

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Estado del arte de fluidos caloportadores para
tecnología CSP

Autor: Pablo González Jiménez

Tutor: Cristina Prieto Ríos

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Estado del arte de fluidos caloportadores para tecnología CSP

Autor:

Pablo González Jiménez

Tutor:

Cristina Prieto Ríos

Dpto. de Máquinas y Motores Térmicos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: Estado del arte de fluidos caloportadores para tecnología CSP

Autor: Pablo González Jiménez

Tutor: Cristina Prieto Ríos

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis amigos
A mis maestros

Agradecimientos

A todas las personas que me han acompañado durante esta etapa, ofreciéndome su ayuda y ánimos en todo momento. En especial a mis padres, por haber confiado de manera incondicional en mí y no haber dejado que perdiera la ilusión en ningún momento.

A mis amigos, por su apoyo, por su humor y por haberme ayudado a convertirme en lo que soy, tanto a nivel personal como profesional.

A todos los profesores que alguna vez me dieron clase, en especial a mi tutora Cristina por su ayuda, su atención y su tiempo.

Pablo González Jiménez

Sevilla, 2022

En la lucha contra el cambio climático las energías renovables toman un papel fundamental. Entre ellas destaca la energía térmica de concentración, que utiliza la radiación solar para producir electricidad por medio de un fluido caloportador que cede el calor absorbido a los intercambiadores del sistema para producir el vapor que se necesita en el bloque de potencia.

El campo de estudio del presente proyecto de fin de carrera será realizar un análisis de los diferentes tipos de fluidos caloportadores que se utilizan en las plantas CSP. Estos son: agua/vapor, aceites térmicos sintéticos, minerales y con base de silicona, metales líquidos y nanofluidos.

Se estudiarán las propiedades y características de estos fluidos, así como sus ventajas e inconvenientes y se compararán entre ellos por medio de gráficas y tablas para determinar cuál es el más adecuado para cada una de las aplicaciones.

Abstract

In the fight against climate change, renewable energies play a fundamental role. Among them, concentrated solar power stands out, which uses solar radiation to produce electricity, it uses a heat transfer fluid that transfer the absorbed heat to de exchangers to produce the steam the power block needs.

This study will carry out an analysis of the different types of heat transfer fluid used in CSP plants. These are; water/steam, mineral, synthetic and silicone-based thermal oils, liquid metals and nanofluids.

Properties and characteristics of these fluids will be studied, as well as their advantages and disadvantages, and they will be compared between them using graphics and tables to determine which one is the most suitable for each application.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Ecuaciones	xix
Índice de Gráficas	xxi
Índice de Ilustraciones	xxiii
Notación	xxv
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivo</i>	1
1.2 <i>El fluido caloportador en la industria termosolar</i>	1
2 Propiedades del fluido caloportador	5
2.1 <i>Propiedades del fluido caloportador</i>	5
2.2 <i>Otros parámetros que caracterizan a un fluido caloportador</i>	5
2.2.1 <i>Número de Prandtl</i>	6
2.2.2 <i>Número de Reynolds</i>	7
2.2.3 <i>Número de Nusselt</i>	8
3 Tipos de fluidos caloportadores	9
3.1 <i>Tipos de fluidos caloportadores</i>	9
3.1.1 <i>Agua/Vapor</i>	9
3.1.2 <i>Aceites térmicos</i>	10
3.1.2.1 <i>Aceites térmicos minerales</i>	13
3.1.2.2 <i>Aceites térmicos sintéticos</i>	14
3.1.2.3 <i>Aceites térmicos con base de silicona</i>	19
3.1.3 <i>Sales fundidas</i>	22
3.1.3.1 <i>Sal Solar</i>	25
3.1.3.2 <i>Hitec</i>	26
3.1.3.3 <i>Hitec XL</i>	27
3.1.3.4 <i>Otras sales fundidas</i>	29
3.1.4 <i>Nanofluidos</i>	29
3.1.5 <i>Metales líquidos</i>	32
3.1.5.1 <i>Sodio Líquido</i>	33
3.1.5.2 <i>Mezcla eutéctica NaK</i>	35
3.1.5.3 <i>Mezcla eutéctica PbBi</i>	35
4 Análisis de datos	37
5 Conclusión	52
Referencias	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del número de Pradtl para diferentes fluidos [14]	6
Tabla 2. Comparativa principales criterios de selección entre aceites térmicos sintéticos y minerales. [25]	13
Tabla 3. Conductividad térmica de diferentes materiales. [58]	32
Tabla 4. Propiedades del agua, Therminol VP-1 y Helisol 5A a 227°C. Datos obtenidos de las correlaciones proporcionadas por [37], [71]	38
Tabla 5. Propiedades de las sales fundidas: sal solar, Hitec y Hitec XI; y de los metales fundidos: sodio líquido y LBE. Datos obtenidos de las correlaciones proporcionadas por [47][56]	39

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Número de Prandtl	6
Ecuación 2. Número de Reynolds	7
Ecuación 3. Número de Nusselt	8
Ecuaciones 4. Correlaciones de las propiedades termo-físicas de Therminol VP-1 en función de la temperatura $285\text{ K} < T < 673\text{ K}$ [33].	15
Ecuaciones 5. Correlaciones de las propiedades termo-físicas de la Sal Solar en función de la temperatura	25
Ecuaciones 6. Correlaciones de las propiedades termo-físicas de la sal Hitec en función de la temperatura	26
Ecuaciones 7. Correlaciones de las propiedades termo-físicas de la sal Hitec XL en función de la temperatura $403\text{ K} < T < 823\text{ K}$. [33]	27
Ecuaciones 8. Correlaciones de las propiedades termo-físicas del sodio líquido en función de la temperatura $371\text{ K} < T < 1255\text{ K}$. [65]	35
Ecuaciones 9. Correlaciones de las propiedades termo-físicas de la mezcla eutéctica de plomo y bismuto en función de la temperatura $400\text{ K} < T < 1500\text{ K}$. [69]	36

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Conductividad térmica de los aceites térmicos sintéticos en función de la temperatura.	17
Gráfica 2. Densidad de los aceites térmicos sintéticos en función de la temperatura.	17
Gráfica 3. Presión de vapor de los aceites térmicos sintéticos en función de la temperatura.	18
Gráfica 4. Calor específico de los aceites térmicos sintéticos en función de la temperatura.	18
Gráfica 5. Propiedades de Therminol VP-1 en función de la temperatura (rojo: densidad; azul: calor específico; naranja: viscosidad)	21
Gráfica 6. Conductividad térmica Therminol VP-1 (Ficha técnica del fabricante) y agua.	38
Gráfica 7. Calor específico del Therminol VP-1 según las fuentes: rojo [71], verde [47], azul [72].	41
Gráfica 8. Densidad del Therminol VP-1 según las fuentes: rojo [71], verde [47], azul [72].	41
Gráfica 9. Conductividad térmica del Therminol VP-1 según las fuentes: rojo [71], verde [47], azul [72].	42
Gráfica 10. Densidad de la sal solar, según las fuentes: rojo [74], verde [47], morado [75].	43
Gráfica 11. Calor específico de la sal solar, según las fuentes: rojo [74], verde [47], morado [75].	44
Gráfica 12. Conductividad de la sal solar, según las fuentes: rojo [74], verde [47], morado [75].	44
Gráfica 13. Densidad de la sal Hitec, según las fuentes: rojo [73], verde [47], morado [75].	45
Gráfica 14. Calor específico de la sal Hitec según fuentes; rojo [73], verde [Libro].	46
Gráfica 15. Conductividad térmica de la sal Hitec según fuentes; verde oscuro [73], verde [47], morado [75].	46
Gráfica 16. Conductividad térmica del sodio líquido según fuentes; rojo [78], verde [56], morado [79].	47
Gráfica 17. Densidad del sodio líquido según fuentes; rojo [78], verde [56], morado [79].	48
Gráfica 18. Calor específico del sodio líquido según fuentes; rojo [78], verde [56], morado [79].	48
Gráfica 19. Calor específico del LBE según fuentes; rojo [56], verde [80], morado [81].	49
Gráfica 20. Densidad del LBE según fuentes; rojo [56], verde [82], morado [83].	50
Gráfica 21. Conductividad térmica del LBE según fuentes; rojo [56], verde [84], morado [85].	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Técnicas de captación termosolar [2]	1
Ilustración 2. Esquema planta termosolar [2]	2
Ilustración 3. Transmisión radiación-calor[2]	2
Ilustración 4. Rango de temperaturas según tipo de fluido [7]	4
Ilustración 5. Rango de temperaturas fluidos comerciales [2]	4
Ilustración 6. Regímenes de flujo de un fluido en conductos. [16]	7
Ilustración 7. Número de Reynolds de diferentes fluidos caloportadores en función de la temperatura de trabajo. [17]	7
Ilustración 8. Diagrama T/v de una sustancia pura (agua). [20]	9
Ilustración 9. Gráfico P/T de vapor frente a fluidos. [25]	11
Ilustración 10. Gráfico % degradación por año frente a la temperatura de trabajo. [8]	11
Ilustración 11. Principales propiedades Xceltherm 600 (temperatura en K). [28]	14
Ilustración 12. Rango operación Therminol VP-1 [31]	15
Ilustración 13. Rango operación Therminol 75	16
Ilustración 14. Rango operación Therminol 66 [35]	16
Ilustración 15. Comparación DBO/BP y Helisol 5A después de 10 días a 465°C [38]	19
Ilustración 16. Formación de hidrogeno en DPO/BP a 400°C (verde) y en Helisol 5 a 425°C (azul) [38]	20
Ilustración 17. Propiedades de Helisol 5A en función de la temperatura (azul: densidad; rojo: calor específico; verde: viscosidad) [38]	20
Ilustración 18. Generación de electricidad durante el día y la noche en una planta CSP de torre central con almacenamiento térmico. [39]	22
Ilustración 19. Distribución costes planta CSP con almacenamiento en sales fundidas. [41]	23
Ilustración 20. Planta CSP de Gemasolar [42]	24
Ilustración 21. Sales fundidas de alta temperatura. [43]	25
Ilustración 22. Estabilidad térmica de la sal fundida Hitec a varias temperaturas en función del tiempo de duración. [2]	26
Ilustración 23. Propiedades termo-físicas de la sal fundida Hitec. [47]	27
Ilustración 24. Curvas del calor específico de Hitec XL en función de la temperatura. [47]	28
Ilustración 25. Comparación del coeficiente de transmisión de calor de las tres sales fundidas mencionadas en función de la temperatura. [33]	28
Ilustración 26. Crecimiento de las publicaciones de nanofluidos. [51]	30
Ilustración 27. Conductividades térmicas de los materiales más usados como nanopartículas. [54]	31

Ilustración 28. Principales elementos usados como nanopartículas y fluidos base. [55]	31
Ilustración 29. Comparación de metales líquidos como HTF en CSP [61]	33
Ilustración 30. Propiedades del sodio líquido, MODIFICADA DE [64]	34
Ilustración 31. Comparativa del coeficiente de transmisión de calor entre sodio, LBE y sales fundidas. [70]	36
Ilustración 32. Comparativa de las principales propiedades entre sodio, LBE y sales fundidas. [70]	36
Ilustración 33. Rangos de temperatura de algunos fluidos estudiados. [56]	37
Ilustración 34. Propiedades del sodio líquido y de Hitec en función de la temperatura. a) Densidad; b) Calor específico; c) Viscosidad; d) Conductividad térmica. MODIFICADA DE [64]	40

Notación

HTF	Heat Transfer Fluid
°C	Grados centígrados
KJ	Kilojulios
Kg	Kilogramos
W	Wattios
CSP	Concentring Solar Power
TES	Thermal Energy Storage
GWe	Gigawattios eléctricos
μ	Viscosidad, Pa s
ρ	Densidad, Kg/m ³
λ	Conductividad térmica, W/mK
Cp	Calor específico, kJ/kgK
SAM	System Advisor Model

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo

A lo largo del siguiente estudio se comentarán y analizarán los principales tipos de fluidos caloportadores que se utilizan en las plantas de producción energía de tipo termosolar: agua/vapor, aceites térmicos, sales fundidas, nanofluidos y metales líquidos. Para ello se estudiarán los nombres propios más importantes de cada uno de los tipos, comparando en algunos casos fabricantes de estos fluidos.

El objetivo es por ello conocer y mostrar las características que describen a cada uno de los fluidos caloportadores, profundizando sobre todo en las propiedades termo-físicas que poseen y que los hacen más o menos apropiados dependiendo de las necesidades operativas de la planta. Se estudiarán también los fluidos en desarrollo a día de hoy y se mostrará una comparación final mediante un análisis de datos.

1.2 El fluido caloportador en la industria termosolar

Son muchos los procesos industriales que requieren de un calor de proceso para poder llevar a cabo su función. Este calor de proceso se puede describir como la utilización de la energía solar, en especial la solar térmica para el análisis y experimentación de fenómenos termoquímicos, el trabajo con materiales y su uso para procesos industriales que requieran altas temperaturas entre otros. [1]

Uno de esos procesos industriales es sin duda la producción de energía eléctrica, y como parte de la constante búsqueda de fuentes de energía más limpias y respetuosas con el medioambiente, las plantas solares de concentración (CSP, Concentring Solar Power) son esenciales debido a su carácter renovable y múltiples aplicaciones. Para el año 2050, la Agencia Internacional de la Energía ha marcado como objetivo que la producción de electricidad para plantas CSP sea de 630 GWe.

En la Ilustración 1 se muestran las cuatro técnicas CSP más utilizadas, a saber, sistemas de disco parabólico, plantas de torre central, colectores cilindro parabólicos y sistemas de captación tipo Fresnel. [2]

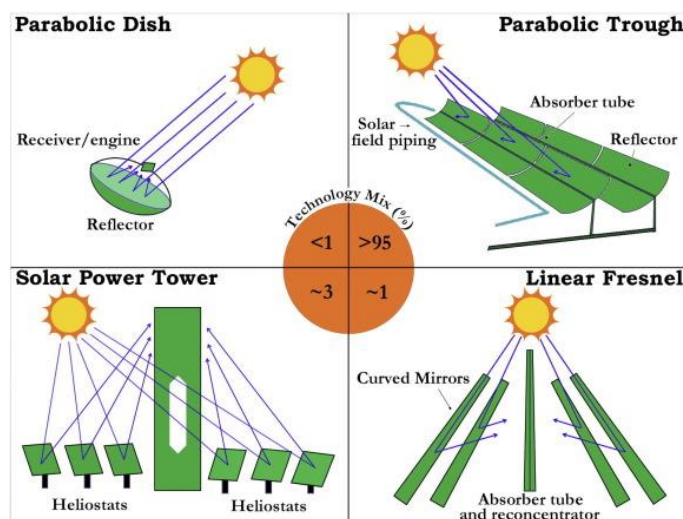


Ilustración 1. Técnicas de captación termosolar [2]

Las plantas que utilizan tecnología termosolar siguen unos principios muy sencillos, en ellas la energía térmica se genera a partir de la radiación solar, donde unos espejos o lentes (el sistema de captación determina el tipo de planta) concentran esa radiación sobre una única superficie generando así calor. Ese calor es absorbido por un fluido térmico denominado fluido caloportador (HTF, Heat Transfer Fluid), el cual se suele calentar hasta unos 393°C (dependiendo del fluido) y transporta el calor generado hasta un sistema de intercambiadores para producir vapor; ese vapor sobrecalentado que se produce se empleará en la turbina del bloque de potencia de la planta para producir energía mecánica y a partir de un generador eléctrico, electricidad. En periodos donde se dé una radiación solar baja, se emplean calderas auxiliares donde el fluido es calentado por medio de sistemas de combustión de gas. [3]

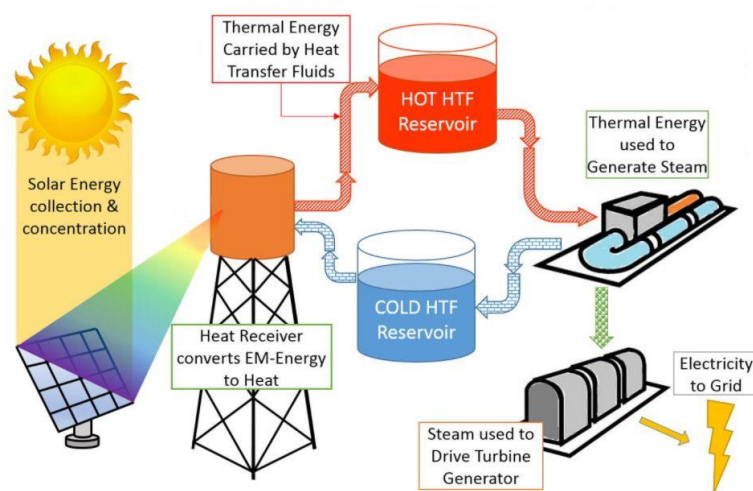


Ilustración 2. Esquema planta termosolar [2]

El campo de estudio de este trabajo se centrará en los fluidos caloportadores (HTF, Heat Transfer Fluid) que transportan por medio de un sistema de transmisión de calor esa energía térmica desde el punto de captación hasta el lugar donde se requiera el uso del calor. Para ello, el fluido eleva su temperatura en el subsistema de captación y transmite el calor recibido en el subsistema de intercambio. Comúnmente, este tipo de fluidos trabajan en un circuito cerrado, de forma que, una vez han cedido parte del calor transportado al proceso en cuestión vuelve al captador para reiniciar el ciclo. [4]

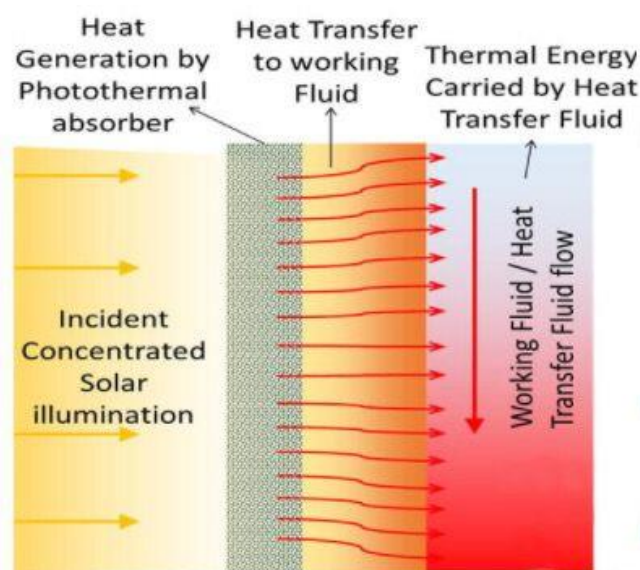


Ilustración 3. Transmisión radiación-calor[2]

Las principales características que debe tener un fluido para poder operar en los diferentes procesos de la manera más óptima son las siguientes:[5] [6]

- Bajo punto de fusión y alto de ebullición que permita un amplio rango de temperatura de trabajo maximizando la eficiencia del ciclo.
- Baja presión de trabajo, para que no sean necesarios equipos de presurización.
- Elevada conductividad térmica a fin de mejorar la transferencia de calor entre los equipos de intercambio y reducir los gradientes de temperatura.
- Estabilidad térmica que evite el deterioro fisicoquímico de los componentes y evite el contacto con el oxígeno en caso de un fluido inflamable.
- Baja viscosidad en todo el rango de trabajo, reduciendo las pérdidas de carga y el tamaño de los equipos de bombeo. Además, favorece el arranque de la planta a temperatura ambiente, por lo que no es necesario equipos de precalentamiento.
- Baja toxicidad, de forma que minimice daños sobre el personal de mantenimiento.
- Bajo impacto ambiental.
- Alta densidad de energía, de esta forma se maximiza la cantidad de energía térmica almacenada por unidad de volumen reduciendo así el espacio necesario para la instalación.
- Baja corrosión a los elementos del sistema, especialmente con las aleaciones que se utilicen para contener el HTF.
- Bajo coste, tanto de adquisición como de mantenimiento.
- Pérdidas térmicas bajas.

