consideraciones de aislamiento para evitar caminos de alta conductividad hacia el suelo.

Capítulo 4. MODELADO BÁSICO DE LAS PÉRDIDAS

POR LA BASE

4.1 LEY DE FOURIER

En este apartado se estudiará un modelo básico para analizar las pérdidas térmicas de un depósito empleando la Ley de Fourier como herramienta principal para describir la conducción de calor.

4.1.1 ECUACIONES BÁSICAS DE CONDUCCIÓN

La transferencia de calor por conducción se rige por la ley de Fourier, que establece que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura. La expresión fundamental es:

$$\vec{q} = -k\nabla T$$

Donde:

- $\vec{q}$ es el vector flujo de calor
- k es la conductividad térmica del material
- ∇T es el gradiente de temperatura

Bajo estas condiciones estacionarias y en un análisis unidimensional, esta relación se simplifica a:

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

e integrando a lo largo de una capa de espesor L y área A , se obtiene la pérdida de calor:

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

$$q = \frac{kA(T_{int} - T_{ext})}{L}$$

En situaciones donde la conducción ocurre a través de varias capas en serie, se define la resistencia térmica de cada capa como:

$$R_i = \frac{L_i}{k_i A}$$

Siendo la resistencia total de las capas superpuestas tal que:

$$R_{total} = \sum_i R_i$$

Por lo que, sustituyendo, la pérdida total de calor se expresa como:

$$Q_{total} = \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{total}}$$

4.1.2 HIPÓTESIS Y SIMPLIFICACIONES CONSIDERADAS

Para facilitar el análisis, se han adoptado algunas suposiciones y aproximaciones que permiten simplificar la formulación del problema sin sacrificar la relevancia del estudio.

Se simplifica el modelo al centrarse en la conducción, omitiendo la incorporación de mecanismos de transferencia por convección y radiación en la superficie exterior. Aunque en un sistema real la transferencia de calor puede involucrar convección en la superficie expuesta y radiación, el foco del estudio es evaluar el impacto de las pérdidas por conducción a través de la base, lo que permitirá obtener una visión preliminar y comparativa del comportamiento térmico del sistema.

Y se asume que las propiedades de los materiales y las condiciones geométricas se mantienen constantes en cada capa, lo cual es una aproximación razonable para el análisis inicial y que facilita la interpretación de los resultados.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Con estas bases, se pretende obtener un modelo teórico que, a través de la Ley de Fourier, permita determinar las pérdidas de calor y evaluar distintas estrategias de aislamiento y mejoras en el diseño de la base de los depósitos de sales fundentes.

4.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/(m*K))	Calor específico (J/(Kg*K))
Arlita leca solar de weber [16]	290	- 39°C: 0,125 - 198°C: 0,165 - 398°C: 0,225	- 39°C: 1.161 - 198°C: 1.433 - 398°C: 1.646
Suelo – caliza dureza media [15]	1885	1.4	1000
Sal Molten (~60% NaNO₃ y ~40% KNO₃)	- 300°C: 1850 - 565°C: 1710 [BONK21]	-565°C: 0,5877 [ZHAO16]	-565°C: 1550 [MUÑO17]
Zahorra compactada [KONR05]	2150	0,8	1000

Tabla 2. Propiedades de los materiales empleadas en los análisis de Excel y Fluent CFD

4.3 CÁLCULOS Y APROXIMACIÓN EN EXCEL

4.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Con el objetivo de estimar de forma más realista las pérdidas térmicas por conducción a través de la base del depósito, se ha desarrollado un modelo numérico bidimensional en régimen estacionario, implementado en Microsoft Excel mediante el método de diferencias

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

finitas. Esta aproximación permite analizar la distribución de temperaturas en el terreno subyacente y cuantificar el flujo de calor disipado a través de las distintas capas de materiales, considerando geometría y condiciones de contorno más representativas del sistema real que en el modelo unidimensional.

El dominio físico del problema se ha discretizado en una malla de celdas cuadradas, donde cada celda representa un área de 1 metro cuadrado. De este modo, la dimensión física del modelo se ajusta fácilmente al número de celdas dispuestas horizontal y verticalmente en la hoja de cálculo. Esta malla bidimensional permite representar tanto la base del tanque como las distintas capas de aislamiento y el terreno subyacente.

El análisis se basa en la resolución de la ecuación de conducción de calor en dos dimensiones, en estado estacionario y sin generación interna, que se expresa como:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

Para resolverla numéricamente, se ha aplicado el esquema de cinco puntos del método de diferencias finitas, donde el valor de temperatura en cada celda interior se calcula, en condiciones homogéneas, como la media aritmética de los valores de sus cuatro celdas adyacentes (superior, inferior, izquierda y derecha):

$$T_{i,j} = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1}}{4}$$

No obstante, como en el modelo se representan distintos materiales, cada uno con su propia conductividad térmica, y algunas celdas adyacentes corresponden a fronteras adiabáticas, la fórmula general debe adaptarse en cada caso. En los bordes adiabáticos, la derivada normal del campo térmico es nula, lo que equivale a un flujo de calor cero. En la práctica, esto se traduce en que no se considera el aporte de la celda adyacente en esa dirección, y el promedio se realiza únicamente con las restantes.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Asimismo, cuando se modelan transiciones entre materiales con distintas conductividades térmicas, el cálculo del flujo de calor entre celdas requiere aplicar una media armónica o una formulación ajustada que tenga en cuenta la resistencia térmica equivalente entre ambos nodos. De esta forma, la distribución de temperatura se ajusta adecuadamente a los cambios de propiedades del medio.

El proceso iterativo se ha implementado en Excel, repitiendo los cálculos hasta que la variación de temperatura entre iteraciones sucesivas en cada punto del dominio sea inferior a un umbral previamente definido, lo que garantiza la convergencia hacia el régimen estacionario.

En cuanto a las condiciones de contorno, se han impuesto temperaturas constantes en las celdas que simulan el contacto con la base del depósito, mientras que en los extremos laterales e inferior del dominio se han aplicado condiciones adiabáticas, representando una frontera sin flujo térmico. Estas condiciones reflejan una situación simétrica y simplificada, pero suficiente para captar los efectos locales más relevantes del aislamiento térmico sobre la disipación de calor hacia el terreno.

Una vez obtenida la distribución de temperaturas en régimen permanente, se ha calculado el flujo de calor mediante la ley de Fourier aplicada entre celdas, considerando el gradiente térmico local y la conductividad térmica del material en cada dirección. Finalmente, se ha integrado la densidad de flujo térmico sobre la superficie de interés, lo que ha permitido estimar las pérdidas totales de calor a través de la base del sistema.

4.3.2 CASOS ANALIZADOS

A partir del modelo numérico descrito previamente, se han simulado dos configuraciones distintas para analizar el impacto del espesor de la capa de arlita en las pérdidas térmicas por la base del depósito. La geometría, materiales y condiciones de contorno se han analizado celda a celda para asegurar una representación fidedigna.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Ambos modelos han sido implementados en una malla bidimensional de 52×52 celdas, donde cada celda representa una superficie de 1 metro cuadrado. De este modo, se simula una sección transversal de 52 metros de ancho por 52 metros de profundidad, lo que permite evaluar tanto la disipación térmica directa bajo el depósito como la propagación lateral del calor hacia el terreno circundante.

La zona correspondiente a la mitad del depósito de sales fundentes ha sido definida con un ancho de 38 metros, centrada en la malla, y con una profundidad total de 6 metros, representada desde la fila 7 hasta la fila 12. Bajo ella, se ha dispuesto una capa de zahorra compactada de 1 metro de espesor (fila 13), seguida por la capa de arlita expandida, que varía según el caso analizado. El resto del dominio hasta el fondo (fila 52) corresponde al suelo natural.