Por lo tanto, será necesario comparar las propiedades anteriores a la hora de elegir un fluido caloportador para obtener el más apropiado y óptimo según las necesidades y prestaciones.

El fluido caloportador es sin ninguna duda uno de los componentes más importantes en los sistemas CSP; además de poder transferir la energía térmica de un punto a otro, estos también pueden ser almacenados en grandes tanques adiabáticos capaces de guardar el calor para poder producir energía cuando la radiación solar no sea posible. El almacenamiento térmico (TES, Thermal Energy Storage) es un factor relevante a la hora de diseñar plantas CSP y está llamado a ser uno de los elementos clave en el proceso de descarbonización de la industria. Afortunadamente España es pionero en tecnologías de almacenamiento térmico en las que se usan principalmente sales fundidas como HTF, pues prácticamente la mitad de las plantas termosolar instaladas en España poseen un sistema de almacenamiento en este tipo de sales; y no solo por sus propiedades, sino también porque pueden resultar una opción más económica que otras alternativas de fluidos térmicos.

Hoy en día, los fluidos caloportadores más usados en la industria térmica son el aire, agua/vapor, aceites térmicos, sales fundidas y metales líquidos; que en mayor o menor medida cumplen los requisitos anteriormente mencionados. Cabe destacar la importancia de una correcta elección del fluido caloportador más adecuado para cada proceso, ya que éste está directamente relacionado con el rendimiento del sistema completo, por lo que será necesario realizar un análisis que permita minimizar el coste de este y maximizar su eficiencia.

En la Ilustración 4, se puede ver los rangos de temperatura de utilización de los diferentes tipos de fluidos transmisores de calor, así como las presiones requeridas para su empleo. Mientras que en la figura 3, se muestran los rangos de temperaturas en los que trabajan algunos de los fluidos térmicos más utilizados en la industria.

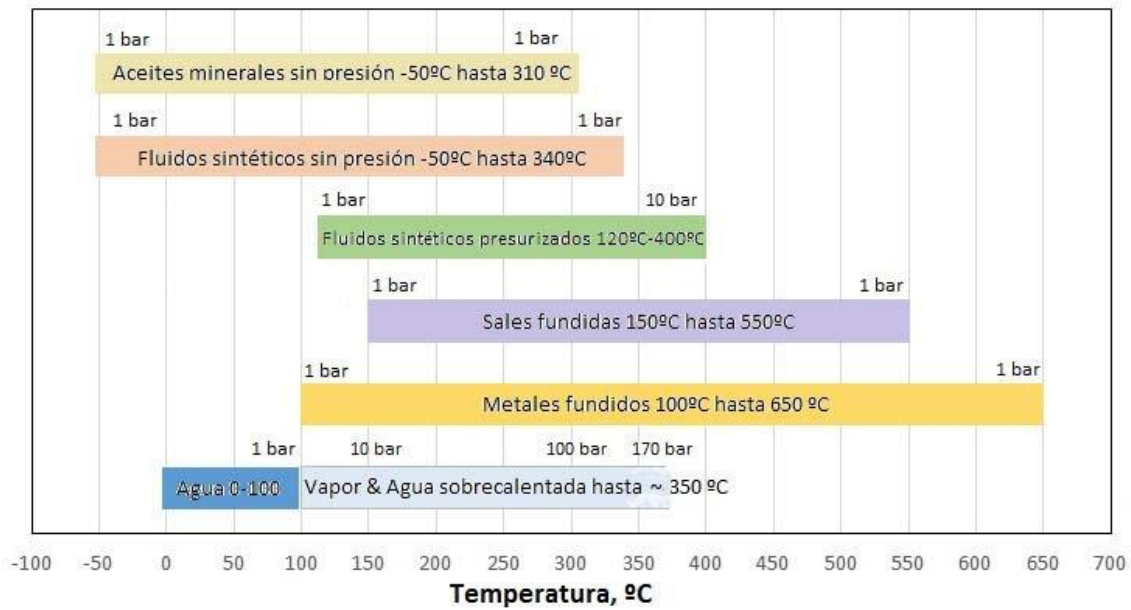


Ilustración 4. Rango de temperaturas según tipo de fluido [7]

No existe un único fluido caloportador para todas las aplicaciones de la industria. En cada proceso industrial, se debe estudiar y elegir el fluido caloportador más apropiado. Cada uno de estos fluidos térmicos tiene una tecnología específica, unas propiedades diferentes, con un coste de instalación y de funcionamiento diferente. [4]

La elección del fluido caloportador no debe estar condicionada por el desconocimiento de una determinada tecnología. [8]

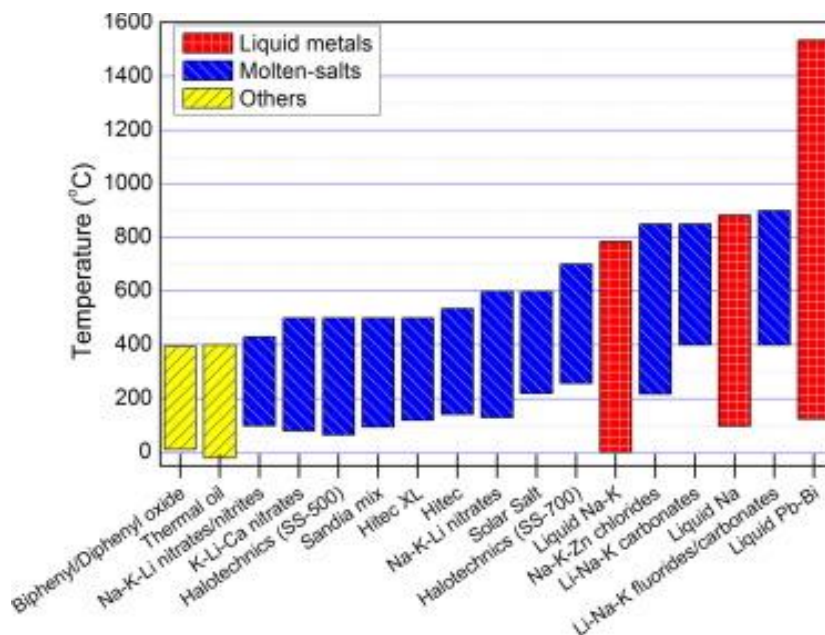


Ilustración 5. Rango de temperaturas fluidos comerciales [2]

2 PROPIEDADES DEL FLUIDO CALOPORTADOR

2.1 Propiedades del fluido caloportador

- **Temperatura de fusión y congelación:** la temperatura de fusión es aquella a la que un sólido pasa a líquido, mientras que la temperatura de congelación es el proceso inverso, en el que el líquido pasa a estado sólido. Esta junto con la temperatura de degradación es probablemente la propiedad más importante de un fluido caloportador. Es necesario que los sistemas estén provistos de mecanismos que eviten la congelación del fluido (pues en ciertos puntos de baja temperatura podría llegar a darse), así como de sistemas que calienten el fluido hasta su temperatura de entrada.
- **Temperatura de degradación:** punto a partir del cual el fluido empieza a vaporizarse o a producirse reacciones químicas en su seno. Normalmente, en la mayoría de los casos esta temperatura de degradación es la que marca la temperatura máxima a la que puede trabajar la planta. Por otro lado, en aquellos casos donde la estabilidad del fluido de operación sea elevada, la temperatura máxima a la que trabaja la planta la determinan otros parámetros, principalmente, la resistencia de los materiales.
- **Estabilidad térmica:** se define como el rango de temperaturas en las que el fluido puede trabajar sin que se llegue a producir ninguna reacción química ni se modifique su composición. Está definida por su temperatura de degradación
- **Densidad:** es una propiedad de la materia que se define como la relación de la masa de una sustancia dividida por el volumen que esta ocupa. Existe un compromiso en cuanto a la densidad como propiedad de un fluido caloportador; una densidad alta requerirá menor volumen y por lo tanto un menor tamaño de los equipos. Sin embargo, también será más difícil su circulación por los conductos y mayor será el gasto energético en los propios equipos.
- **Calor específico:** es una magnitud que se define como la cantidad de calor que hay que aportar a una unidad de masa de un sistema para incrementar su temperatura en un grado centígrado. Esta propiedad va a determinar la cantidad de calor que va a poder absorber el fluido en cuestión. Cuanto mayor sea el valor de este parámetro, menor será la masa de fluido necesaria para una misma cantidad de energía.
- **Conductividad térmica:** es una propiedad física que mide la capacidad de una sustancia para conducir el calor, es decir, permitir el paso de la energía cinética de sus moléculas a otras sustancias adyacentes. [9]
- **Viscosidad:** se trata de una magnitud física que se puede definir como la resistencia de un fluido al deslizamiento. Un fluido caloportador debe tener una viscosidad baja que favorezca un régimen turbulento, de la misma forma, la viscosidad a bajas temperaturas debe de ser baja igualmente para facilitar el arranque en frío de la instalación[10]
- **Presión de vapor:** es la presión a la que a cada temperatura las fases líquida y vapor de un fluido se encuentran en equilibrio; su valor no depende de la cantidad de líquido o vapor presentes mientras existan ambas. [11]

2.2 Otros parámetros que caracterizan a un fluido caloportador

El calor se puede definir como la energía que es transferida de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura de ambos. El calor puede ser transferido por medio de tres mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación. Para cualquiera de ellos es necesario que exista una diferencia de temperatura y siempre desde el sistema de más alta temperatura a uno de temperatura más baja.

Estos mecanismos se pueden definir por parámetros adimensionales que caracterizan el flujo del fluido en el

interior del circuito. Con ellos, es posible conocer el tipo de régimen, laminar o turbulento, la eficiencia de la transferencia de calor o el crecimiento de las capas límite térmica o hidrodinámica.

A saber; Prandtl, Reynolds y Nusselt.

2.2.1 Número de Prandtl

El número de Prandtl es un número adimensional que relaciona los espesores de las capas límite cinética y térmica del fluido. Es decir, mide la efectividad relativa del transporte de momento con respecto al transporte de la energía por difusión (difusividad térmica). Cuando Pr es pequeño significa que el calor difunde muy rápido comparado con la velocidad (momento). [12]

Se define como: [13]

$$Pr = \frac{\text{velocidad de difusión de la cantidad de movimiento}}{\text{velocidad de difusión de calor}} = \frac{\nu}{\alpha}$$

Ecuación 1. Número de Prandtl

En el mercurio, la conducción de calor es muy efectiva comparada con la velocidad, por tanto el número Pr es más bajo que por ejemplo en los aceites, donde la convección es muy eficiente transfiriendo calor comparada con la conducción; En la siguiente tabla se muestran valores del número de Prandtl para diferentes materiales, los metales líquidos poseen números muy bajos, mientras que los gases tienen valores próximos a 1, lo que significa que el momento y el calor se disipan a la misma velocidad en el fluido; finalmente los valores más altos corresponden a los aceites, los cuales pueden llegar a valores de hasta 100000.

Valores característicos del número de Prandtl	
Metales líquidos	
Sodio	0,011
Mercurio	0,0196
Bismuto	0,0142
Gases	
Aire	0,70
Dióxido de Carbono	0,75
Monóxido de Carbono	0,73
Helio	0,68
Hidrógeno	0,70
Otros líquidos	
Agua	7
Fluidos viscosos	
Aceite de Motor	3400
Glicerina	3060

Tabla 1. Valores del número de Prandtl para diferentes fluidos [14]

2.2.2 Número de Reynolds

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión del flujo del fluido para establecer una relación entre las fuerzas convectivas y las viscosas presentes en el fluido. Determina si el flujo es laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande).

La expresión general del número de Reynolds es: [15]

$$Re = \frac{\text{fuerzas convectivas}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{\rho u d}{\mu}$$

Ecuación 2. Número de Reynolds

De esta forma, indica el predominio de la viscosidad, cuanto mayor sea este valor, menor será la importancia de la viscosidad y viceversa. [12]

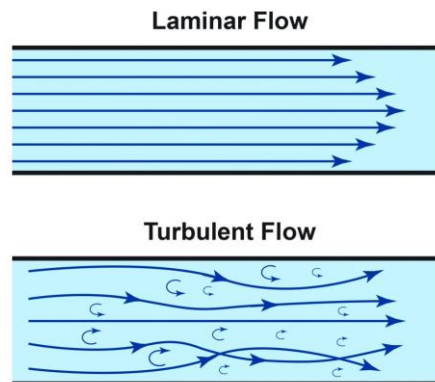


Ilustración 6. Regímenes de flujo de un fluido en conductos. [16]

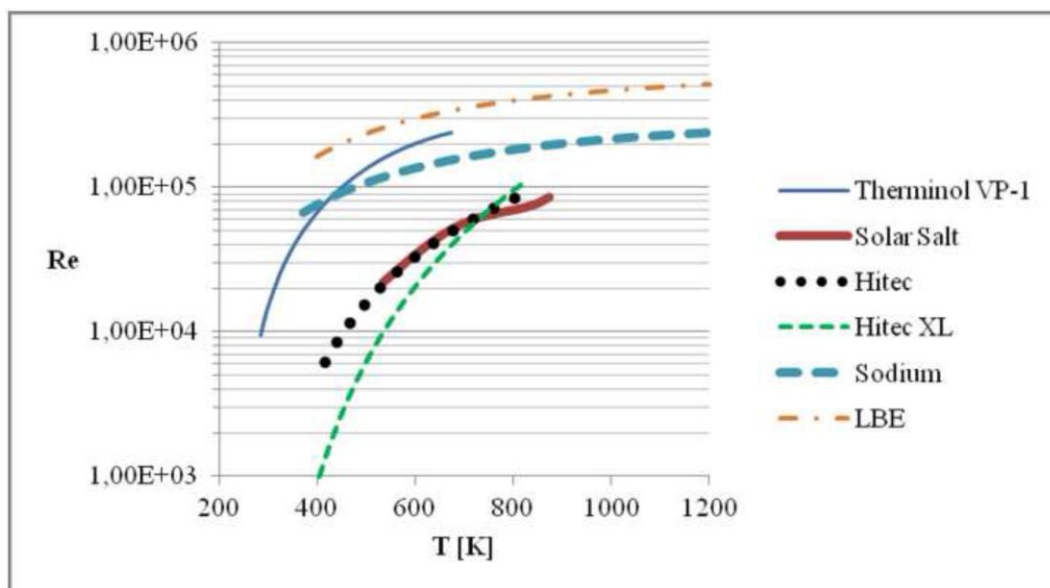


Ilustración 7. Número de Reynolds de diferentes fluidos caloportadores en función de la temperatura de trabajo. [17]

2.2.3 Número de Nusselt

El número de Nusselt (Nu) es un número adimensional que mide el aumento de la transferencia de calor por convección desde una superficie por la que discurre un fluido en comparación con la transferencia de calor si se diese de solo por conducción.

Su expresión es: [18]

$$Nu = \frac{\text{transferencia de calor por convección}}{\text{transferencia d calor por conducción}} = \frac{h L}{k}$$

Ecuación 3. Número de Nusselt

Dónde la k es la conductividad térmica del fluido, la L es la longitud característica y la h el coeficiente de transferencia de calor. Por tanto, el número de Nusselt representa la mejora de transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección relativa a la conducción a través de la capa del propio fluido. [12]

3 TIPOS DE FLUIDOS CALOPORTADORES

3.1 Tipos de fluidos caloportadores

En el siguiente apartado se analizarán los diferentes tipos de fluidos caloportadores que se usan en la industria CSP, desde los más tradicionales como son el agua/vapor, los aceites térmicos y/o las sales fundidas hasta los más recientes que están en desarrollo, los metales líquidos y los nanofluidos.

3.1.1 Agua/Vapor

La energía acumulada en el agua al suministrarle calor, y cedida en los puntos de utilización, es una de las formas más comunes para la transmisión de calor.