Caso 1E: Arlita de 2 metros de espesor.

En el primer modelo, la capa de arlita tiene un espesor de 2 metros, ocupando las filas 14 a 15 del dominio (es decir, filas 14 y 15). A continuación, el terreno natural se extiende desde la fila 16 hasta el final de la malla. Este caso representa una configuración con aislamiento térmico limitado, común en diseños que priorizan costes de obra.



Figura 18. Análisis bidimensional del caso 1E (espesor de 2m de arlita)

Caso 2E: Arlita de 3 metros de espesor.

En el segundo modelo, se ha incrementado el espesor de arlita a 3 metros, representado en las filas 14 a 16. En este caso, el suelo comienza en la fila 17. Este diseño permite analizar

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

el efecto de una mejora en la resistencia térmica del sistema, reduciendo la transferencia de calor hacia el subsuelo.

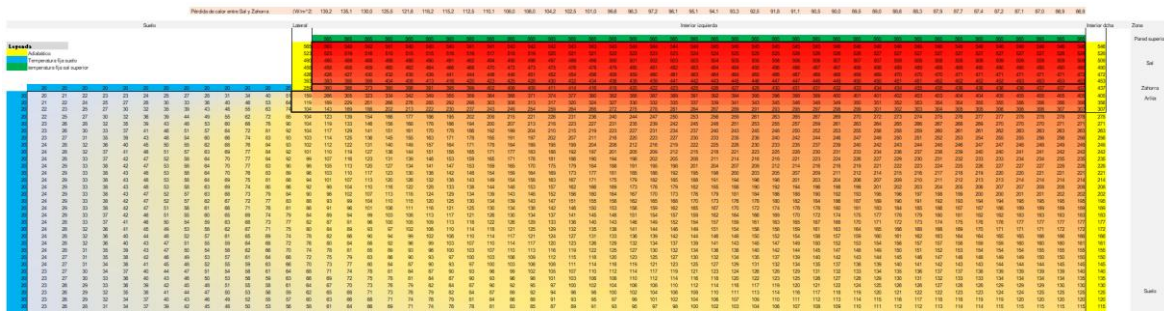


Figura 19. Análisis bidimensional del caso 2E (3m de espesor de arlita)

En ambos casos, se han mantenido constantes las condiciones de contorno: la parte superior del depósito (superficie superior de la sal) se encuentra a 565 °C, los alrededores del suelo se han fijado a 20°C, mientras que los extremos laterales del tanque y el eje de simetría se han considerado adiabáticos, es decir, sin intercambio de calor. Estas condiciones simulan una situación de simetría horizontal e infinita profundidad relativa, centrando el análisis en el flujo térmico vertical.

La simulación se ha ejecutado iterativamente hasta alcanzar la convergencia, obteniéndose la distribución de temperaturas en todo el dominio.

4.3.3 CÁLCULOS

Para calcular las pérdidas totales de calor a través de la base, se ha calculado el gradiente de temperatura en cada punto del depósito, e integrándolo a través del círculo que forma la base del depósito cilíndrico.

De esta forma:

$$Q = \iint_A q(x, y) dA = - \iint_A k(x, y) \frac{\partial T}{\partial z} dA$$

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Que, para simplificar el cálculo en excel, se ha calculado la media de las pérdidas en cada punto del depósito, para después multiplicarlo por el pi y por el radio al cuadrado.

$$Q = \frac{\sum_i Q_i}{R} * \pi * R^2$$

4.4 MODELADO EN FLUENT

Este capítulo emplea ANSYS CFD Fluent para cuantificar las pérdidas que suceden por la base, y estudiar cómo varían al cambiar el espesor de la capa de arlita aislante entre el depósito y el suelo. Se modela una sección 2D axisimétrica del tanque y su cimentación, aplicando hipótesis de simplificación en la transferencia térmica, y aprovechando las herramientas de SpaceClaim, Meshing, Fluent y Fluent Post integradas en Workbench. Los resultados permitirán aproximar el espesor óptimo de arlita para minimizar el flujo de calor al terreno.

4.4.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

ANSYS CFD Fluent es el solver de dinámica de fluidos computacional (CFD) integrado en el entorno ANSYS Workbench. El código resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes acopladas a la conservación de masa, energía y, cuando se requiere, especies químicas o radiación. Dispone de:

- Modelos de flujo laminar y turbulento (RANS, LES, DES).
- Transferencia de calor conjugada sólido–fluido, conducción pura en dominios macizos y radiación.
- Capacidades transitorias totalmente implícitas para escalas de tiempo largas, algo crítico cuando se simulan procesos de operación de plantas termosolares.
- Interfaces para *User-Defined Functions* (UDFs) que permiten programar propiedades térmicas dependientes de la temperatura o estrategias de control.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

- Post-procesado integrado (Fluent Post) y exportación a otras herramientas de ANSYS para análisis estructural, optimización o fatiga.

Las herramientas que complementan Fluent dentro de Workbench, y con las que se establece y se soluciona el modelo, son las siguientes:

- *Spaceclaim*. Empleado para la generación y simplificación de la geometría CAD. Se eliminan detalles no relevantes fluidodinámicamente (pequeños nervios, soldaduras, etc.) para reducir el recuento de celdas y facilitar la mallado.
- *Meshing*: Ayuda con la creación de la malla mixta, estructurada o no. Se controlan gradientes en zonas con altos flujos de calor mediante funciones de refinamiento local y criterios de independencia de malla.
- *Fluent set up & Solution*: Se utiliza en la siguiente fase de definición de materiales (sales fundentes, acero, aislante, suelo), propiedades térmicas dependientes de la temperatura y condiciones de contorno. Se selecciona un esquema transitorio implícito con acoplamiento de presión-velocidad y un criterio de convergencia estricto para la energía.
- *Fluent Post*: Extracción de perfiles de temperatura, cálculo de flujos de calor y generación de mapas de gradientes para el informe técnico.

Las ventajas que aporta al proyecto incluyen la consistencia de los datos, dado que todo el ciclo desde CAD hasta el postprocesado reside en una única plataforma, reduciendo así errores de importación y exportación. Además, la solución ofrece escalabilidad mediante Fluent, que permite paralelización sobre CPU o GPU, acelerando notablemente las simulaciones transitorias extensas, típicas del almacenamiento térmico. También proporciona flexibilidad, ya que se pueden implementar funciones definidas por el usuario (UDFs) para leyes de propiedades no lineales y algoritmos de control específicos de la planta. Finalmente, la plataforma asegura trazabilidad al almacenar cada etapa del proceso en un *Project Schematic* de Workbench, facilitando así auditorías y futuras ampliaciones del estudio.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

4.4.2 HIPÓTESIS Y SIMPLIFICACIONES

- Eje de simetría ($r = 0$ m), que permite reducir a la mitad el número de celdas sin perder fidelidad.
- Transferencia de calor por conducción en sólidos.
- Se asume contacto térmico ideal entre capas, y para las juntas se asumen resistencias despreciables respecto al espesor de los materiales.
- Condiciones de contorno:
 - Caras superiores y laterales de la chapa metálica consideradas aislantes perfectos para centrar el estudio en la transferencia por la base.
 - Perímetro y base del terreno fijados a la temperatura del suelo para representar “infinitud térmica”.

4.4.3 DISEÑO DEL MODELO

Tras definir los objetivos del análisis, en este apartado se detallan las decisiones clave de modelado y las simplificaciones adoptadas para representar de forma fiel y computacionalmente eficiente la transferencia térmica en la base del depósito. A continuación, se expone la generación de la geometría axisimétrica, la definición de los distintos materiales, y las hipótesis de contorno que permiten centrar el estudio en las pérdidas por la base del tanque.

4.4.3.1 Representación geométrica

El análisis térmico parte de una sección 2-D axisimétrica que reproduce la mitad meridional del tanque de sales fundentes y el terreno inmediato.