Es sin duda el fluido caloportador más utilizado en la industria. Esto se debe principalmente a su fácil obtención, ya que es un recurso abundante, a que es económico; a su elevado calor específico, así como elevado calor de vaporización, una temperatura de trabajo fácilmente ajustable ya que depende de la presión. Por supuesto no es tóxico, lo que no supone ningún riesgo de explosión o incendio ni medioambiental. Sin embargo, su utilización está limitada por su temperatura de vaporización, 100°C, ya que para temperaturas mayores sería necesario elevar la presión de trabajo de la instalación para mantener el agua en estado líquido, agua sobrecalentada, presurizando por tanto el circuito y elevando los costes considerablemente.

Para poder entender el funcionamiento del vapor como fluido caloportador debemos tener en cuenta una serie de conceptos; el calor sensible es el calor que es necesario aportar al agua en fase líquida para subir de temperatura, mientras que el calor latente es el calor absorbido por esa misma agua en fase líquida, pero una vez ha alcanzado la temperatura de vaporización, a partir de la cual comienza el cambio de fase a vapor. Si se trabaja a la presión atmosférica, esa temperatura de vaporización es 100°C, sin embargo, cuando se aumenta la presión a la que se somete el agua, la su temperatura de vaporización también aumenta.

En un proceso en el que se utilice vapor saturado como fluido caloportador, debemos tener en cuenta que este cede el calor en forma de calor latente, por lo que una vez cedido todo el calor cambiará de fase a líquido saturado. [19]

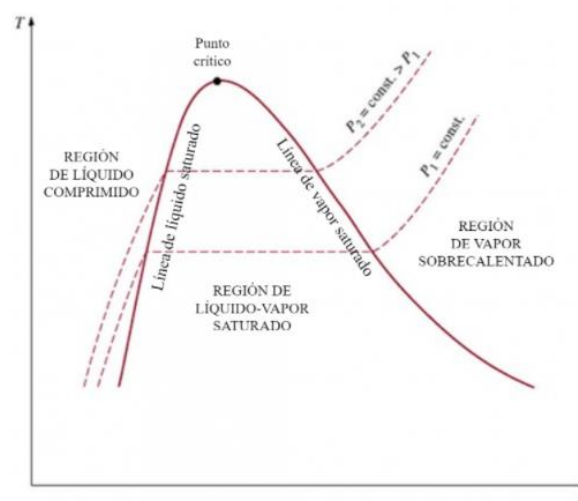


Ilustración 8. Diagrama T/v de una sustancia pura (agua). [20]

Por otro lado, para el correcto diseño y dimensionado de una instalación que trabaje con vapor, se debe tener en cuenta los grandes volúmenes que ocupa este vapor con respecto a su forma líquida, del orden de 1700 veces si

se aplica una presión atmosférica. Se deben instalar purgadores de vapor y de lodos bien seleccionados (las purgas siempre afectan negativamente a la eficiencia energética del sistema) y descalcificadores además de otros equipos según las condiciones de trabajo. Todos estos costes son limitaciones al uso del vapor que se suman a las relacionadas con la seguridad de la instalación por tratarse de un fluido gaseoso (mayores presiones presentan mayores riesgos); y que, pese a ellas sigue siendo una opción ampliamente utilizada en la industria.

La principal ventaja de un sistema de generación directa de vapor (Direct Steam Generator, DSG) que utilice agua/vapor es evitar el uso de intercambiadores de calor y sus pérdidas. Además de las altas temperaturas que se generan en los sistemas de captación, el uso de agua durante en el cambio de fase permite una importante reducción de la temperatura media a la que el calor es transferido al agua; que la transmisión de calor se produzca a una temperatura más baja mejora la eficiencia térmica. [21]

Como inconveniente, las ya mencionadas altísimas presiones a las que debe operar el sistema, factor que también influye de manera directa en la transmisión de calor de los equipos; cuanto mayor sean las presiones de trabajo más gruesas deberán ser las paredes de las tuberías, lo que dificulta la transmisión de calor a los equipos receptores.

Su punto de fusión es más bajo que el de cualquier otro fluido caloportador, por lo que se reduce la energía necesaria para mantener el agua en estado líquido. [22]

3.1.2 Aceites térmicos

El calentamiento a altas temperaturas es un proceso muy complejo por razones tanto económicas como prácticas; se utilizan sobre todo fluidos que tengan un bajo punto de fusión y un punto de ebullición y descomposición altos. El tradicional uso del vapor y agua sobrecalentada queda limitado por su temperatura máxima de ebullición y como se ha mencionado en el apartado anterior, la alta presión que se requiere en el circuito para poder mantener el fluido en la fase líquida (tuberías y otros equipos de gran espesor que elevan el coste). [23]

Es por ello por lo que la solución a este problema la ha facilitado el uso de aceites térmicos, los más utilizados en el sector industrial, capaces de alcanzar temperaturas muy elevadas, sin necesidad de cambiar de estado pues pueden trabajar a temperaturas de hasta 340°C sin presión, dada su baja presión de vapor, llegando incluso a los 400°C con presurizaciones no mayores de 10 bar.

Normalmente, cuando se trabaja a altas temperaturas de salida se obtiene un mejor rendimiento, sin embargo, a partir de esos 400°C, el aceite sufre una serie de reacciones de degradación aumentando su velocidad y originando hidrocarburos volátiles y pesados que alteran el proceso y el comportamiento de la planta. [24]

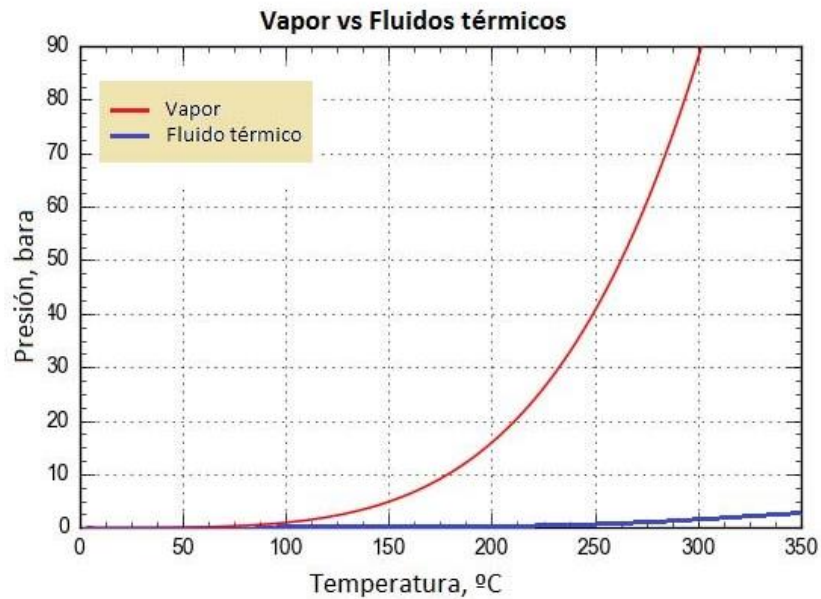


Ilustración 9. Gráfico P/T de vapor frente a fluidos. [25]

En esta Ilustración 9. comparativa, se puede ver como para alcanzar una temperatura de trabajo de 300°C, el vapor necesita una presión de 90 bar, mientras que los fluidos térmicos para la misma temperatura no requieren siquiera un 1 bar de presión.

Se eligen según la temperatura del proceso y las temperaturas de trabajo que recomienden los fabricantes. Deben tener un alto calor específico, un bajo precio de coste y una larga duración sin descomponerse. Por otro lado, no deben existir problemas de ignición ni de autoignición además de mantener la estabilidad térmica del fluido. Normalmente se oxidan con el contacto con el oxígeno a una alta temperatura, por lo que se suele proteger la instalación con una presurización con nitrógeno.

De la misma forma, suelen tener un olor aromático que facilite la detección de fugas en fase líquida y vapor, además de estar coloreados. La normativa dicta un control anual del propio fluido caloportador y de la instalación, donde si el porcentaje de descomposición del aceite supera el 15% o el 20% debe ser retirado y cambiado. [8]

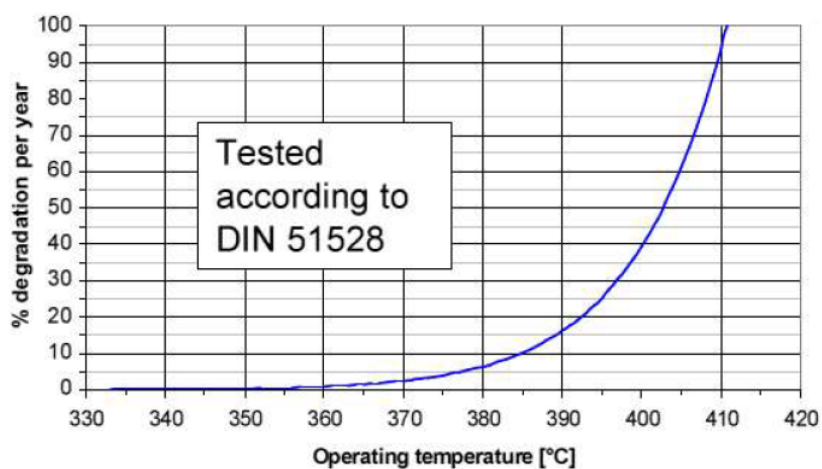


Ilustración 10. Gráfico % degradación por año frente a la temperatura de trabajo. [8]

El uso industrial de los aceites térmicos proporciona un mayor rendimiento y un importante ahorro económico debido principalmente a que las características de estos evitan la corrosión o formación de incrustaciones en las tuberías que los transportan[7]. Por otro lado, aunque el agua/vapor como fluido térmico siga siendo una opción válida y ampliamente utilizada, el uso de aceites térmicos evita toda la problemática relacionada el agua: descalcificación, desmineralización, corrección del Ph, purgas en caldera, etc... Así como todos los trabajos de mantenimiento relacionados con el vapor: reparación y sustitución de purgadores, fugas de vapor en la instalación y corrosión en consumidores, etc... [23] Todo ello, además de las altas prestaciones técnicas que poseen: gran estabilidad y uniformidad en las temperaturas finales en producto y costes de mantenimiento moderados, hacen de los aceites térmicos el fluido caloportador por excelencia en la actualidad.

Las principales características que definen a los diferentes aceites térmicos son las siguientes [26]:

- **Estabilidad térmica:** Los aceites deben ser estables dentro de los parámetros fijados por el fabricante, no pueden sufrir alteraciones en su composición por efecto del calor o el trabajo al que están siendo sometidos. De lo contrario, se producirían gases, residuos e impurezas que perjudicarían el proceso.
- **Oxidación:** Deben tener resistencia a la oxidación. Ésta se produce más rápidamente con la temperatura, provocando un aumento de la viscosidad y una pérdida de eficacia en la transferencia térmica.
- **Coefficiente de transferencia:** Deben tener un alto coeficiente de transferencia. A mayor coeficiente, mayor eficiencia.
- **Vida útil:** La vida útil de los aceites se puede aumentar con una correcta utilización y un buen diseño del sistema, así como con un buen mantenimiento y control de las características del aceite que se degrada con el uso.

La gran mayoría de los aceites térmicos tienen su origen en la destilación del petróleo. Los residuos restantes de este proceso se vuelven a destilar a mayor temperatura, lo que genera las bases minerales con las que se fabrican los aceites. Finalmente, se refinan añadiendo o eliminando compuestos, variando así las características del aceite. De esta forma y dependiendo de la base mineral obtenida en el proceso, los aceites térmicos pueden ser de tipo mineral o sintético (gama media y gama alta).

Los primeros proceden del refinado convencional del petróleo, están principalmente compuestos por hidrocarburos parafínicos y/o nafténicos a los que se les añaden aditivos para mejorar sus prestaciones, principalmente la viscosidad y la resistencia a la oxidación obteniendo así una elevada estabilidad (dentro del rango de operación); pueden llegar a alcanzar temperaturas de hasta 300°C. La principal ventaja de este tipo de aceites frente a los sintéticos es la económica, son más baratos debido a su alta disponibilidad y al degradarse no llegan a producir subproductos tóxicos. De la misma manera, como desventaja cabe destacar la inestabilidad térmica que poseen a elevadas temperaturas. [24]

Por otro lado, los aceites denominados sintéticos, provienen de una síntesis química diferente del refinado convencional y por ello poseen unas bases tratadas fisicoquímicamente, obteniendo mayor calidad y prestaciones en el productor final, sin necesidad de añadir aditivos. Consisten en estructuras a base de benceno e incluyen los óxidos de óxido de difenilo/bifenilo, difeniletanos, etc... estos aceites se aplican en procesos con temperaturas de hasta 400°C, a partir de ahí es necesario el uso de sales o metales fundidos. [26]

La siguiente Tabla 2. muestra una pequeña comparación entre estos dos tipos de aceites térmicos (los sintéticos se dividen en media y alta gama) en los principales criterios de elección.

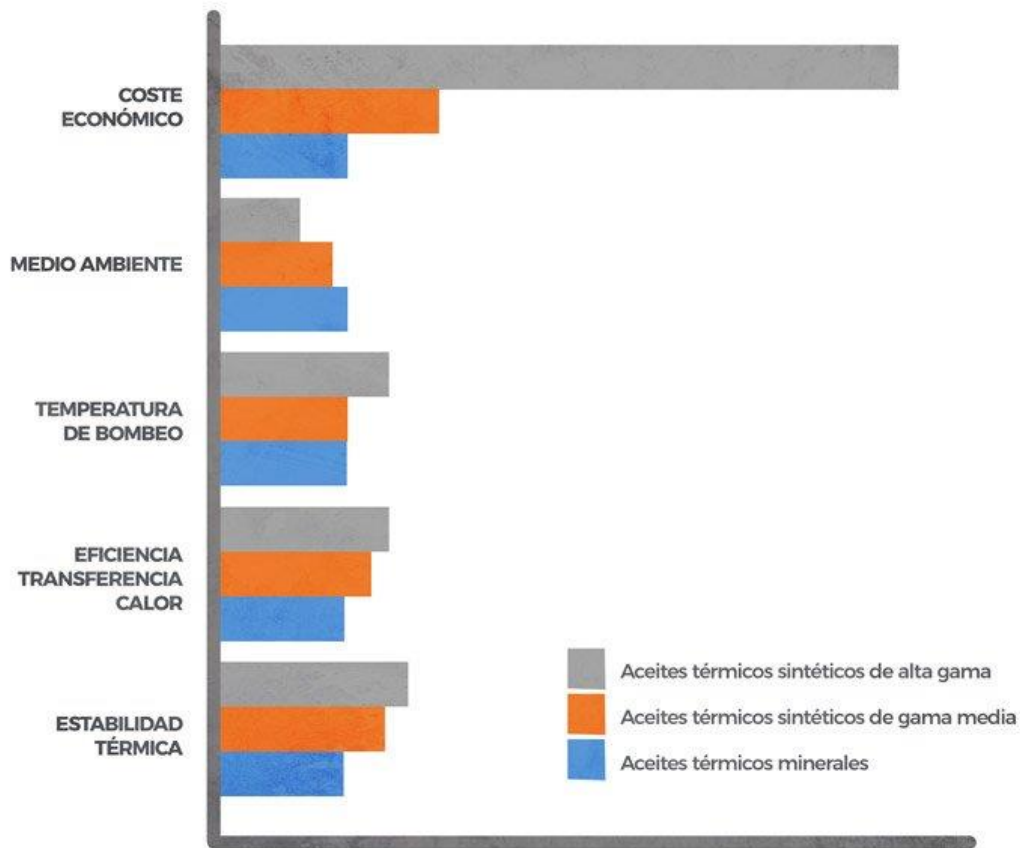


Tabla 2. Comparativa principales criterios de selección entre aceites térmicos sintéticos y minerales. [25]

A partir de la Tabla 2. se puede determinar rápidamente que los aceites térmicos sintéticos de gama alta son los de mayor coste además de los menos respetuosos con el medio ambiente; igualmente precisan de temperaturas de bombeo más elevadas, y tienen una mayor transferencia de calor y estabilidad térmica. Por otro lado, los aceites térmicos minerales son más baratos y respetuosos con el medio, sin embargo, tienen menor estabilidad térmica, así como una menor transferencia de calor [25] Los aceites térmicos sintéticos de gama media tienen en todos los criterios valores intermedios.

También existen aceites térmicos con base en silicona, tienen el rango de temperatura de operación más alto respecto a los otros tipos de aceite. Se caracterizan por ser prácticamente inodoros y con muy baja toxicidad, destacar su baja degradación lo que le permite tener una vida útil de hasta 10 años solo reponiendo las pérdidas debido al uso y reduciendo así el coste de mantenimiento. [24]

3.1.2.1 Aceites térmicos minerales

Normalmente para los aceites térmicos minerales el fabricante recomienda su uso en sistemas que dispongan de una circulación forzada. Los sistemas que dependen del fluido caloportador no proporcionan un flujo lo suficientemente rápido que pueda evitar el sobrecalentamiento local y el rápido deterioro de los aceites minerales. Igualmente, no deberían usarse en sistemas abiertos donde el aceite caliente este en contacto directo

con el aire. [27]

Entre los principales aceites térmicos de origen mineral, cabe destacar Xceltherm 600 o Mobiltherm 603.

Xceltherm 600 es un aceite térmico mineral con una temperatura máxima de operación de 315°C, y cuyas propiedades térmicas se muestran en la siguiente Ilustración 11.