La geometría se generó en ANSYS SpaceClaim y se transfirió, sin conversiones intermedias, a los módulos de mallado y de resolución de Fluent dentro de ANSYS Workbench.

El tanque tiene un radio de 38,5m y una profundidad de 6m, dentro del que se encuentran las sales Molten, la capa de zahorra (de 0,3m de profundidad) y parte de la arlita. Debajo, se

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

encuentra el suelo, donde la parte mas cercana al deposito se encuentra rellena de arlita, siendo el resto simplemente suelo.

Por ello, el modelo cuenta con cuatro materiales, modelados con las propiedades previamente descritas en el apartado 4.2 Destacan:

1. Sales fundentes: de unos 5 metros de profundidad, dependiendo del modelo, y modeladas como sólido para facilitar el análisis.
2. Capa de zahorra: de 0,3m de espesor, para una representación fidedigna de la realidad.
3. Arlita: la mayor barrera térmica, se han hecho dos casos para analizar su impacto
 1. Caso 1F: Profundidad de la arlita de 1,7m
 2. Caso 2F: Profundidad de la arlita de 2m.
4. Dominio de suelo de caliza de dureza media suficientemente extenso (30 metros de profundidad, 50 metros de radio) para asegurar la correcta visualización de los gradientes térmicos.

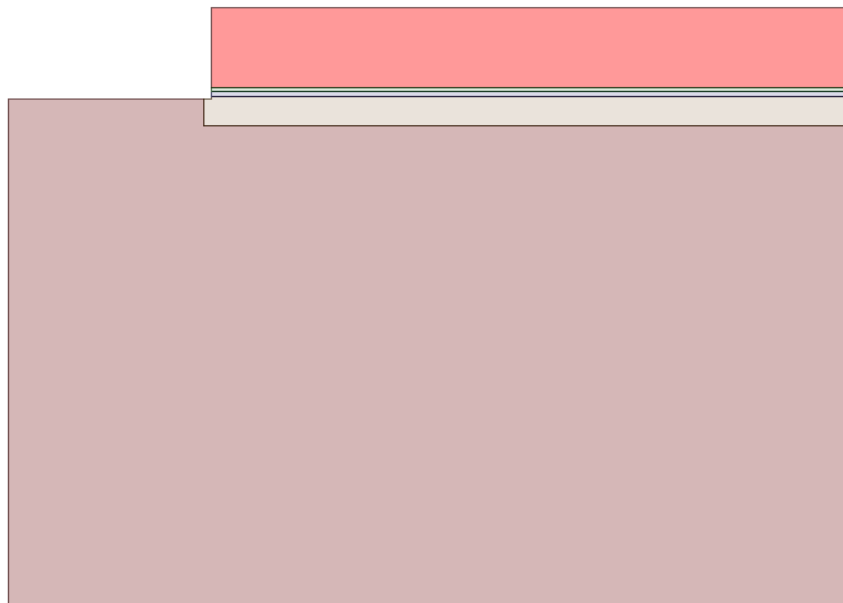


Figura 20. Representación del modelo CFD en SpaceClaim

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

4.4.3.2 Mallado

Se diseña una malla de 0,5m de tamaño para asegurar una resolución detallada.

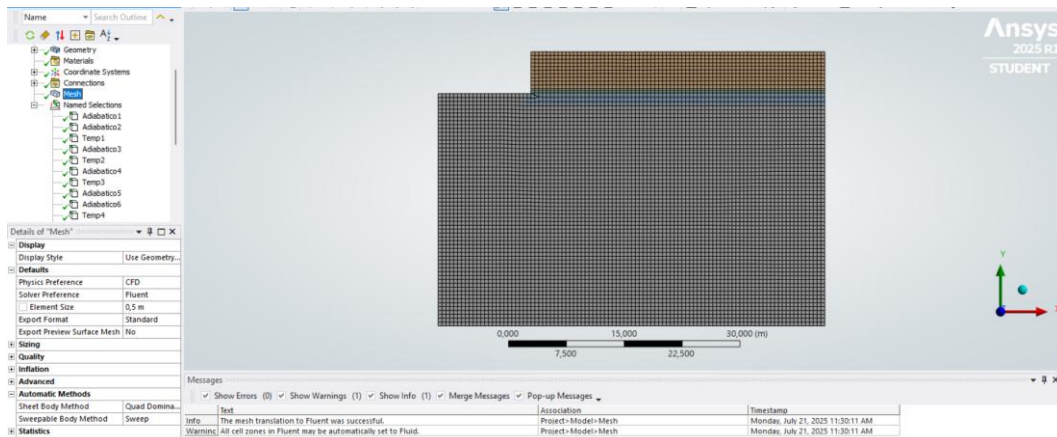


Figura 21. Mallado del modelo CFD

Y se diseñan los siguientes materiales, destacando que dependiendo del caso, los materiales se modifican de la manera siguiente para que los distintos casos sean sencillos de modificar:

- Caso 1F: Arlita con espesor de 1,7m
 - o El cuerpo Sal/Zahorra será Sal
 - o El cuerpo Zahorra/Arlita será Zahorra
- Caso 2F: Arlita con espesor de 2m
 - o EL cuerpo Sal/Zahorra será Zahorra
 - o El cuerpo Zahorra/Arlita será Arlita

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

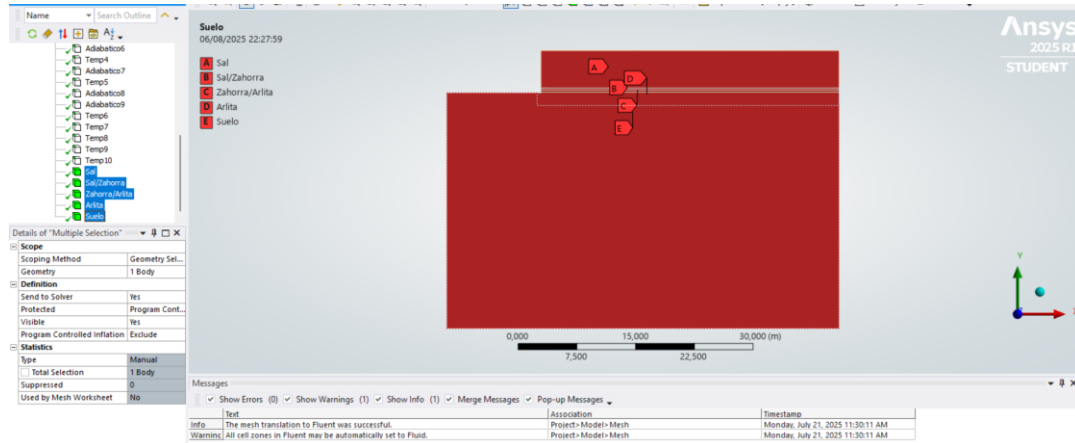


Figura 22. Esquematzación de los cuerpos del modelo CFD

4.4.3.3 Condiciones de contorno

- Caras laterales de la chapa metálica consideradas aislantes perfectos para centrar el estudio en la transferencia por la base.
- Paredes del eje de simetría consideradas adiabáticas, ya que la diferencia de temperaturas es nula en el eje axial.
- Cara superior de las sales Molten fijada a 565°C, para representar el perfil de temperaturas de un tanque caliente a plena carga.
- Perímetro y base del terreno fijados a la temperatura del suelo (20°C) para representar “infinitud térmica”.
- Paredes interiores modeladas sin resistencia térmica para centrar el análisis en las pérdidas térmicas.

Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS E IMPACTO

ECONÓMICO

5.1 APROXIMACIÓN EN EXCEL

En esta sección se analizan los resultados obtenidos mediante una aproximación simplificada en Microsoft Excel, empleando un modelo bidimensional estático que considera capas de materiales y sus respectivas conductividades térmicas. Aunque se trata de un método preliminar y menos preciso que la simulación CFD, esta aproximación permite identificar tendencias generales y obtener una estimación razonable de las pérdidas térmicas a través de la base del depósito.