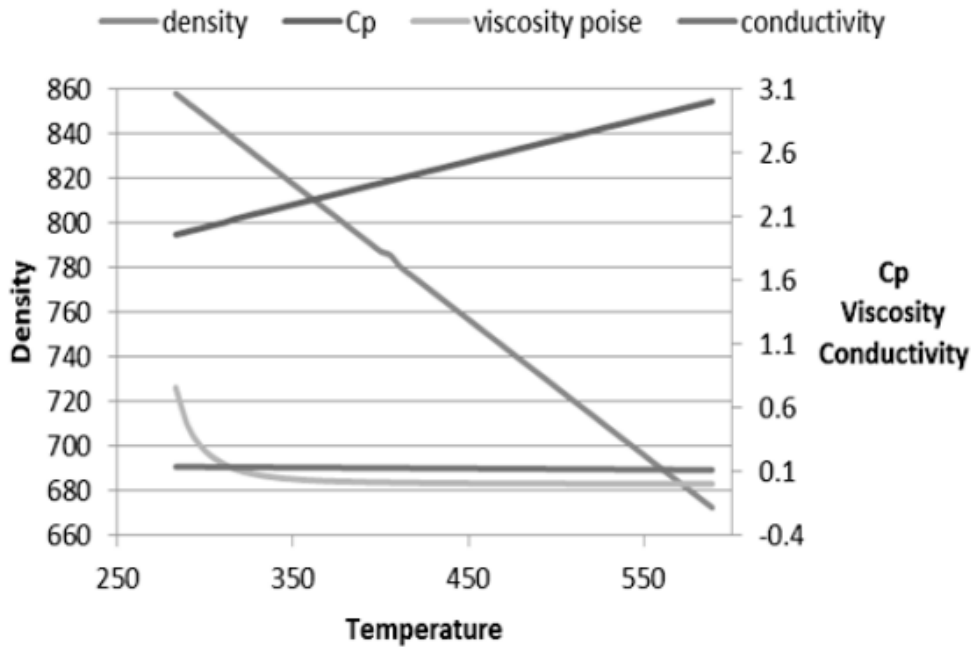


Ilustración 11. Principales propiedades Xceltherm 600 (temperatura en K). [28]

3.1.2.2 Aceites térmicos sintéticos

Como ya se ha mencionado, normalmente, la máxima temperatura que alcanzan los aceites sintéticos en ciclos termodinámicos suele estar en torno a los 400°C obteniendo una eficiencia de aproximadamente un 38%. Cuando se supera dicha temperatura se empieza a producir hidrógeno en el seno del fluido térmico debido a la rápida degradación de los hidrocarburos, provocando grandes pérdidas de calor y convirtiéndolo en un fluido no apto. [29] A continuación, se hará un análisis de los principales aceites sintéticos usados en la industria. Entre ellos destacan los modelos del fabricante Therminol VP-1, 66 y 75; así como Dowtherm A.

El Therminol VP-1 es una mezcla eutéctica de óxido de difenilo y bifenol, un aceite con una alta estabilidad térmica, pues su temperatura en estado líquido va desde los 12°C hasta los 400°C, además de poseer una muy baja viscosidad lo que facilita su circulación por el interior de las tuberías; sin embargo, es posible que precise de observación y mantenimiento en climas fríos para evitar problemas de operación. [30], [31] Debido a su composición, a temperaturas muy altas suele tener grandes pérdidas de calor, por lo que no es el mejor absorbedor. [32] Sin embargo, esto no es una desventaja ya que cuanto menor sea la temperatura de entrada del fluido, mayor será la eficiencia del intercambiador.

Therminol VP-1

$$c_p = 2.82 T + 716$$

$$\lambda = 1.73 \cdot 10^{-7} T^2 + 7.62 \cdot 10^{-6} T + 0.14$$

$$\rho = -7.61 \cdot 10^{-4} T^2 - 2.24 \cdot 10^{-1} + 1191$$

$$\mu = (-2.3 \cdot 10^{-5} T^3 + 5.61 \cdot 10^{-3} T^2 - 19.89 T + 1822)^{-1}$$

Ecuaciones 4. Correlaciones de las propiedades termo-físicas de Therminol VP-1 en función de la temperatura $285 \text{ K} < T < 673 \text{ K}$ [33].

Desde el punto de vista económico, una CSP solo se mide por la cantidad de electricidad capaz de producir, de forma que los recursos que no estén destinados a la propia producción de energía se consideran un gasto; de forma que Therminol VP-1 es una opción muy válida para diseños termosolares, en concreto los que utilicen discos parabólicos, ya que absorbe el calor suficiente para la producción de electricidad a la vez que garantiza estabilidad y seguridad gracias a sus pérdidas.

Por otro lado, del mismo fabricante, Therminol 75 [34] destaca por una gran estabilidad térmica y ser capaz de ofrecer un coeficiente de transmisión igual o superior que otros HTF en el mismo rango de operación. Debido a su bajo punto de ebullición, 343°C , genera muy poco vapor de presión por encima de la atmosférica, lo que significa que es excelente para operar a presiones bajas. Su rango de temperatura comprende desde los 80°C hasta los 385°C . Destaca también que no es corrosivo a los materiales con los que comúnmente se fabrican las tuberías.

Therminol 66 es sin duda el aceite sintético más utilizado en los procesos industriales, capaz de trabajar en condiciones óptimas en la mayoría de las aplicaciones. Opera hasta los 345°C , aportando una gran estabilidad térmica y una baja presión de vapor,

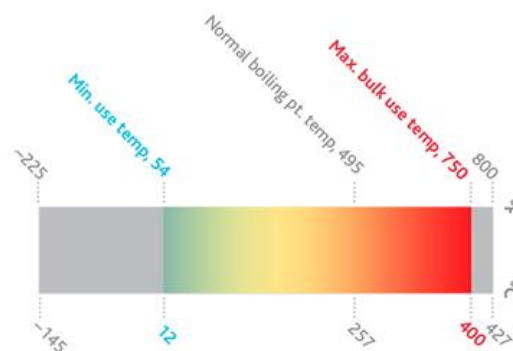


Ilustración 12. Rango operación Therminol VP-1 [31]

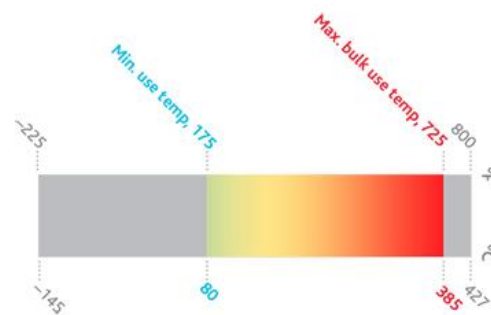


Ilustración 13. Rango operación Therminol 75

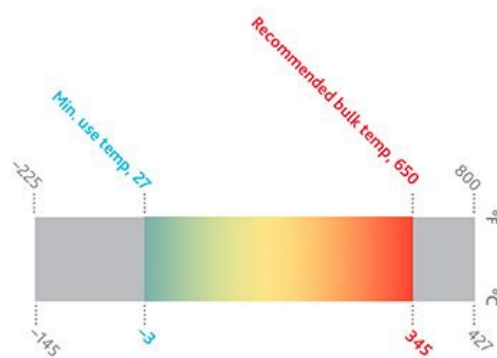
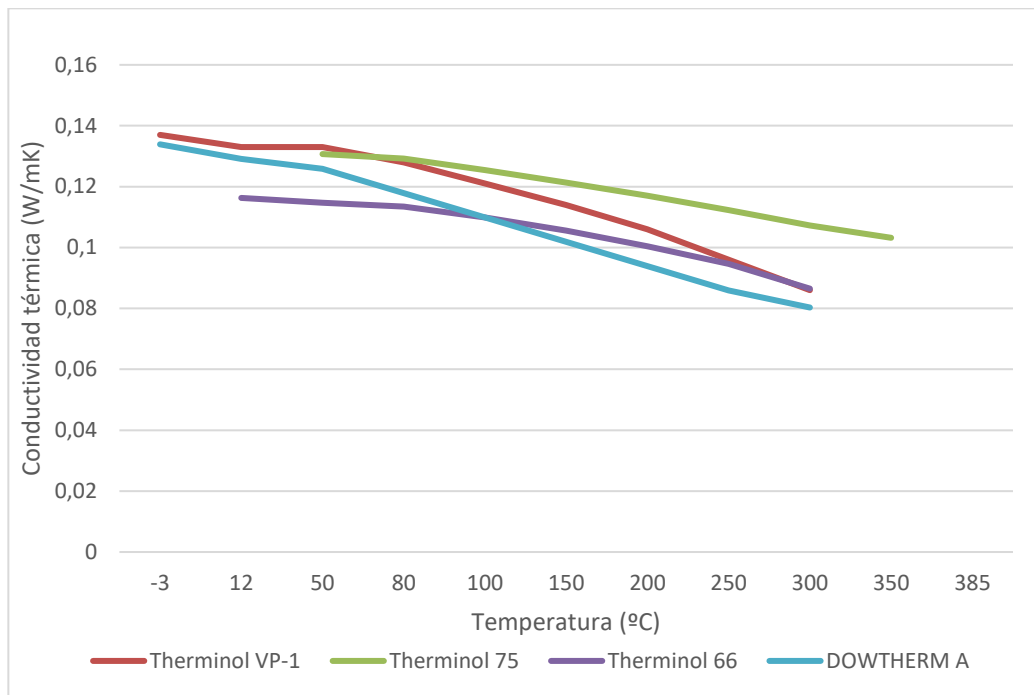


Ilustración 14. Rango operación Therminol 66 [35]

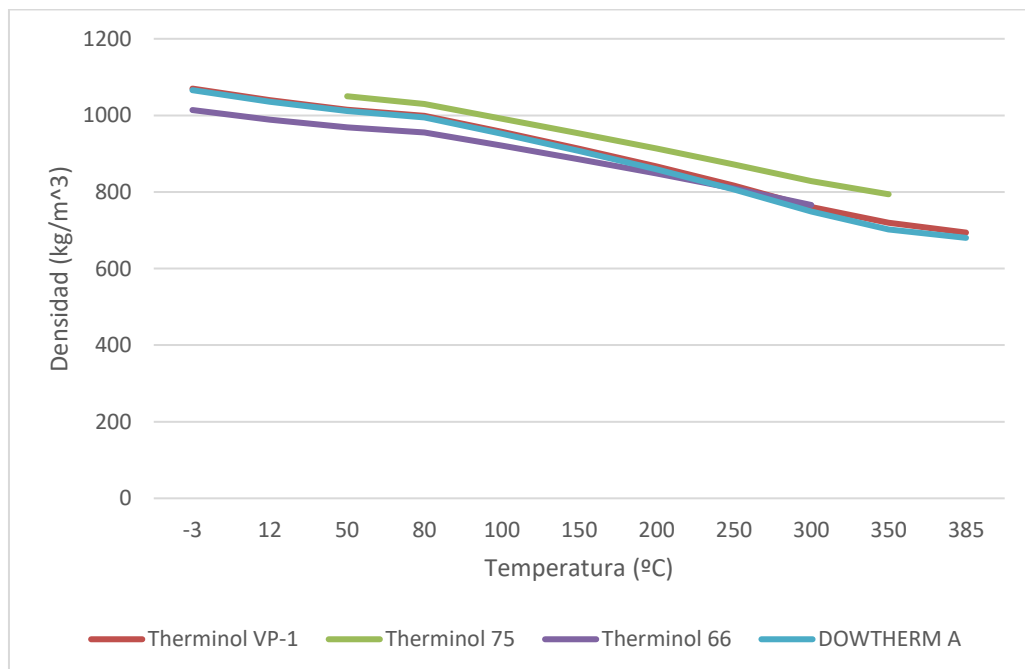
También cabe destacar Dowtherm A, un aceite térmico sintético de mezcla eutéctica formado por dos compuestos orgánicos muy estables, bifenilo y óxido de difenilo; ambos trabajan prácticamente a las mismas presiones de vapor por lo que a estos efectos se puede considerar un solo compuesto, y su rango de presión es de atmosférico a 10,6 bar.

Puede operar tanto en fase gaseosa como líquida, aunque posee una alta presión de vapor, por lo que el sistema deberá estar presurizado. Su rango de temperatura de operación va desde los 15°C hasta los 400°C. Por otro lado, su baja viscosidad durante todo el rango de operación garantiza la eficiencia de la transmisión del calor y minimiza los problemas de bombeo [36]. No se descompone fácilmente a altas temperaturas y al ser una mezcla eutéctica es muy estable en su punto de solidificación comparado con otros componentes independientes.

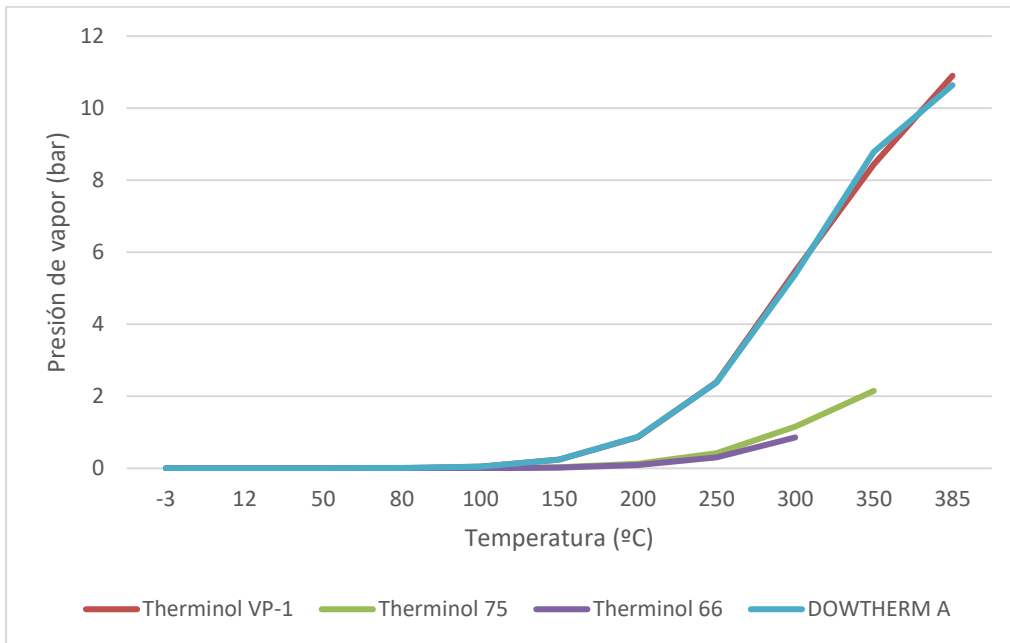
Las Tablas 3 a 6. Muestran gráficos comparativos de las principales propiedades termodinámicas de los cuatro tipos de aceites térmicos mencionados. Todos estos fluidos presentan en valores aproximados en las gráficas, donde la mayor diferencia se puede encontrar en la Tabla 5, que representa la presión de vapor en función de la temperatura de cada fluido, aunque todas las curvas muestran tendencias crecientes con la temperatura, Therminol VP-1 y Dowtherm A alcanzan valores más altos de esta presión de vapor.



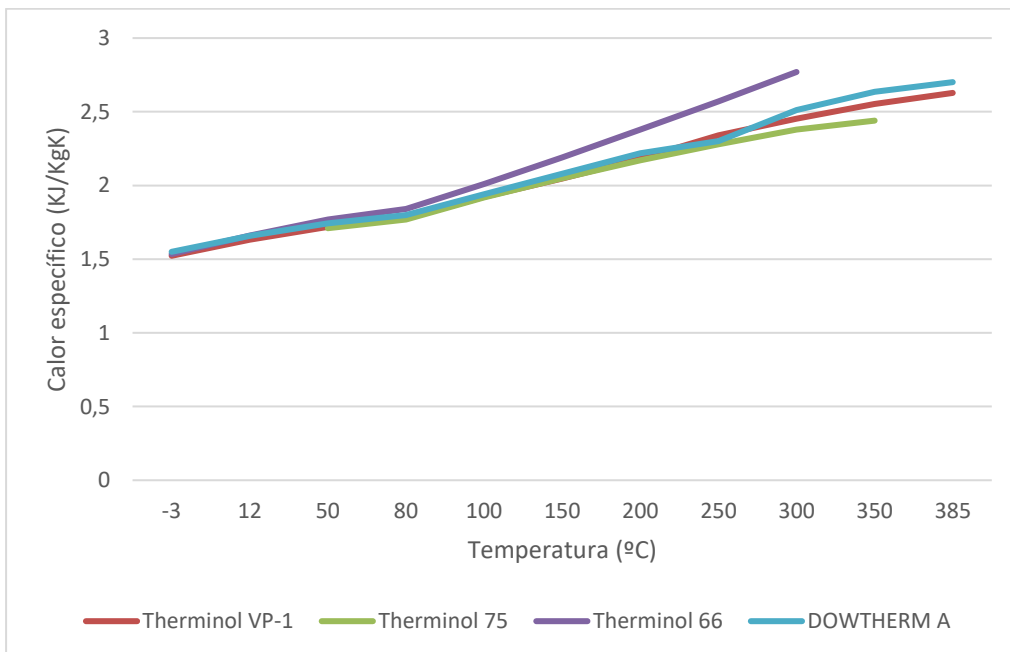
Gráfica 1. Conductividad térmica de los aceites térmicos sintéticos en función de la temperatura.



Gráfica 2. Densidad de los aceites térmicos sintéticos en función de la temperatura.



Gráfica 3. Presión de vapor de los aceites térmicos sintéticos en función de la temperatura.



Gráfica 4. Calor específico de los aceites térmicos sintéticos en función de la temperatura.

3.1.2.3 Aceites térmicos con base de silicona

En los últimos años, están ganando popularidad los aceites térmicos con base de silicona como HTF; entre ellos especialmente la serie Helisol, del fabricante Wacker. Son fluidos de silicona altamente estables capaces de proporcionar grandes beneficios económicos a las plantas ya que cuentan con una gran eficiencia de operación, no necesitan de grandes niveles de mantenimiento además de garantizar un control preciso de la temperatura.

Debido a su estructura química basada en silicona, estos fluidos ofrecen una gran versatilidad con un rango de temperatura de operación que va desde los -40°C hasta los 425°C , que los distingue de los materiales orgánicos. [37]

Entre las principales ventajas a destacar de estos fluidos HTF, hay que destacar su estabilidad térmica incluso por encima de los 400°C de la que se puede esperar muchos años de funcionamiento confiable, así como su punto de congelación excepcionalmente bajo, de hasta -65°C , comparado con otros HTF que hace que no necesite sistemas de anticongelante en los procesos. No son tóxicos, y por lo general los fluidos con base de silicona no generan ensuciamiento en los equipos ni forman sólidos.