5.1.1 RESULTADOS

5.1.1.1 Caso 1E: Arlita de 2 metros de espesor

En este primer escenario, se utilizó un espesor de arlita de 2 metros. Se obtuvieron las siguientes temperaturas medias en cada una de las capas que conforman la base del depósito:

Material	Conductividad (W/mK)	T media (°C)
Sal	0,588	482,821
Zahorra	0,800	402,289
Arlita	0,220	325,226
Suelo	1,400	100,808
Sal-Zahorra	0,678	
Zahorra-Arlita	0,345	
Arlita-Suelo	0,380	

Tabla 3. Conductividades y temperaturas medias de los materiales – Caso 1E

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

A partir de estos datos, se calcularon las pérdidas térmicas a través de la base, tanto en kilovatios (kW) como en megavatios-hora por año (MWh/año):

Cálculo	Unidades	Total
Potencia perdida media	kW	513,94
Media	W/m ²	110,37
Pi	-	3,14
Radio	m	38,50
Pérdidas al año	MWhr	3314,94
Horas al año	hr	6450

Tabla 4. Pérdidas de calor a través de la base – Caso 1E

5.1.1.2 Caso 2E: Arlita de 3 metros de espesor

En este segundo escenario se incrementó el espesor de arlita a 3 metros, manteniendo el resto de condiciones constantes. Nuevamente, se calcularon las temperaturas medias por capa y las pérdidas térmicas correspondientes:

Material	Conductividad (W/mK)	T media (°C)
Sal	0,588	490,235
Zahorra	0,800	416,938
Arlita	0,220	318,957
Suelo	1,400	92,667
Sal-Zahorra	0,678	
Zahorra-Arlita	0,345	
Arlita-Suelo	0,380	

Tabla 5. Conductividades y temperaturas medias de los materiales – Caso 2E

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Cálculo	Unidades	Total
Potencia perdida media	kW	467,23
Media	W/m ²	100,34
Pi	-	3,14
Radio	m	38,50
Pérdidas al año	MWhr	3013,66
Horas al año	hr	6450

Tabla 6. Pérdidas de calor a través de la base – Caso 2E

5.1.1.3 Resumen

Los resultados de ambos casos se resumen en la siguiente tabla, que muestra la reducción de pérdidas térmicas al incrementar el espesor del aislamiento:

Elemento	Unidades	Caso 1E	Caso 2E
Espesor	m	2	3
Pérdidas anuales a través del suelo	MWhr	3314,94	3013,66
Horas de operación anuales	hr	6450	6450
Potencia térmica perdida a través del suelo	kW	513,94	467,23
Pérdida de calor	W/m ²	110,37	100,34
Radio	m	38,50	38,50
pi	-	3,14	3,14

Tabla 7. Comparativa de pérdidas para los casos 1E y 2E

5.1.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS E IMPACTO ECONÓMICO

Aunque esta modelización en Excel constituye solo una aproximación preliminar, ofrece información relevante para evaluar el comportamiento térmico del sistema y su impacto económico. La conclusión más destacada es que el incremento de un metro en el espesor de la arlita reduce significativamente las pérdidas térmicas.

En concreto, se observa:

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

- Un aumento medio de 8 °C en la temperatura de las sales fundentes (molten salts) en el caso 2E.
- Una reducción total de ~47 kW en las pérdidas de calor a través de la base.

Si asumimos que la planta opera a plena carga durante 6.450 horas al año (valor tomado de la planta Gemasolar [17]), esta diferencia representa un ahorro energético de aproximadamente:

$$47 \text{ kW} \times 6.450 \frac{h}{\text{año}} = 303 \frac{\text{MWhr}}{\text{año}}$$

Utilizando una eficiencia del 97 % para la conversión térmica en un ciclo Rankine de vapor [ELAM25], la energía neta recuperada ascendería a:

$$301 \frac{\text{MWhr}}{\text{año}} \times 97\% = 292 \frac{\text{MWhr}}{\text{año}}$$

Este ahorro en pérdidas térmicas se traduce en una mayor generación eléctrica efectiva, lo que puede monetizarse en función del precio medio de la electricidad. Sin embargo, el coste adicional de materiales implica una inversión significativa que debe ser recuperada a lo largo del tiempo. . El estudio se realizó utilizando los precios actualizados del 6 de agosto de 2025 [18].

Precio arlita leca solar weber	€/L	0,1112
MW venta	€/MWhr	130,6
Eficiencia	%	0,97

Tabla 8. Tabla de precios de arlita y de la energía

Incremento de espesor	m	1
Incremento de presupuesto	€	517801,51
Incremento de energía	MWhr/año	292,24
Incremento de ganancias	€/año	38166,03
Payback	años	13,57

Tabla 9. Análisis “Payback” del incremento de arlita en el caso 2E

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

El análisis estima un periodo de retorno de la inversión (payback) de 14 años, lo cual representa un horizonte relativamente largo. Teniendo en cuenta que la vida útil esperada de la planta es de 30 años, esta inversión dejaría un margen reducido de rentabilidad durante los últimos años del proyecto.

Además, si se considera el efecto del valor temporal del dinero, el beneficio neto real sería aún menor. Por tanto, no se recomienda el aumento del espesor de la arlita en este caso, dado que la inversión no se compensa suficientemente con la mejora energética obtenida, al menos bajo las condiciones actuales de precio de energía y coste de materiales.

5.2 SIMULACIONES CFD

A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas en Ansys Fluent.

5.2.1 RESULTADOS

5.2.1.1 Caso 1F: Espesor de Arlita de 1,7m

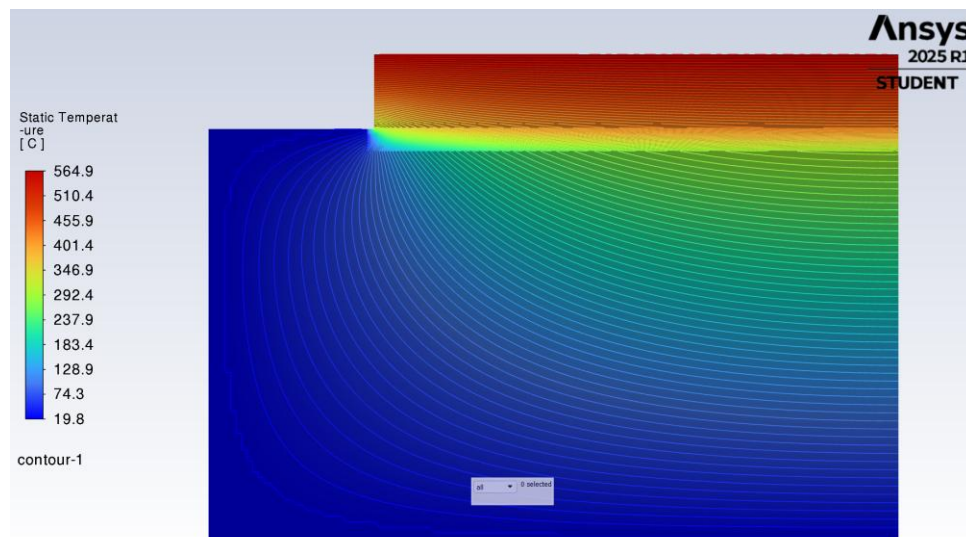


Figura 23. Distribución de temperaturas en el depósito y suelo – Caso 1F

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

La distribución de temperaturas obtenida en Fluent se asemeja significativamente a la predicha por el modelo de Excel, si bien la simulación CFD ofrece una representación más precisa del comportamiento térmico real

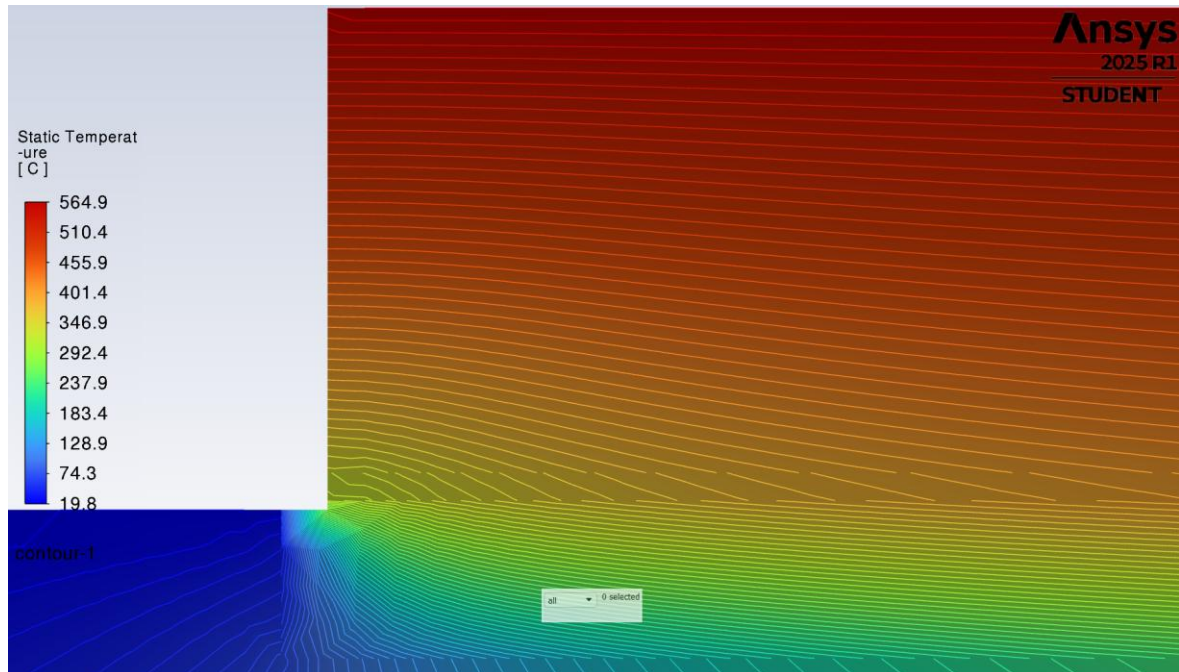


Figura 24. Primer plano de la distribución de temperaturas en el exterior del depósito – Caso 1F

En esta figura se aprecia con claridad el papel de la arlita como barrera térmica. Su baja conductividad limita eficazmente la transmisión de calor hacia el exterior.

A continuación, se puede ver el calor traspasado por cada pared en las figuras 25 y 26.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

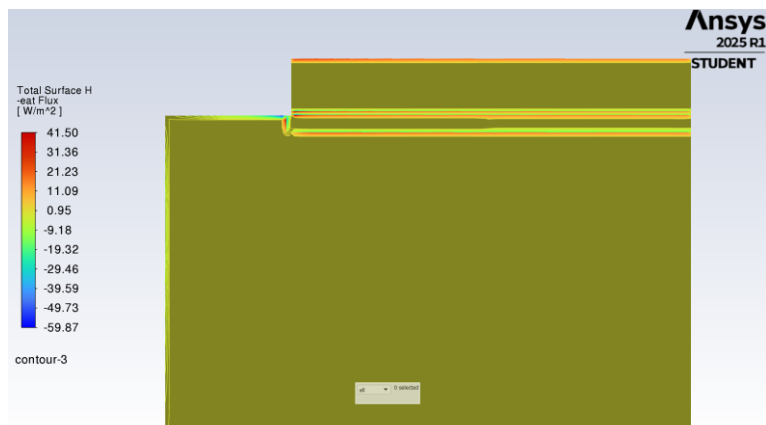


Figura 25. Transferencia de calor en las paredes del depósito – Caso 1F

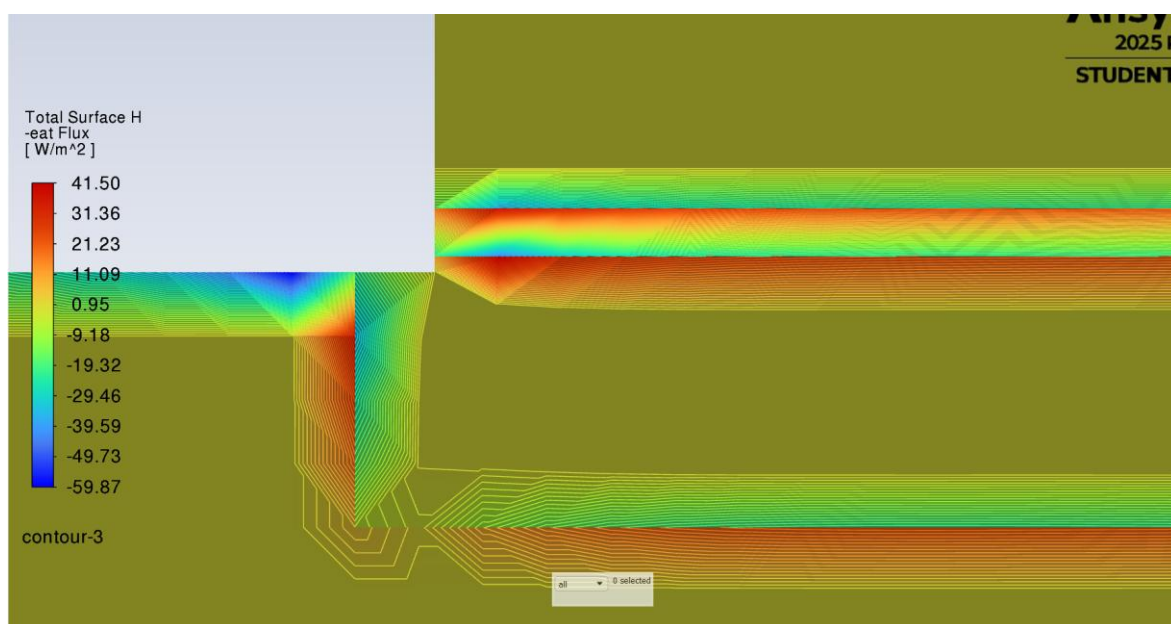


Figura 26. Primer plano de la transferencia de calor en el borde del depósito – Caso 1F

El análisis de la transferencia de calor muestra una pérdida de $41,5 \text{ W/m}^2$, lo que indica un flujo positivo hacia el exterior, es decir, disipación térmica desde el depósito.