De ellos, el fluido caloportador con base de silicona Helisol 5A, es el más interesante. Objeto de estudio por numerosos artículos, comparándolo con las clásicas mezclas eutécticas de bifenilo (BP) y óxido de difenilo (DPO), es decir, los aceites térmicos sintéticos que son actualmente los fluidos más importantes en CSP. Están comparaciones posicionan normalmente la elección de fluidos térmicos con base de silicona antes que los sintéticos. [38]

En uno de esos estudios anteriormente mencionados, se quiso comprobar la degradación que tendrían tanto los aceites con base DPO/BP como el aceite Helisol 5A. En el experimento ambos fluidos se expusieron a una temperatura de 465°C durante 10 días, y como resultado los fluidos DPO/BP sufrieron una descomposición considerable mientras que Helisol 5A apenas sufrió consecuencias; lo que confirma la gran resistencia de los fluidos con base de silicona a altas temperaturas.



Ilustración 15. Comparación DBO/BP y Helisol 5A después de 10 días a 465°C [38]

La formación de gases tóxicos, y la degradación del compuesto por debajo del punto de ebullición para Helisol 5A se determinó a 425°C durante 115 días y se comparó con aceites DPO/BP a 400°C . Estos últimos formaron cada vez más gases permanentes como hidrógeno, metano o monóxido de carbono a medida que pasaba el tiempo. En el caso del Helisol 5A la formación tanto de metano como de monóxido de carbono también aumentaba conforme el tiempo; sin embargo, en cuanto a la formación de hidrógeno, al principio del ensayo era mayor para el Helisol 5A a 425°C que para aceites DPO/DP a 400°C hasta que llega un punto, alrededor de las 1340 horas de uso, en la que la formación de hidrógeno crece mucho más rápido en aceites DPO/BP.

Como se muestra en la siguiente gráfica, con el paso del tiempo Helisol 5A forma considerablemente menos hidrógeno:

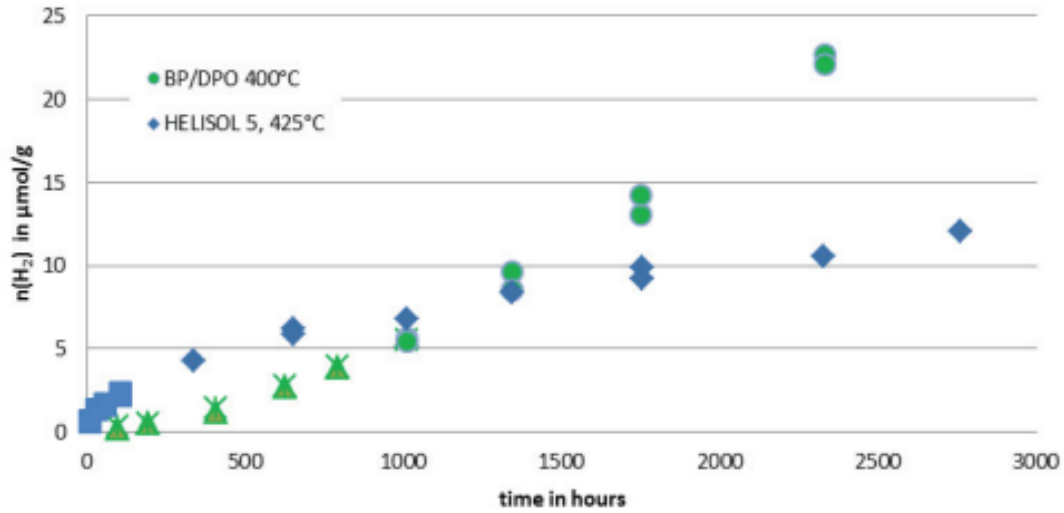


Ilustración 16. Formación de hidrógeno en DPO/BP a 400°C (verde) y en Helisol 5 a 425°C (azul) [38]

Finalmente, se muestran las principales propiedades del aceite térmico Helisol 5A en función de la temperatura, a saber; densidad, calor específico y viscosidad:

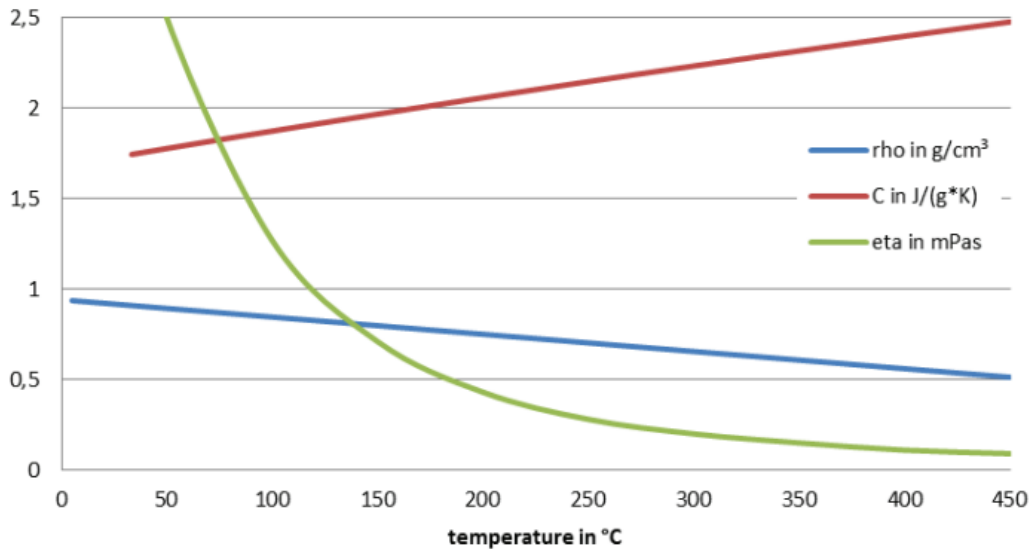
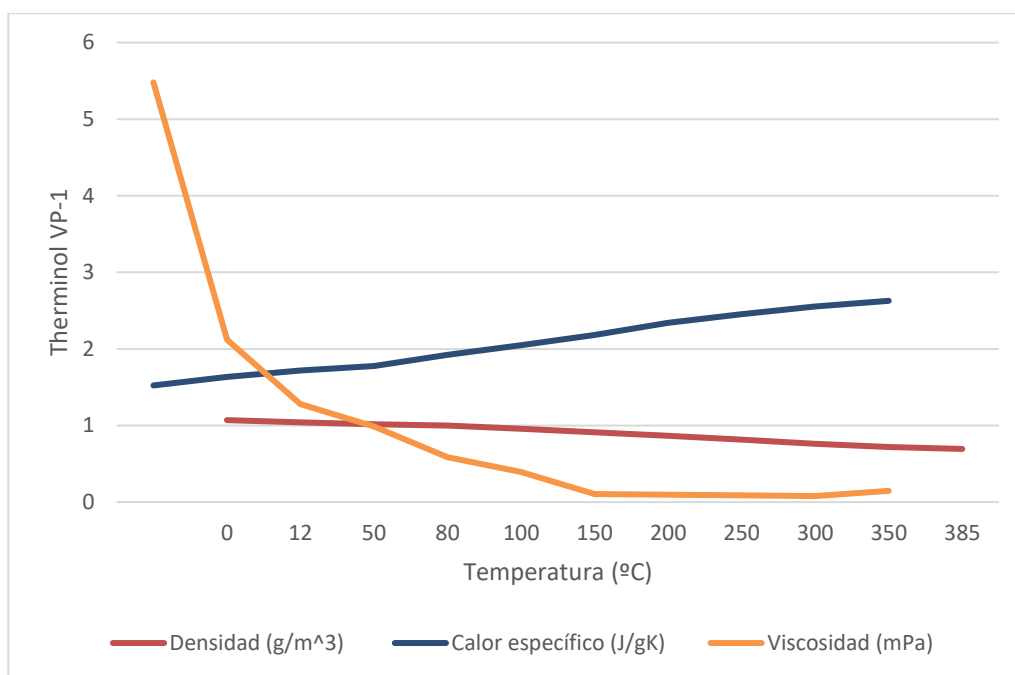


Ilustración 17. Propiedades de Helisol 5A en función de la temperatura (azul: densidad; rojo: calor específico; verde: viscosidad) [38]

A continuación, se muestra una gráfica representando las mismas propiedades térmicas, esta vez correspondientes al aceite térmico sintético Therminol VP-1, a modo de comparativa con el aceite Helisol 5A.

Se puede apreciar como durante todo el rango de temperaturas la densidad del Helisol 5A mantiene valores algo más bajos que el aceite sintético. De igual forma, los datos del calor específico del aceite con base en silicona son mayores que los de Therminol VP-1 para las mismas temperaturas. La mayor diferencia entre ambos aceites se encuentra en la viscosidad, donde ambos siguen tendencias parecidas sin embargo se llega a parámetros más cercanos a cero en el Therminol VP-1 con temperaturas más bajas, a partir de los 150°C; a esta misma temperatura el Helisol 5A aún tiene una viscosidad algo superior a los 0,5 mPas.



Gráfica 5. Propiedades de Therminol VP-1 en función de la temperatura (rojo: densidad; azul: calor específico; naranja: viscosidad)

3.1.3 Sales fundidas

Como ya se ha mencionado anteriormente, las sales fundidas se comportan como excelentes fluidos caloportadores debido a su estabilidad térmica a altas temperaturas (generalmente, mayores de 500°C). Una de las grandes ventajas de trabajar con sales fundidas en sistemas CSP de torre central es sin duda su capacidad para almacenar energía térmica [29]. Estos tienen una eficiencia anual del 99% ya que las únicas pérdidas térmicas que se producen vienen de [39]:

- La lentísima pérdida de calor a través de las paredes de los tanques de almacenamiento, que se puede incluso minimizar por medio de aislamiento.
- En el proceso de transmisión de calor en los equipos de intercambio térmico, principalmente de la sal fundida al vapor.

Cuando ese vapor es convertido en electricidad, la eficiencia del ciclo en el bloque de potencia (ciclo Rankine) para un sistema de recalentamiento a 540°C y 100 bar es del 38%. Al igual que con cualquier planta de producción térmica (incluidos gas y carbón), la conversión de calor en electricidad produce las mayores pérdidas de energía en todo el sistema, sin embargo, con un sistema de almacenamiento térmico, la energía es almacenada en forma de calor previa conversión a electricidad en un ciclo Rankine, por lo que las pérdidas del proceso de conversión no afectan a la eficiencia del almacenamiento. [39]

De igual forma, como el sistema de generación de energía es completamente independiente del sistema de captación, se puede seguir produciendo la potencia demandada por la planta, independientemente de si el sol brilla de forma completa o parcial, o incluso de si está nublado o es de noche; siempre y cuando haya suficiente energía almacenada en los tanques. El campo de heliostatos de la planta normalmente está sobredimensionado para permitir el almacenamiento completo de los tanques durante el día al mismo tiempo que se genera electricidad.

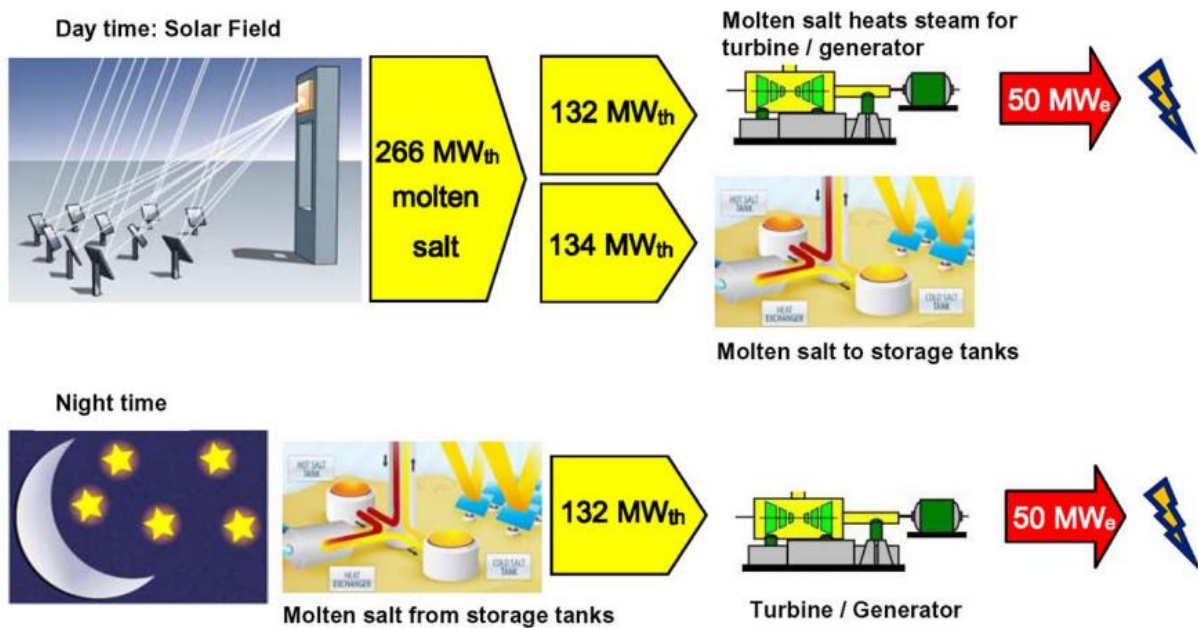


Ilustración 18. Generación de electricidad durante el día y la noche en una planta CSP de torre central con almacenamiento térmico. [39]

En cuanto al principio de almacenamiento, si la sal fundida es el medio de transferencia de calor, el sistema de almacenamiento está directamente integrado en el ciclo de los medios de transferencia de calor se denomina sistema directo con sales fundidas, en el caso de otros medios, se usa un ciclo con sistema de almacenamiento externo, sistema indirecto con sales fundidas.[40]

El sistema de almacenamiento directo con sales fundidas consta de dos tanques de almacenamiento integrados directamente en el ciclo de las sales fundidas de la central. Existe un tanque caliente que almacena la sal caliente a unos 565°C, y el tanque frío que almacena la sal "fría" a 290°C. En condiciones normales de funcionamiento hay un flujo constante de entrada y salida de ambos tanques. Por la noche el ciclo de las sales fundidas sigue operando, aunque no se transmite calor desde el receptor a las sales fundidas frías. La sal fundida del tanque caliente se usa para mantener el funcionamiento la producción de vapor, mientras la sal fría sustituye la sal caliente extraída del tanque caliente. [40]

El sistema de almacenamiento indirecto con sales fundidas no se integra de forma directa al ciclo de transferencia de calor. Igualmente, se equipa con dos tanques de almacenamiento para la sal provistos de bombas. Los tanques están conectados por una tubería que contiene diversos intercambiadores de calor. Estos transfieren el calor desde el medio de transferencia de calor, el fluido caloportador, hacia las sales fundidas o viceversa. [40]

Algunos estudios han desvelado que la mayor parte de los costes de una planta de CSP con almacenamiento térmico de tanques en sales fundidas se destina al propio fluido caloportador, sales fundidas en este caso y al sistema de almacenamiento. La Ilustración 19. muestra la distribución de los costes de una planta CSP de estas características.

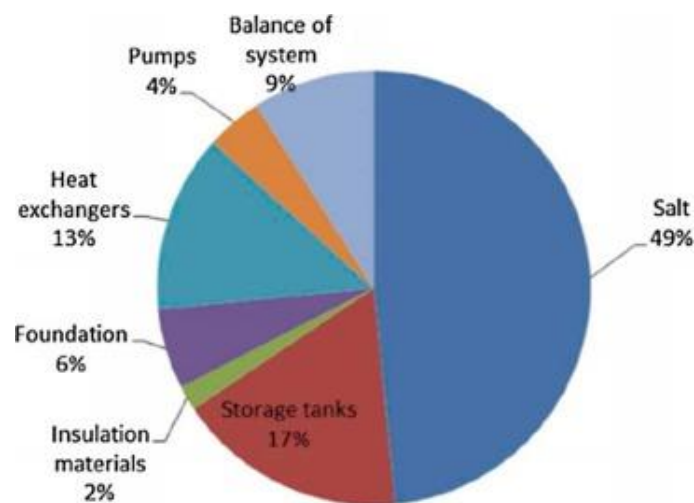


Ilustración 19. Distribución costes planta CSP con almacenamiento en sales fundidas. [41]

En 1996, en EE. UU. se creó la primera planta (Solar Two) que trabajaba con sales fundidas tanto como fluido caloportador, así como sistema de almacenamiento térmico. Tenía una potencia de 10MWe y capacidad para almacenar calor durante unas 3 horas, el éxito de la planta garantizó la comercialización de los sistemas de torre central en el mundo, dando como resultado la instalación de la segunda planta de estas características y la primera con fines comerciales en Sevilla (España); Gemasolar, con una capacidad de 17MWe y un tiempo de almacenamiento de 15 horas, utilizando una sal fundida formada por una mezcla eutéctica de NaNO_3 y KNO_3 . [2]



Ilustración 20. Planta CSP de Gemasolar [42]

Entre las principales sales destacan los fluoruros, bromuros, nitratos y determinadas sales orgánicas. Para unas temperaturas de entre 350°C y 400°C la principal ventaja de las sales fundidas frente a los aceites térmicos es que el aumento de la presión de vapor es prácticamente despreciable, mientras que los aceites para temperaturas cercanas necesitan unas presiones del orden de 10-12 bar, lo que supone mayores costes.

A partir de 400°C y hasta los 550°C las sales fundidas son el fluido caloportador más adecuado; hasta 650°C se utilizan los metales fundidos. Un inconveniente a tener en cuenta respecto a estos fluidos es que tanto las sales como los metales fundidos tienen un punto de congelación muy elevado, es decir, son sólidos hasta unas temperaturas cercanas a los 150°C , por lo que es necesario instalar sistemas de calefacción auxiliares para los equipos y evitar que estos congelen.

Existen infinidad de tipos de sales (fluoratos, carbonatos, nitratos, etc...) que poseen buenas propiedades de transferencia de calor; por lo que también tienen un amplio abanico de propiedades [43] En condiciones de funcionamiento estas mezclas de sales son líquidas y ofrecen ciertas ventajas como una baja viscosidad, una elevada capacidad y estabilidad térmica además de la baja toxicidad y un funcionamiento sin presión, así como una tolerancia a la corrosión.

Existe además una gran seguridad operativa gracias a los sistemas de auto vaciado. Si es necesario se podrán adaptar también módulos de refrigeración que enfríen a la temperatura exacta cercana al punto de solidificación. De esta forma, se puede llevar a cabo un sistema de regulación de temperatura con un rango de temperatura de trabajo único, con otros fluidos caloportadores esto no es posible. [44]

Para algunas aplicaciones, propiedades como el punto de fusión son determinantes y la utilización de mezclas de diferentes composiciones hace que las propiedades de estos materiales puedan ser ajustables. Como ejemplo, una composición ampliamente usada en la industria es la mezcla de nitrato de potasio y nitrato de sodio (sal solar) con un punto de fusión de 221°C y un punto de congelación de 238°C , lo que reduce el punto de fusión en más de 100°C con respecto a los componentes puros.

Molten salts	Reviewed fluids	Applications
Carbonates and mixtures	Li_2CO_3 , Na_2CO_3 , K_2CO_3 , $\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3$, $\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3$ (binary eutectics) and $\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3$ (ternary eutectic)	High temperature energy storage, oxidants
Fluorides and mixtures	LiF , NaF , KF , LiF-BeF_2 ("FLibe") and LiF-NaF-KF ("FLiNaK")	High temperature energy storage, coolants
Nitrates and mixtures	LiNO_3 , NaNO_3 , KNO_3 , $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ ("Solar Salt") $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_2$ (ternary eutectic or HITEC®) and quaternary mixtures	Heat transfer, thermal energy storage

Ilustración 21. Sales fundidas de alta temperatura. [43]

Como ya se ha mencionado, los puntos de fusión/congelación son las propiedades que más determinan el uso de un fluido caloportador, en este caso de las sales fundidas, ya que marcan la temperatura más baja a la que se puede trabajar con dicho fluido en estado líquido. Por otro lado, otras propiedades a tener en cuenta para aplicaciones de energía térmica son, densidad, viscosidad, capacidad térmica y conductividad térmica. Estas propiedades afectan al cálculo de los números adimensionales como Reynolds y Prandtl, que de igual manera afectan al dimensionamiento de los equipos (intercambiadores, bombas) y al tamaño de las tuberías.

3.1.3.1 Sal Solar

La sal solar es una de las sales fundidas más utilizadas en los sistemas CSP. Esta mezcla de sal binaria está compuesta en un 60% por NaNO_3 y en un 40% por KNO_3 . Tiene una temperatura de fusión de 223°C y se mantiene térmicamente estable hasta alcanzar los 600°C . Para esta sal solar existe un margen de seguridad en la temperatura mínima para evitar así la congelación, ese margen es de unos 30°C [45]. Después de varios estudios que notificaban problemas de corrosión de esta sal solar con diferentes aleaciones, quedó demostrado que las aleaciones de níquel que contengan un 15-20% de contenido en cromo tienen una mejor actuación; frente a las aleaciones de acero que presentaban una baja resistencia a la corrosión a altas temperaturas. [17]

Sal Solar

$$c_p = 1443 + 0.172 (T - 273.15)$$

$$\lambda = 0.443 + 1.9 \cdot 10^{-4} (T - 273.15)$$

$$\rho = 2090 - 0.636 (T - 273.15)$$

$$\mu = 2.2714 \cdot 10^{-2} - 1.2 \cdot 10^{-4} (T - 273.15) + 2.281 \cdot 10^{-7} (T - 273.15)^2 - 1.474 \cdot 10^{-10} (T - 273.15)^3$$

Ecuaciones 5. Correlaciones de las propiedades termo-físicas de la Sal Solar en función de la temperatura

533 K < T < 873 K. [33]

Este tipo de sal fundida presenta importantes ventajas como fluido de almacenamiento; como son su alta

densidad, alta capacidad calorífica, elevada temperatura de descomposición y coste competitivo [46] Por otro lado, sus propiedades fisicoquímicas hacen que sea adecuada para su uso como fluido de almacenamiento térmico en tanques de grandes dimensiones. Gracias a estas propiedades, existe la posibilidad de trabajar a altas temperaturas.

3.1.3.2 Hitec

Hitec es una mezcla ternaria de alcalino-nitratos/nitratos (7% NaNO_3 , 53% KNO_3 , 40% NaNO_2) y es ampliamente utilizada como fluido caloportador y como material de almacenamiento térmico en sistemas CSP. La principal ventaja de Hitec es su punto de fusión, 142°C , mucho más bajo que el de la sal solar. La estabilidad térmica de esta sal fundida ha sido estudiada por diferentes estudios, cuyos resultados se representan en la siguiente Ilustración 22.

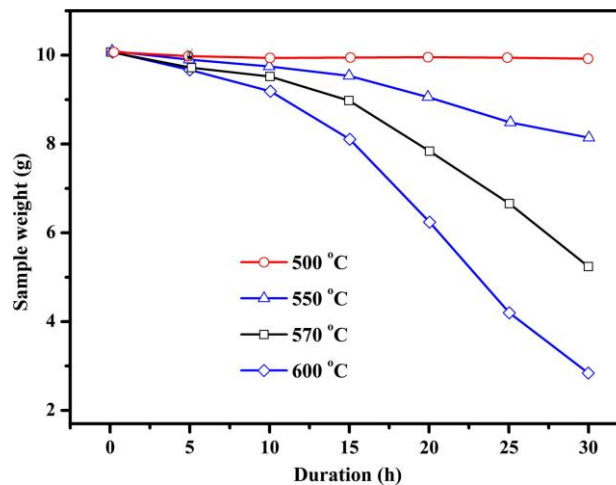


Ilustración 22. Estabilidad térmica de la sal fundida Hitec a varias temperaturas en función del tiempo de duración. [2]

Como se puede apreciar esta composición solo se mantiene estable en el tiempo a temperaturas por debajo de los 500°C . Sin embargo, esta estabilidad puede alcanzar valores de hasta 535°C añadiendo los aditivos apropiados a la mezcla.

De igual manera, Hitec tiene buenos resultados en cuanto al flujo, pues tiene una viscosidad parecida a la del agua a altas temperaturas además de una conductividad térmica que es prácticamente el doble que en los fluidos caloportadores de tipo orgánico. En cuanto a ratios de corrosión de aleaciones metálicas en contacto con sal Hitec se ha demostrado, que los aceros inoxidable no muestran daños ni efectos de corrosión.

Hitec

$$c_p = 1560$$

$$\lambda = 0.441 + 4.46 \cdot 10^{-4} (T - 273.15) - 1.54 \cdot 10^{-6} (T - 273.15)^2$$

$$\rho = -0.74 (T - 273.25) + 2084$$

$$\mu = 10^{2.7374} (T - 273.15)^{-2.104}$$

Ecuaciones 6. Correlaciones de las propiedades termo-físicas de la sal Hitec en función de la temperatura

$$415 \text{ K} < T < 808 \text{ K. [33]}$$

La siguiente Ilustración 26. muestra las diferentes propiedades termo-físicas de Hitec; a partir del análisis de la gráfica se puede apreciar como la viscosidad de Hitec aumenta en rangos de temperaturas bajas (150°C – 300°C), lo que conlleva números de Prandtl muy altos, por encima de 7. Como consecuencia de un mayor número de Prandtl en el fluido, aumenta la velocidad de la capa límite mejorando así la propia transferencia de calor en los tubos. Conforme la temperatura aumenta (300°C – 500°C) la viscosidad se reduce drásticamente. [47]

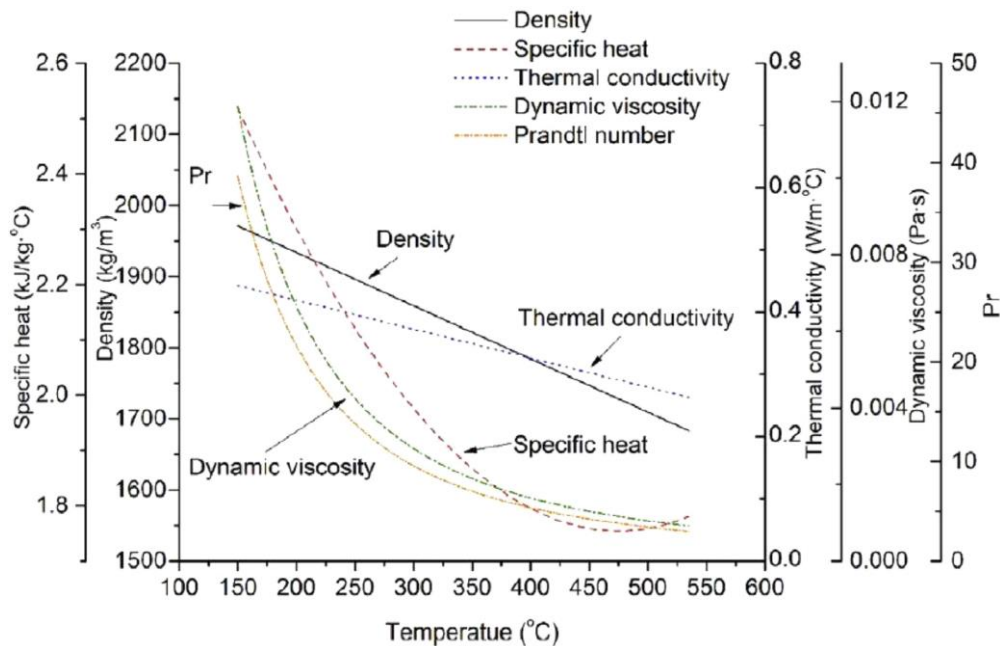


Ilustración 23. Propiedades termo-físicas de la sal fundida Hitec. [47]

3.1.3.3 Hitec XL

Hitec XL es una mezcla ternaria de sodio, potasio y nitratos de calcio, cuya composición es 7% de NaNO_3 , 45% de KNO_3 y 48% de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. La principal ventaja de este compuesto es que su punto de fusión se sitúa en los 120°C muy por debajo de otras sales fundidas como la sal solar (220°C) y Hitec (142°C). Los problemas relacionados con la congelación se pueden paliar más fácilmente cuanto menor sea el punto de fusión. Sin embargo, el límite de la estabilidad térmica de la mezcla es de unos 500°C, por debajo de las sales antes mencionadas.

Hitec XL puede emplearse tanto como fluido HTF como fluido de almacenamiento térmico debido a su alta estabilidad y bajo precio.

Hitec XL

$$c_p = -0.33 T + 1634$$

$$\lambda = 0.519$$

$$\rho = 2240 - 0.827 (T - 273.15)$$

$$\mu = 10^{6.1474} (T - 273.15)^{-3.36406}$$

Ecuaciones 7. Correlaciones de las propiedades termo-físicas de la sal Hitec XL en función de la temperatura 403 K < T < 823 K. [33]

La Ilustración 24.a muestra como la curva de calor específico de este compuesto en el rango de 50 - 68°C se mantiene estable independientemente del aumento de la temperatura. Sin embargo, en la Ilustración 24.b el calor específico en la fase líquida de la mezcla aumenta al aumentar la temperatura, dejando evidencias de su sensibilidad para con la temperatura.

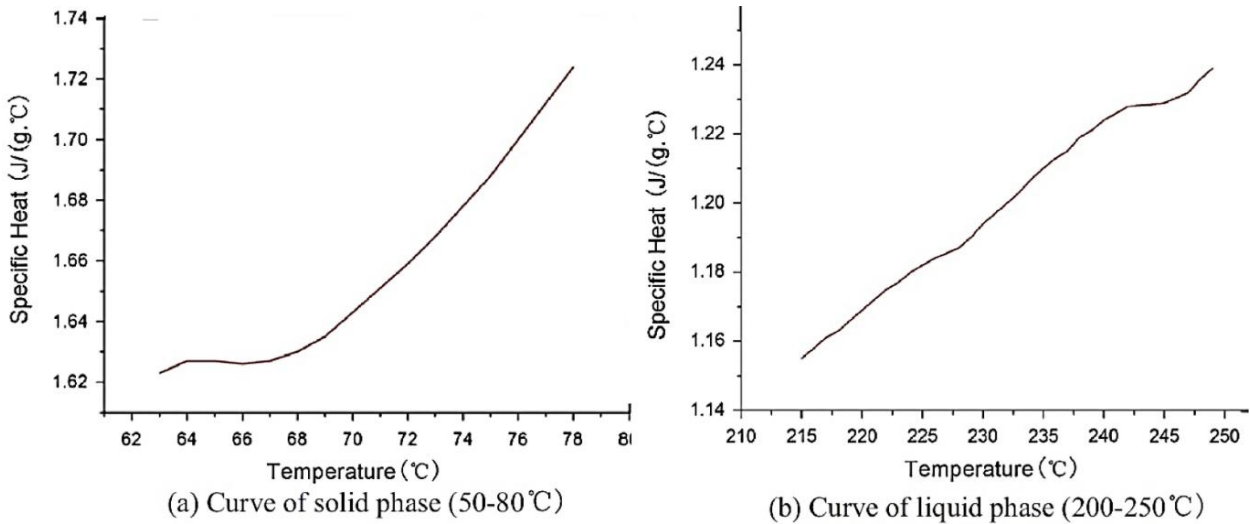


Ilustración 24. Curvas del calor específico de Hitec XL en función de la temperatura. [47]

Finalmente, en la Ilustración 25. se puede ver que para las tres sales fundidas que se han mencionado anteriormente los valores del coeficiente de transmisión de calor son bastante parecidos, donde la sal solar se muestra algo mejor a bajas temperaturas que la sal Hitec. Por lo que en muchos casos el factor decisivo a la hora de elegir uno y otro es el precio y el rango de temperaturas en el que se quiera trabajar [33]. Es probable que se acabe optando por Hitec o Hitec XL por encima de la sal solar, pues se solidifican a menores temperaturas y son más baratos. Su único inconveniente es que su límite máximo de temperatura de trabajo está por debajo del de la ya mencionada sal solar.

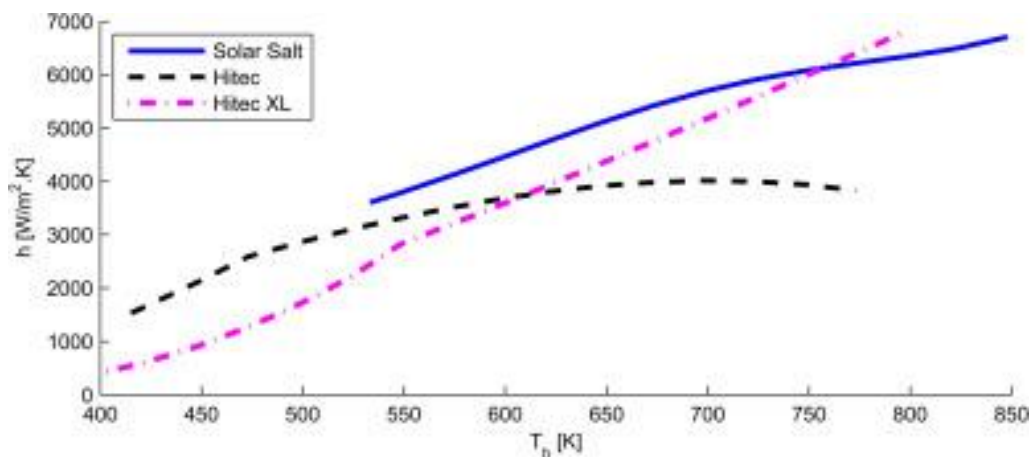


Ilustración 25. Comparación del coeficiente de transmisión de calor de las tres sales fundidas mencionadas en función de la temperatura. [33]

3.1.3.4 Otras sales fundidas

La investigación en nuevas sales fundidas para el mercado termosolar está siendo uno de los puntos más importantes en los avances tecnológicos cuyos objetivos son la reducción de costes y la mejora del rendimiento térmico.

Recientes estudios [48], han investigado la posibilidad de usar mezclas eutécticas cuaternarias de nitratos-alcalinos y nitratos ($\text{LiNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_2$) como fluido caloportador en sistemas CSP. Se descubrió que el punto de fusión de esta mezcla se encontraba por debajo de los 100°C y que la estabilidad térmica de este compuesto se alcanza a los 430°C , que es más baja que en la sal solar, Hitec y Hitec XL. Sin embargo, se demostró que poseía un calor específico mayor que en las sales anteriormente mencionadas. Hay que destacar que el elevado precio del LiNO_3 ha limitado considerablemente el uso de esta mezcla en aplicaciones comerciales.

Aunque las sales fundidas con bases en nitratos y nitritos son las que más se utilizan hoy en día como fluido HTF para sistemas CSP, en muchas partes del mundo la producción de estas sales de nitratos y nitritos está restringida. Por lo que se están empezando a sintetizar y estudiar unas alternativas a estos a partir de materiales abundantes y baratos.

Los responsables del proyecto MURI (Multi-University Research Initiative) fundado por el departamento de energía de los EE. UU., han propuesto recientemente el uso de sales fundidas basadas en cloruros como fluido caloportador en sistemas CSP [49]. Sales de ion cloruro metálico, como NaCl y KCl son abundantes en la naturaleza y con puntos de ebullición por encima de los 1400°C . Cuando un ion cloruro (NaCl KCl) con una alta temperatura de fusión ($\sim 800^\circ\text{C}$) se mezcla con un cloruro covalente (ZnCl_2) con un bajo punto de fusión ($\sim 200^\circ\text{C}$), se forma una mezcla eutéctica a una temperatura muy por encima de los puntos de fusión del NaCl o del KCl [50].

Sin embargo, todavía no existe la suficiente información sobre las propiedades corrosivas de estas nuevas sales fundidas. Como ya se ha mencionado, la corrosión de los materiales de los equipos es un factor determinante sobre todo en la elección de una sal fundida, por lo que debe aún estudiarse en profundidad antes de permitir el uso comercial de nuevas sales fundidas.

3.1.4 Nanofluidos

Los fluidos que tradicionalmente se han utilizado y se utilizan como HTF, poseen unas bajas conductividades térmicas, además de una transferencia de calor débil. A raíz de ahí surge la necesidad de mejorar estos fluidos caloportadores con distintas técnicas que conlleven una mejora de su actuación y de su conductividad térmica.