5.2.1.2 Caso 2F: Espesor de Arlita de 2m

De forma análoga al caso anterior, se muestran los perfiles de temperatura en las figuras 27 y 28.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

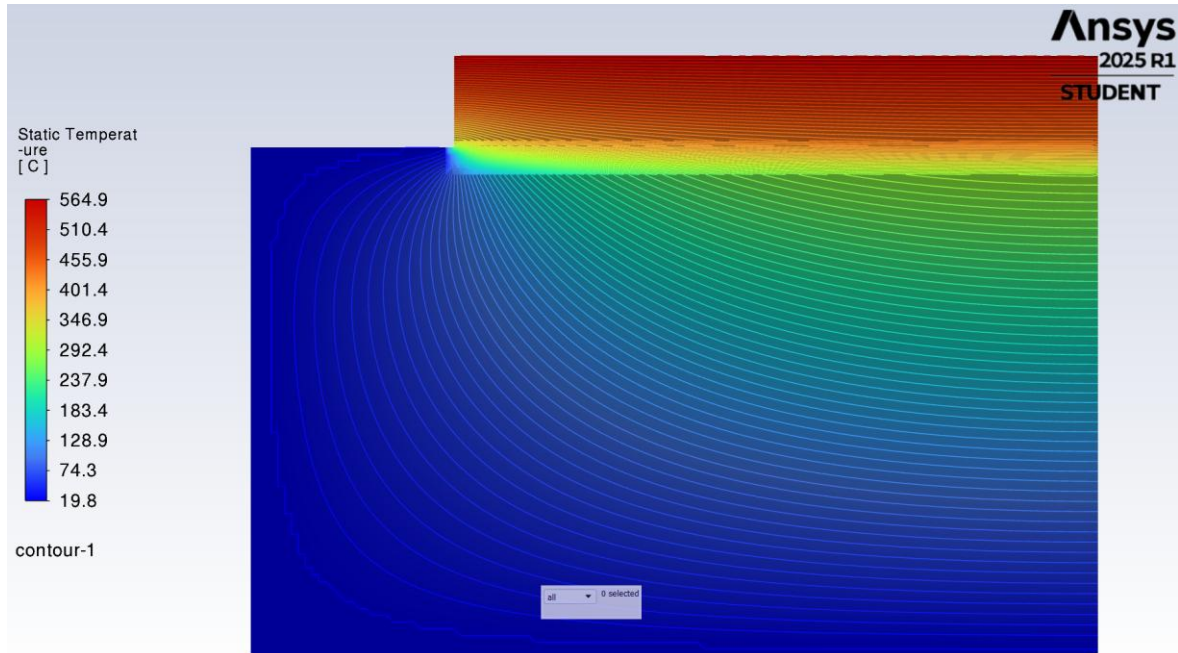


Figura 27. Distribución de temperaturas en el depósito y suelo – Caso 2F

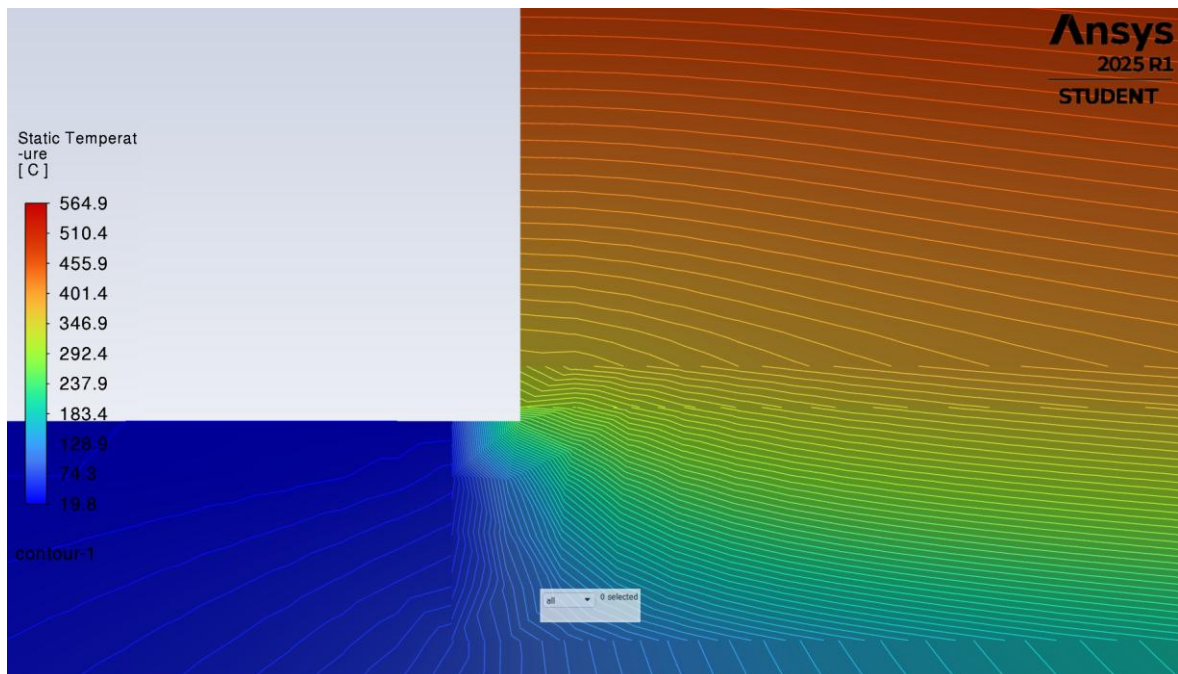


Figura 28. Primer plano de la distribución de temperaturas en el exterior del depósito – Caso 2F

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

El incremento del espesor de la arlita reduce el flujo térmico hasta los 37,6 W/m², lo que representa una disminución de 3,9 W/m² respecto al caso 1F. Esta reducción será evaluada desde un punto de vista económico para determinar si el aumento de aislamiento compensa la inversión adicional.



Figura 29. Transferencia de calor en las paredes del depósito – Caso 2F

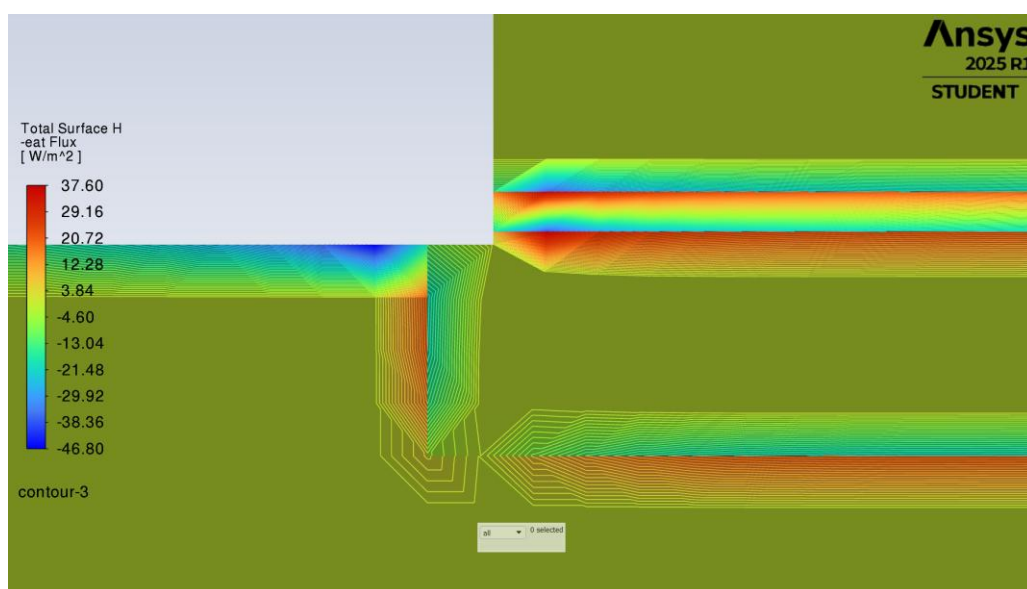


Figura 30. Primer plano de la transferencia de calor en el borde del depósito – Caso 2F

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

5.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS E IMPACTO ECONÓMICO

e evaluó el impacto económico de incrementar el espesor de arlita, incluyendo un análisis del periodo de retorno de la inversión (payback period). A pesar de su alta resistencia térmica y mecánica, la arlita es un material costoso, por lo que su amortización debe ser cuidadosamente analizada.

Se calcularon los costes materiales asociados al aumento del espesor, así como la energía adicional recuperada gracias a la reducción de pérdidas térmicas, considerando una eficiencia del 97 % del ciclo Rankine. Al valorarla al precio medio de venta de electricidad en esa fecha, se obtuvo un periodo de retorno de 10 años y medio, como se muestra en la figura 10.