Una de esas técnicas es la adición de partículas al fluido, ya que se sabe que la conductividad térmica de las partículas sólidas es mucho más alta que la de los fluidos. Durante de los primeros ensayos se utilizaban micropartículas para mejorar la transferencia de calor, pero debido al tamaño micro de estas partículas se producía la sedimentación de estas en el fluido de forma que se depositaban en el fondo de los equipos provocando incluso daños en el interior de las tuberías. Cuando se empezó a utilizar nanopartículas, este problema fue solventado ya que las nanopartículas se mueven siguiendo un movimiento llamado Browniano, de forma que permanecen en equilibrio el peso y la agitación térmica, lo que quiere decir que el equilibrio no produce una distribución uniforme, sino que la concentración de partículas se reduce exponencialmente con la altura. [51]

Los nanofluidos se definen como suspensiones diluidas con partículas sólidas de tamaño inferior a 100nm que se emplean para incrementar la capacidad de transferencia de calor del fluido; los cuales se elaboran a partir de la dispersión de unas partículas con tamaño del orden de los nanómetros en una base fluida. Sin embargo, aunque se trate de una mezcla de nanopartículas con un fluido, el nanofluido puede aproximarse a un fluido en fase simple. Es decir, se asume que la fase del fluido y las nanopartículas están en equilibrio térmico y que se mueven a la misma velocidad. [51]

Hasta ahora, estas nanopartículas han tenido otros usos además de para la elaboración de los nanofluidos. Actualmente, las nanopartículas se suelen emplear en grandes industrias como la farmacéutica, cosmética,

alimentaria, aeronáutica, agricultura y automotriz entre otros. Pese a todas estas aplicaciones actuales, el estudio de las propiedades de las nanopartículas es una ciencia muy novedosa que se está empezando a estudiar y que avanza muy rápidamente. En la siguiente ilustración se muestra el crecimiento de las investigaciones en este campo, cantidad de artículos publicados con respecto al tiempo.

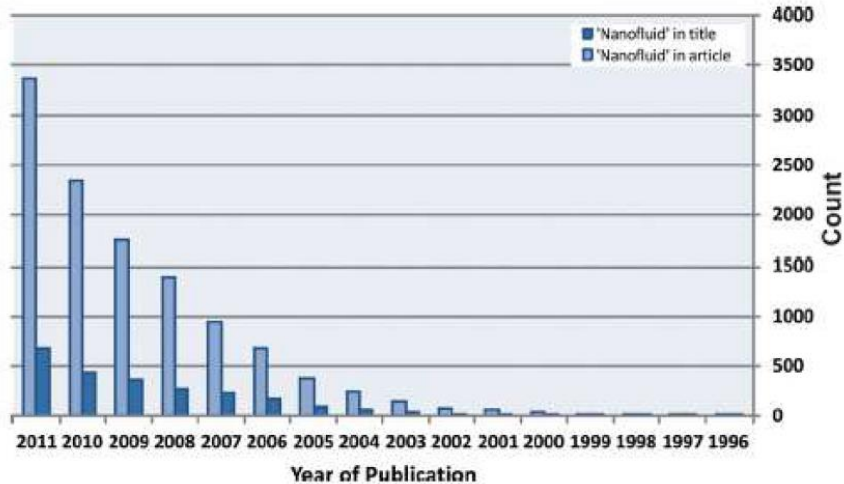


Ilustración 26. Crecimiento de las publicaciones de nanofluidos. [51]

Como se trata de un tipo de escala de dimensiones extremadamente pequeñas, a veces resulta difícil comprender su tamaño, como ejemplo, se puede considerar una pelota de tenis; la pelota de tenis con la Tierra tiene la misma relación de tamaño que esa pelota de tenis con una nanopartícula.

Entre las principales ventajas que poseen los nanofluidos frente a los fluidos puros destacan:

- Mejora de ciertas propiedades térmicas, entre ellas la conductividad térmica.
- Mayor superficie de transferencia de calor entre las partículas y el fluido.
- Alta estabilidad de la dispersión, reduciendo la energía de bombeo.
- Por medio de las modificaciones de interacciones entre partículas, se pueden obtener las propiedades de los nanofluidos que se necesiten.
- Ahorro energético y reducción del espacio

Igualmente, el uso de estos nanofluidos conlleva una serie de inconvenientes a tener en cuenta:

- Al adicionar nanopartículas a un fluido, se incrementa la viscosidad del fluido, y por ende un aumento de la energía de bombeo
- Los materiales sólidos que se usan para las nanopartículas, en su mayoría son perjudiciales (carbón). Aún son necesarios estudios que profundicen en los efectos que tendrán en el medio las nanopartículas.

Para su producción, los materiales que se emplean para la base fluida o para las propias nanopartículas son diversos. Los nanofluidos deben ser estables y altamente conductivos. Uno de los aspectos más importantes en la producción de nanofluidos es el nivel de concentración de las partículas que lo forman. Este punto es clave ya que las propiedades termodinámicas de los nanofluidos dependen de las partículas en suspensión que posean, y por ello existen dos formas de producción de nanofluidos. El primero es el método conocido como de un paso, este método consiste en administrar las nanopartículas en forma de polvo seco en el fluido base, para que se dispersen de tal forma que compongan una suspensión homogénea y estable [52]. El segundo método es el de dos pasos y suele llevarse a cabo en baños de ultrasonidos, sondas de ultrasonidos y/o agitadores magnéticos, entre otros. El más utilizado es el de sondas de ultrasonido, que conserva las propiedades ideales del nanofluido para su aplicación térmica. [53]

En la Ilustración 27 se muestran los materiales comúnmente utilizados como nanopartículas, notándose que los metales como el hierro, el oro y el cobre tienen valores muy bajos comparados con los óxidos metálicos, que presentan valores elevados de conductividad térmica.

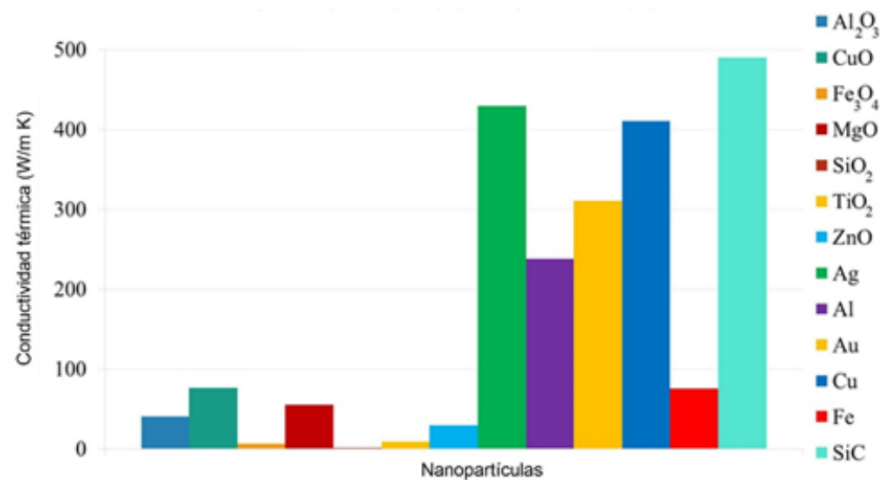


Ilustración 27. Conductividades térmicas de los materiales más usados como nanopartículas. [54]

Desde que se empezaron a desarrollar los nanofluidos, se han estudiado todo tipo de configuraciones de nanopartículas y de fluidos base. Dentro de las primeras se encuentran las metálicas, de óxidos metálicos, basado en carbono e híbridas. Mientras que los fluidos bases más utilizados suelen ser el agua, el glicol y el aceite. En la siguiente Ilustración se muestra un esquema de estos.

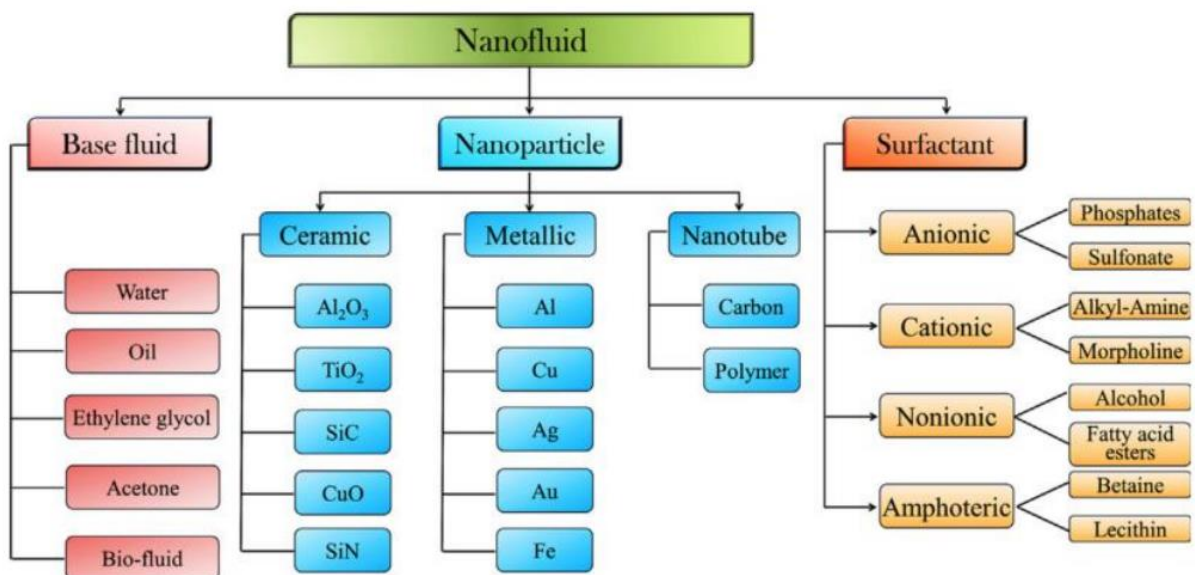


Ilustración 28. Principales elementos usados como nanopartículas y fluidos base. [55]

Como ya se ha mencionado anteriormente, la conductividad térmica es una de las propiedades más importantes y que más determinan la elección de un fluido caloportador, por ello se discutirán a continuación los factores que más influyen en la conductividad térmica de los nanofluidos.

- El material de la nanopartícula: lógicamente las nanopartículas compuestas por materiales con mayor conductividad térmica producen una mayor mejora de la conductividad térmica del fluido base; por ello

las nanopartículas basadas en carbono y las metálicas tienen mayores conductividades que las de óxidos metálicos. [56] La Tabla muestra valores de conductividad térmica de distintos materiales usado en nanofluidos. Por medio de la adición de nanopartículas de grafeno a una concentración de 0,005 vol% se pueden alcanzar mejoras en la conductividad térmica de hasta el 90% [57], mientras que usando nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos de concentraciones 100 veces superiores a las usadas con grafeno solo se alcanzan mejoras del 50% para los metales y de 25% para los óxidos metálicos; evidenciando la fuerte dependencia del material con la conductividad térmica del nanofluido.

Material	Conductividad Térmica (W/m K)
Sólidos Metálicos	
Acero	83,5
Aluminio	237
Oro	318
Cobre	401
Plata	428
Sólidos No Metálicos	
Alumina (Al_2O_3)	40
Óxido de cobre (CuO)	76,5
Silicio	148
Carburo de silicio (SiC)	270
Nanotubos de nitruro de Boro (BNNT)	200 – 600
Nanotubos de carbono multipared (MWNNT)	3000
Nanotubos de carbono pared única (SWNNT)	6000
Grafeno	1500 – 5800
GO (con 1% de oxígeno)	100
Fluidos	
Agua	0,613
Etilenglicol	0,253
Aceite	0,145

Tabla 3. Conductividad térmica de diferentes materiales. [58]

- Concentración de las nanopartículas: el aumento en la concentración de nanopartículas en el seno del nanofluido aumenta la conductividad térmica de este.
- Tamaño de las nanopartículas: si se reduce el tamaño de las partículas se mejora la conductividad térmica del nanofluido ya que incrementa la superficie de las partículas. Aunque es posible llegar a una medida límite en donde este efecto se vea revertido.
- Forma de las nanopartículas: Las formas que maximizan el área de intercambio son las que poseen una mayor conductividad térmica, ya que cuentan con más espacio para conducir el calor. Por ello, las formas con mayor área corresponden a la cubica, seguida de las cilíndricas y finalmente las esféricas.

3.1.5 Metales líquidos

Los metales líquidos se han utilizado en la industria nuclear como refrigerante desde la década de los 40, y es ahora cuando se están realizando los primeros estudios para analizar su viabilidad en sistemas termosolares como fluidos caloportadores, así como para sistemas de almacenamiento térmico. Estos metales se encuentran en estado líquido en un amplio rango de temperaturas, sin dejar de ser químicamente estables lo que, unido a unas propiedades como su baja viscosidad, su alta conductividad térmica y su alta densidad de flujo les convierte en una tecnología prometedora en la industria. [59]

Estas características, además de otras, provocan una disminución del tamaño del receptor, así como de su área de apertura sin llegar a reducir el rendimiento del ciclo. Así mismo contribuyen a que se reduzca el calentamiento excesivo de las paredes del receptor, favoreciendo la disminución de pérdidas térmicas y el aumento de la transmisión de calor que se cede al fluido caloportador.

Por otro lado, la gran desventaja de los metales líquidos frente a los ya expuestos HTF actuales es el riesgo de disolución de los equipos por las altas temperaturas del fluido y los niveles de corrosión al que están sometidos

los materiales que componen el circuito. Esto conlleva a un estrés temprano de estos materiales obligando a su renovación, lo que se traduce en una mayor inversión de capital. Igualmente, existe el riesgo de que el material sólido disuelto en la sección caliente del circuito o los residuos provocados por el óxido, se depositen en la sección fría creando obstrucciones o algún tipo de problemática para la planta. Este inconveniente se analizará más adelante.

Por otro lado, los metales líquidos tienen una capacidad calorífica menor y un precio más elevado que la mayoría del resto de HTFs, por lo que su uso como fluido de almacenamiento térmico no es recomendable, quedando limitado su uso al de HTF y requiriendo de un sistema de almacenamiento térmico indirecto, es decir, formado por otro fluido. [60]

Dentro de la categoría de metales líquidos como fluido caloportador, existen tres grandes grupos: metales alcalinos, metales pesados y metales fundidos, cuyos principales representantes se muestran en la siguiente tabla.

Heat transfer fluid	T_{\min} , °C	T_{\max} , °C	c_p , kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	λ , W m ⁻¹ K ⁻¹	ρ , kg m ⁻³	μ , mPa s	Cost ^a , USD kg ⁻¹
<i>Alkali metals</i>							
NaK eutectic (22.2–77.8%wt Na–K)	–12	785	0.87	26.2	750	0.18	2
K	64	766	0.76	34.9	705	0.15	2
Na	98	883	1.25	46.0	808	0.21	2
Li	180	1342	4.16	49.7	475	0.34	60
<i>Heavy metals</i>							
PbBi eutectic (44.5–55.5%wt Pb–Bi)	125	1533	0.15	12.8	9660	1.08	13
Bi	271	1670	0.15	16.3	9940	1.17	22
Pb	327	1743	0.15	18.8	10,324	1.55	2
<i>Fusible metals</i>							
Ga	30	2237	0.36	50.0	6090	0.77	600
In	157	2072	0.24	47.2	6670	0.75	500
Sn	232	2687	0.24	33.8	6330	1.01	25
<i>State-of-the-art HTFs</i>							
Air	n.a.	n.a.	1.12	0.06	0.40	0.03	0
Water/Steam	0	n.a.	2.42	0.08	22.1	0.03	~0
Solar salt (60–40%wt NaNO ₃ –KNO ₃)	220	600	1.10	0.52	1903	1.33	0.5

^a Commodity prices (commercial purity) as of end of 2012 show large variations and should only be considered as a rough order-of-magnitude approximation.

Ilustración 29. Comparación de metales líquidos como HTF en CSP [61]

Entre las propiedades físicas que caracterizan a los metales alcalinos destacan; una densidad relativamente baja, bajo punto de fusión, alta capacidad calorífica y alta conductividad. Además, poseen un nivel de corrosión más bajo que los otros grupos de metales. El principal inconveniente de este grupo es la seguridad, ya que reaccionan exotérmicamente con el agua y el aire provocando liberación de hidrógeno y causando fugas o explosiones difíciles de extinguir. Dentro de esta categoría se analizará con mayor detalle las propiedades físicas del sodio (Na) y de la aleación eutéctica de sodio y potasio (NaK) compuesto por un 22.2% Na y un 77.8% K.

Los metales pesados poseen un mayor punto de ebullición y una mayor densidad que los metales alcalinos, también una menor capacidad calorífica y una menor conductividad térmica. Además, a diferencia de los metales alcalinos, su uso es más seguro al tener una reacción tan violenta al entrar en contacto con el aire. Sin embargo, su alto nivel de corrosión sí llega a ser un problema considerable respecto su uso en CSP, lo que conlleva a dirigir la investigación sobre este grupo al desarrollo de capas protectoras de cerámica. En este grupo, cabe destacar la aleación eutéctica de plomo y bismuto (PbBi), el cuál ha sido materia de estudio en diferentes análisis, coincidiendo la mayoría en que sus propiedades físicas lo convierten en el candidato más favorable dentro de este grupo debido a su bajo punto de fusión.

Por último, en el grupo de los metales fundidos destacan el estaño (Sn) y el galio (Ga), como HTF. Este grupo consta de un bajo punto de fusión y un alto punto de ebullición lo que conlleva a un alto rango de temperaturas en los que las sustancias se encuentran en estado líquido. A pesar de todas estas cualidades positivas, su precio elevado y su excesivo nivel corrosivo los descarta como posibles fluidos HTFs en CSP. [62]

3.1.5.1 Sodio Líquido

El sodio líquido como fluido caloportador y fluido de almacenamiento térmico ya se utilizó por primera vez en

1981, en una planta CSP en Almería, España. Tuvo un enorme éxito durante su funcionamiento, sin embargo, y como hemos mencionado anteriormente los problemas de seguridad que acarrea este tipo de fluido no pudieron ser solventados y desencadenó un incendio en 1986 que provocó el desmantelamiento de la planta y que el uso de los metales líquidos en CSP quedara obsoleto. Gracias a los avances en tecnología y seguridad esta situación se está revertiendo. En 1960 se decretaron unas medidas de seguridad para aquellas plantas en las que se use sodio líquido, entre ellas: prevención de fugas, inspecciones exhaustivas, mejoras en los sistemas informáticos y el uso de nitrógeno y polvo en caso de incendio.