Este extenso payback pone en duda la rentabilidad de la medida, ya que compromete la viabilidad económica de la planta. Dado que la vida útil estimada de la instalación es de 30 años, un retorno de inversión de 10 años implica que habría beneficios netos reales, si bien serían escasos, especialmente si se considera el efecto del valor temporal del dinero.

Incremento de espesor	m	0,3
Incremento de presupuesto	€	155340,45
Incremento de energía	MW/hr/año	113,62
Incremento de ganancias	€/año	14838,76
Payback	años	10,47

Tabla 10. Análisis “Payback” del incremento de espesor de arlita

Para completar el análisis, se calculó el LCOE en ambos casos, utilizando como referencia la planta Gemasolar, adaptada a las condiciones simuladas. Se consideró que:

- Las pérdidas térmicas del caso 1F ya están incluidas en la producción anual estimada.
- La energía “ahorrada” en el caso 2F se suma como generación adicional.
- Se incorporaron a los costes totales los materiales adicionales requeridos en el caso 2F.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

Elemento	Unidades	Caso 1F	Caso 2F
LCOE	€/MWhr	73,57	73,59
Inversión total	€	230000000,00	230155340,45
Pagada	€	104000000,00	104155340,45
Subvencionada	€	126000000,00	126000000,00
Generación anual	MWhr	110000,00	110117,13
O&M anual	€	536666,67	537029,13
CRF	-	0,07	0,07
Vida útil	años	30	30
Tasa de descuento	%	0,06	0,06

Tabla 11. Comparativa de los LCOE del Caso 1F y Caso 2F

Los resultados muestran que el LCOE es ligeramente mayor en el caso 1F, lo que indica que, aunque la mejora en aislamiento térmico reduce las pérdidas, la inversión adicional en arlita no se traduce en una mejora económica significativa en términos de coste nivelado.

Capítulo 6. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha demostrado que, aunque las plantas termosolares de sales fundentes presentan ventajas claras de almacenamiento continuo y generación en ausencia de irradiación, el aislamiento de su base sigue siendo un punto crítico tanto desde el punto de vista térmico como económico. En los primeros capítulos se revisó el estado del arte, identificando que la transmisión de calor a través del fondo del depósito es una de las principales fugas energéticas en instalaciones como Gemasolar. Con esta premisa, se diseñaron dos aproximaciones complementarias para cuantificar y valorar esas pérdidas: un modelo bidimensional simplificado en Excel y simulaciones CFD en Ansys Fluent.

El análisis en Excel puso de manifiesto que incrementar el espesor de arlita de 2 a 3 metros reduce las pérdidas en unos 47 kW constantes, lo que equivale a recuperar alrededor de 301 MWh al año (o 292 MWh netos tras aplicar la eficiencia del 97 % del ciclo Rankine). Sin embargo, el coste adicional de material genera un periodo de amortización de 14 años, muy próximo a la vida útil de 30 años de la planta. Este resultado indica que, pese al ahorro energético, la inversión en arlita extra apenas deja margen de rentabilidad y no resulta recomendable sin incentivos o ajustes de coste.

Las simulaciones CFD reforzaron estos hallazgos con mayor fidelidad física. Al comparar un espesor de 1,7 m y otro de 2,0 m de arlita, se observó una reducción del flujo térmico superficial de 41,5 W/m² a 37,6 W/m². Traducido a energía anual, este descenso confirma el ahorro estimado en Excel, pero el correspondiente cálculo de LCOE, basado en los parámetros de la planta Gemasolar, no exhibe mejoras sustanciales al aumentar el aislamiento. De nuevo, el incremento de costes por arlita extra no se ve compensado por la mayor generación y, por tanto, el coste nivelado no mejora de forma significativa.

En conjunto, ambos métodos muestran rendimientos decrecientes al añadir aislamiento más allá de un cierto umbral. De manera práctica, un espesor intermedio, en torno a 1,7 m, parece

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

ofrecer el punto de equilibrio más favorable entre reducción de pérdidas y coste de material, frente a los espesores más elevados estudiados. Para afinar esta recomendación, sería recomendable validar in situ las hipótesis sobre conductividad de contacto y estratificación interna mediante sensores aplicados en un prototipo real.

Finalmente, y dado el prolongado payback y la sensibilidad del LCOE al coste del capital, futuros desarrollos deberían explorar posibles subvenciones o esquemas de financiación verde. También convendría evaluar el impacto conjunto sobre la estabilidad geotécnica de la cimentación, pues reducir las temperaturas de la base contribuye a preservar las características del terreno y prolongar la vida útil estructural de la planta.

Escribe en las conclusiones que el cálculo es en estacionario y no en transitorio. Se ha establecido la potencia del depósito como la media.

Además, se abren diversas líneas de investigación que permitirían mejorar la precisión de los modelos y ampliar la aplicabilidad del estudio. En primer lugar, sería interesante desarrollar simulaciones en régimen transitorio, que reproduzcan los ciclos de carga y descarga térmica reales de la planta, ya que el comportamiento térmico de los materiales y las pérdidas podrían variar significativamente con el tiempo. En segundo lugar, podría explorarse el uso de nuevos materiales aislantes, más eficientes o con mejores propiedades mecánicas, que permitan reducir el espesor sin comprometer el aislamiento.

También sería valioso extender el modelo a una evaluación acoplada térmico-estructural, para estudiar cómo las temperaturas alcanzadas en la base afectan a largo plazo a la cimentación, especialmente en suelos con sensibilidad térmica. Por otro lado, desde el punto de vista económico, podría profundizarse en un análisis financiero más completo, incorporando escenarios de precios futuros de la electricidad, y condiciones de financiación específicas para energías renovables.

En definitiva, este estudio ofrece una visión integral que combina rapidez y precisión, y sienta las bases para optimizar el aislamiento térmico en depósitos de sales fundentes, sin

*ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE
SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES*

perder de vista las restricciones económicas que determinan la viabilidad real de estas mejoras en el sector termosolar.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [DUTT17] Dutta, P., “High temperature solar receiver and thermal storage systems”, Applied Thermal Engineering, vol. 124, pp. 624-632, 2017.
- [PRIE24] Prieto, C., Blindu, A., Cabeza, L., Valverde, J., García, G., “Molten Salts Tanks Thermal Energy Storage: Aspects to Consider during Design.”, Energies, vol. 17, no. 1:22, 2024.
- [HERR04] Herrmann, U., Kelly, B., Price, H., “Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants.” Energy, 2004, vol. 29, no 5-6, pp. 883-893.
- [GABB09] Gabbrielli, R., Zamparelli, C., “Optimal Design of a Molten Salt Thermal Storage Tank for Parabolic Trough Solar Power Plants”, Journal of Solar Energy Engineering, vol 131, no 4, 2009.
- [SUAR15] Suárez, C., Iranzo, A., Pino, F. J., & Guerra, J., “Transient analysis of the cooling process of molten salt thermal storage tanks due to standby heat loss.”, Applied Energy, vol. 142, pp. 56-65, 2015
- [PERE12] Perez, C., Rodriguez, I., Oliva, A., Torras, S., Lehmkuhl, O., “Detailed numerical model for the resolution of molten salt storage tanks for CSP plants.”, 2012.
- [APAR20] Aparicio, M. P., “Radiación solar y su aprovechamiento energético”, Marcombo, 2020.
- [PLAC16] Placco, C., Saravia, L., “Generación de energía eléctrica solar térmica.”, Energía Solar, 2016.
- [ELAM25] Elamine Abdeselem, M., Eddine Boukelia, T., Salah Mecibah, M., “Comparative analysis of integrating different power cycles into a concentrated solar power plant”, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 285, 2025.
- [BARR23] Barrasso, M., Langella, G., Amoresano, A., Iodice, P., “Latest Advances in Thermal Energy Storage for Solar Plants”, Processes, vol. 11, no. 6, 2023
- [OSOR24] Osorio, J. D., Mehos, M., Imponenti, L., Kelly, B., Price, H., Torres-Madronero, J., Rivera-Alvarez, A., Nieto-Londono, C., Ni, C., Yu, Z., Hamilton, W., Martinek, J., “Failure Analysis for Molten Salt Thermal Energy Storage Tanks for In-Service CSP Plants”, (2024).

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

[FERN19] Fernández, A., Cabeza, L., “Molten salt corrosion mechanisms of nitrate based thermal energy storage materials for concentrated solar power plants: A review”, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 194, pp. 160-165, 2019.

[ZAVE13] Zaversky, F., García-Barberena, J., Sánchez, M., & Astrain, D., “Transient molten salt two-tank thermal storage modeling for CSP performance simulations.”, Solar Energy, vol. 93, pp. 294-311, 2013.

[PRIE16] Prieto, C., Miró, L., Peiró, G., Oro, E., Gil, A., Cabeza, L.F., “Temperature distribution and heat losses in molten salts tanks for CSP plants.”, Solar Energy, vol. 135, pp. 518-526, 2016.

[ZHAN19] Zhang, X., Wu, Y., Ma, C., Meng, Q., Hu, X., Yang, C., “Experimental Study on Temperature Distribution and Heat Losses of a Molten Salt Heat Storage Tank.”, Energies, vol. 12, no. 10, 2019.

[APIS18] American Petroleum Institute, “API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage,” 13th ed., API, 2018.

[ASME20] The American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code”, ASME, 2020.

[SCHU08] Schulte-Fischedick, J., Tamme, R., Herrmann, U., “CFD Analysis of the Cool Down Behaviour of Molten Salt Thermal Storage Systems,” in Proceedings of ES2008 Energy Sustainability 2008, Paper ES2008-5410, 2008.

[SERR18] Serrano, M., “Centrales TERMOSOLARES: CCP, Fresnel, Torre | La BATALLA SOLAR: ¿Fotovoltaica o Termosolar?”, 2018.

[BENI14] Benito, D., “Diseño de los intercambiadores de calor tubo-carcasa del sistema de generación de vapor de una central termosolar de colectores cilindroparabólicos de 50Mwe de potencia”, 2014.

[MUÑO14] Muñoz, J., “Análisis estadístico de viabilidad de un sistema de disco Stirling”, 2014.

[RIVA20] Rivas, E., “Estudio de la transferencia en un sistema de almacenamiento térmico en sales fundentes con generador de vapor integrado”.

[VARE20] Varela, M., Alfageme A., Suarez, I., “Análisis de las pérdidas térmicas de un tanque de sales fundentes mediante simulación CFD”, Universidad de Oviedo, 2020.

[GIL17] Gil, A., Gutierrez-Perez, V., Tetreault-Friend, M., Codd, D., Calvet, N., Slocum, A., “CSPonD demonstrative project: Start-up process of a 25 kW prototype”, Department

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology; Institute Center for Energy (iEnergy), Department of Mechanical & Materials Engineering, Masdar Institute of Science & Technology; Shiley-Marcos School of Engineering, University of San Diego, 2017.

[MUÑO17] Muñoz-Sánchez B., Nieto-Maestre J., González-Aguilar J., Julia J.E., Navarrete N., Faik A., Bauer T., Bonk A., Navarro M.E., Ding Y., Uranga N., Veca E., Sau S., Giménez P., García P., Burgaleta, J.I., “Test on the Measurement of the Specific Heat of Solar Salt”, Round Robin, AIP Conference Proceedings, 1850, 080017, 2017.

[ZHAO16] Zhao Q.-G., Liu S.-J., Guo H., Chen X., “A theoretical model for predicting the thermal conductivity of binary molten salts”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 92, 639-642, 2016.

[BONK21] Bonk, A., Bauer, A., “Report on thermo-physical properties of binary NaNO₃-KNO₃ mixtures in a range of 59-61 wt% NaNO₃”, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Technische Thermodynamik Standort Stuttgart, 2021.

[KONR05] Konrad, J.-M., “Thermal Conductivity of Base-Course Materials.” Canadian Geotechnical Journal, Canadian Science Publishing, 2005.

- [1] REE, Generación solar térmica, <https://www.sistemaelectrico-ree.es/es/informe-de-energias-renovables/sol/generacion/solar-termica-solgeneracion>
- [2] REE, <https://www.sistemaelectrico-ree.es/es/informe-de-energias-renovables/sol/potencia-instalada/solar-termica-solpotencia>
- [3] AEMET, https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar
- [4] World bank, ESMAP, Solargis <https://globalsolaratlas.info/download/spain>
- [5] Energía termosolar de concentración, Wikipedia, https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_termosolar_de_concentraci%C3%B3n#:~:text=durante%20los%20pr%C3%B3ximos%20a%C3%B1os,3%20%5D%E2%80%8B
- [6] U.S. Department of energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Concentrating Solar Power, https://library.cap-az.com/documents/meetings/10-17-2013/3_Combined_Solar_CSP.pdf#:~:text=Operating%20Temperature%20,Storage%20Avaliable%20Limited%20Yes%20Battery

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES

- [7] Energy matters, Solar power tower: use molten salt as an energy storage system, <https://www.energymatters.com.au/renewable-news/solar-power-tower-use-molten-salt-as-an-energy-storage-system/#:~:text=The%20cold%20tank%20stores%20the,to%20the%20hot%20storage%20tank>
- [8] NREL, Annual technology Baseline, Concentrating solar power, https://atb.nrel.gov/electricity/2023/technologies/concentrating_solar_power#:~:text=match%20at%20L315%20reported%20installed,United%20States%20is%20home%20to
- [9] Calor solar para la industria, <https://www.ressspi.com/calorsolar/tecnologia>
- [10] International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES, Xinjiang commissions world-first 100MW linear Fresnel project, <https://www.solarpaces.org/xinjiang-commissions-world-first-100-mw-linear-fresnel-csp-project/#:~:text=The%20linear%20Fresnel%20collector%20system,construction%20costs%20and%20simplified%20maintenance>
- [11] Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Gobierno de España, Fresdemo, <https://www.psa.es/es/instalaciones/fresnel/fresdemo.php>
- [12] Energías renovables, Endesa quiere lanzar el disco Stirling, <https://www.energias-renovables.com/termosolar/endesa-quiere-lanzar-el-disco-stirling>
- [13] Energías renovables, Lo que no se conoce (o no se quiere conocer) sobre el almacenamiento eléctrico en nuestro país, <https://www.energias-renovables.com/termosolar/lo-que-no-se-conoce-o-no-20190520>
- [14] GreVault, “Tecnología de almacenamiento en sales fundentes: un avance revolucionario en el almacenamiento de energía”, <https://www.huntkeyenergystorage.com/es/molten-salt-storage/>
- [15] CTE WEB, Código técnico de la edificación web, “Prontuario de soluciones constructivas”, <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=1>
- [16] Weber, Arlita Leca Solar, <https://www.es.weber/files/es/2018-05/FOL-ES-Weber-Arlita-Leca-Solar.pdf>
- [17] Planta Gemasolar, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Gemasolar_Thermosolar_Plant
- [18] Arlita Leca, Obramat, https://www.obramat.es/productos/arlita-dur-weber-2-10mm-50-l-25035371.html?srsId=AfmBOoqCjRuagINoz7n8I0NQMJiEeYE_EF7CjqoMGmUeRVBdgCwgUMji

*ANÁLISIS DE PÉRDIDAS TÉRMICAS A TRAVÉS DE LA BASE EN DEPÓSITOS DE
SALES FUNDENTES EN PLANTAS TERMOSOLARES*

ANEXO I

Esta página está dejada intencionalmente en blanco.