El sodio líquido es el elemento que más baja reactividad muestra comparado con otros metales líquidos y que, junto a su precio y experiencia acumulada sobre él de la industria nuclear, lo convierte en uno de los metales líquidos alcalinos más atractivos. [60]

El sodio líquido posee una temperatura de fusión de 97.8°C y una temperatura de ebullición de 883°C , una conductividad térmica muy alta (100 veces mayor que la de las sales fundidas usadas como HTF) y que contribuye a mejorar el coeficiente de convección interna, lo que resulta interesante ya que disminuye la diferencia de temperatura entre el fluido y los tubos mejorando así la eficiencia del receptor. [63]

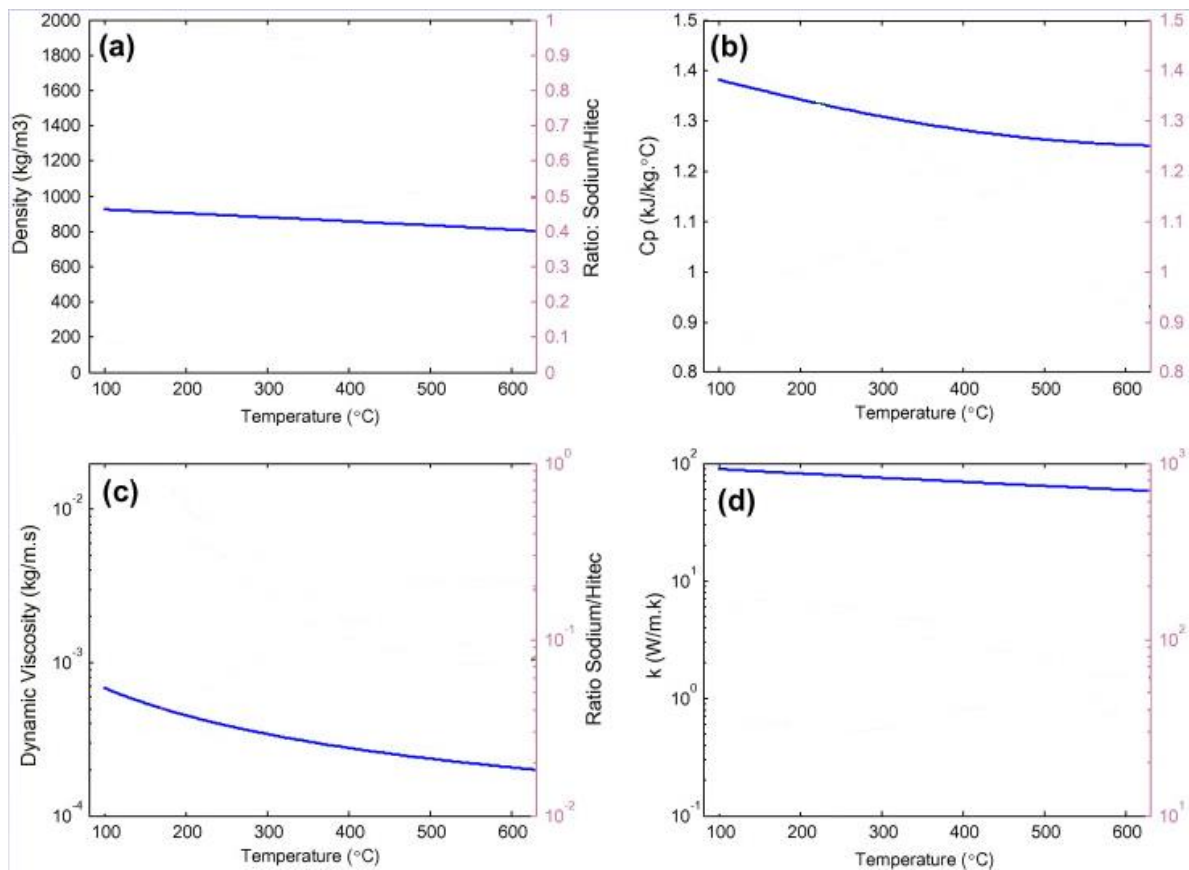


Ilustración 30. Propiedades del sodio líquido, MODIFICADA DE [64]

Además, cuenta con una viscosidad relativamente baja que facilita la circulación del fluido aportando mayor seguridad y vida útil, también es menos corrosivo que el resto de los metales. Siendo esta una de las mayores preocupaciones a la hora de trabajar con metales líquidos, el sodio tiene una buena compatibilidad con aceros inoxidables, así como con materiales no ferrosos (menos el aluminio, el platino, el oro o la plata) hasta su punto de ebullición.

Hay que destacar que el factor que afecta a la compatibilidad del sodio con estos materiales es la presencia de impurezas no metálicas, principalmente el oxígeno; con un mantenimiento de la planta se pueden mantener los niveles de oxígeno por debajo de su valor umbral.

Sodio Líquido

$$c_p = 1648.2 - 0.84790 T + 4.4541 \cdot 10^{-4} T^2 - 2.9926 \cdot 10^{-6} T^3$$

$$\lambda = 124.67 - 0.11381 T + 5.5226 \cdot 10^{-5} T^2 - 1.1842 \cdot 10^{-8} T^3$$

$$\rho = 219 + 275.32 \left(1 - \frac{T}{2503.7}\right) + 511.58 \left(1 - \frac{T}{2503.7}\right)^{0.5}$$

$$\ln(\mu) = -6.4406 - 0.3958 \ln(T) + \frac{556.835}{T}$$

Ecuaciones 8. Correlaciones de las propiedades termo-físicas del sodio líquido en función de la temperatura
371 K < T < 1255 K. [65]

Como el sodio líquido congela a 97.8°C, por lo que en un sistema donde la fuente de energía térmica sea intermitente puede darse el caso de que el fluido se congele en algunas zonas del circuito. Esto puede causar complicaciones que requieran tomar una serie de medidas que eviten una posible fuga de sodio líquido, por ello a veces se usa la mezcla eutéctica NaK en su lugar.

3.1.5.2 Mezcla eutéctica NaK

Por otro lado, la aleación NaK (22,2% - 77,8%) eutéctica, también puede considerarse un candidato notable en esta categoría de metales alcalinos ya que su gran ventaja es que se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente. No obstante, por eso mismo, la aleación NaK requiere de un manejo y transporte complejo debido al riesgo de reaccionar exotérmicamente a temperatura ambiente. Su punto de fusión se encuentra a -12°C mientras que el de ebullición alrededor de los 785°C. [2]

NaK tiene propiedades de transferencia de calor inferiores a las del sodio y tiene una capacidad de calor específica relativamente baja en comparación con otros HTF, pero igualmente se considera un excelente medio de transferencia de calor [66] Como inconveniente, suele ser un compuesto con un coste elevado. Este compuesto permite diferentes composiciones de sodio y potasio, por ejemplo, NaK46 (46% de potasio) la cual tiene un punto de fusión de 20°C, además de una conductividad más alta y una mayor capacidad de calor específico que la NaK eutéctica. [67]

El mayor problema que implica el uso de NaK es su reacción violenta con el agua; esto se convierte en un inconveniente durante los procesos de mantenimiento y limpieza, para ello es necesario limpiar las tuberías utilizando gas inerte a alta presión cuando el sistema se ha enfriado [68]. Al presurizar el NaK eutéctico a una presión de 10 bar, la temperatura operativa del NaK líquido se puede aumentar a más de 1100°C. [67]

3.1.5.3 Mezcla eutéctica PbBi

La composición eutéctica de plomo y bismuto es otro metal líquido estudiado para su uso en sistemas CSP, brevemente conocido como LBE (Lead-Bismuth Eutectic). Esta mezcla eutéctica tiene un alto punto de ebullición, 1533°C, así como un punto de fusión relativamente elevado comparado con otros metales líquidos, 125°C.

Como el LBE es químicamente inerte con el aire y con el agua, no hay problemas ni riesgos relacionados con una posible reacción exotérmica como ocurre con el sodio. Sin embargo, el coste de esta composición es extremadamente alto, unas 26 veces más caro que las sales fundidas; además las mezclan que contienen plomo son tóxicas para el ser humano.

Mezcla Eutéctica PbBi

$$c_p = 159 - 2.72 \cdot 10^{-2} T + 7.12 \cdot 10^{-6} T^2$$

$$\lambda = 3.61 + 1.517 \cdot 10^{-2} T - 1.741 \cdot 10^{-6} T^2$$

$$\rho = 11096 - 1.3236 T$$

$$\mu = 0.000494 \exp\left(\frac{6270}{RT}\right)$$

Ecuaciones 9. Correlaciones de las propiedades termo-físicas de la mezcla eutéctica de plomo y bismuto en función de la temperatura $400 \text{ K} < T < 1500 \text{ K}$. [69]

Por otro lado, mientras que los aceros inoxidable y las aleaciones de níquel muestran una gran corrosión cuando trabajan con LBE, algunos materiales cerámicos como SiC y el Ti3SiC2 resisten a su corrosión.

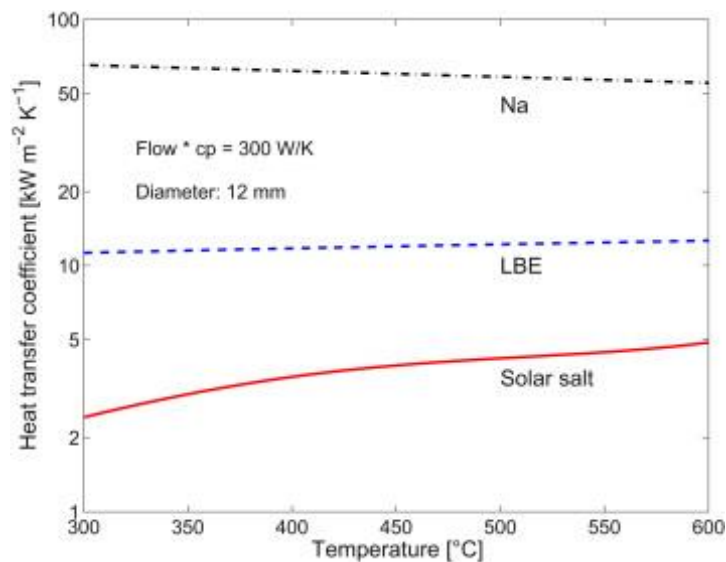


Ilustración 31. Comparativa del coeficiente de transmisión de calor entre sodio, LBE y sales fundidas. [70]

Physical property	Solar salt	Liquid Na	Liquid LBE
Lower temperature limit, °C	220	98	125
Upper temperature limit, °C	600	883	1670
Heat capacity c_p , $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.52	1.27	0.143
Thermal conductivity λ , $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.53	69.8	13.7
Density ρ , kg m^{-3}	1804	850	10,139
Dynamic viscosity μ , mPa s	1.69	0.27	1.44
Prandtl number Pr , -	4.85	0.005	0.015
Other characteristics	Low-cost direct TES is possible	Reacts with air and water	Larger density, lower c_p

Ilustración 32. Comparativa de las principales propiedades entre sodio, LBE y sales fundidas. [70]

4 ANÁLISIS DE DATOS

En este apartado de análisis de datos, se realizará una comparación entre los diferentes tipos de fluidos caloportadores que se han tratado a lo largo del estudio, con el fin de dar un punto de vista más sencillo de cuáles son los más adecuados en función de las necesidades operativas. Para ello se clasificarán según el rango de temperatura de trabajo; en la Ilustración 39. podemos ver una pequeña comparativa de al menos un representante de cada uno de los tipos de fluidos que se han estudiado con anterioridad, Therminol VP-1 para aceites térmicos, sal solar, Hitec y Hitec XL en cuanto a sales fundidas, sodio líquido y LBE para metales líquidos y por parte de los nanofluidos, el compuesto que posee SiC como nanopartículas.

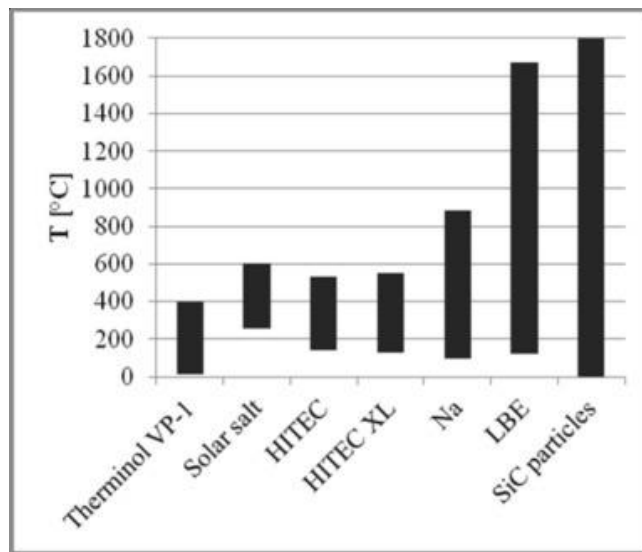
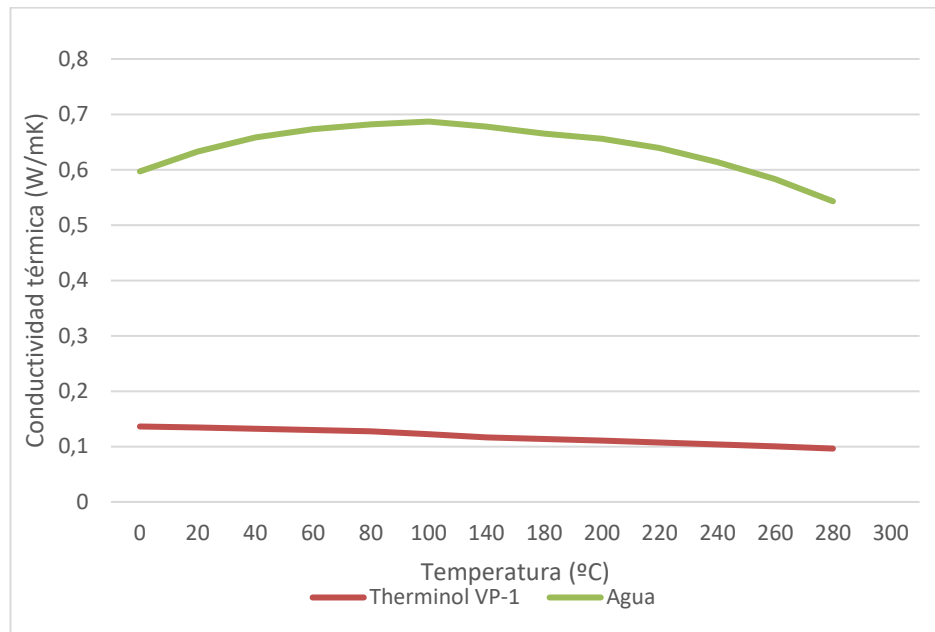


Ilustración 33. Rangos de temperatura de algunos fluidos estudiados. [56]

Queda claro que tanto el agua como los aceites térmicos son los fluidos más adecuados para operar en un rango bajo de temperaturas, es decir hasta valores cercanos a los 400°C. Como se puede ver en la siguiente Gráfica 6, el agua tiene los valores más altos de conductividad térmica frente a los aceites térmicos (solo se ve representado Therminol VP-1 pues los demás aceites estudiados tienen valores muy parecidos).



Gráfica 6. Conductividad térmica Therminol VP-1 (Ficha técnica del fabricante) y agua.

Viendo la Gráfica 6 puede parecer obvia la elección del fluido si se necesita uno que opere a bajas temperaturas, sin embargo, hay que hacer hincapié en que el agua presurizada trabaja a unas presiones de vapor exageradamente altas y que sin duda encarecerán el precio de los materiales que conformen el circuito, pues se necesitarían equipos capaces de soportar esas presiones. Por ello, los aceites térmicos también pueden resultar una opción muy interesante pues son capaces de trabajar a altas temperaturas sin apenas elevar su presión de vapor. La anterior Ilustración 9. es prueba de ello.

No solo la presión de vapor, sino la propia estabilidad térmica del fluido puede determinar la elección de un aceite térmico en lugar del agua, ya que estos, y sobre todo los novedosos aceites con base de silicona como el Helisol 5A garantizan una buena estabilidad térmica incluso por encima de los 400°C.

Fluido a 227°C	Viscosidad (Pa s)	Conductividad térmica (W/mK)	Calor específico (kJ/kgK)	Densidad (kg/m ³)
Agua (presurizada)	0.00011	0.622	4.741	813
Therminol VP-1	0.00032	0.109	2.128	878
Helisol 5A	0.00069	0.0842	1.943	733,5

Tabla 4. Propiedades del agua, Therminol VP-1 y Helisol 5A a 227°C. Datos obtenidos de las correlaciones proporcionadas por [37], [71]

Finalmente, se puede afirmar que el agua es el fluido caloportador más adecuado para aplicaciones que trabajen a temperaturas bajas, por su elevada conductividad térmica y en las que no sean necesaria la presurización de los equipos, ahorrando en costes. Para temperaturas algo más altas, llegando a los 400°C los aceites térmicos son los óptimos, destacando la gama Therminol®, a la espera de los nuevos avances que conciernen a los aceites con base de silicona.

Por otro lado, para plantas que operen por encima de esos 400°C las sales fundidas o los metales líquidos serían los más apropiados, ya que como se ha mostrado antes tienen una alta estabilidad térmica. Es cierto, que los metales líquidos aún están en fase de investigación y desarrollo, pero las sales fundidas ya se están empezando a comercializar; y son la mejor opción para plantas que posean almacenamiento térmico (entre ellas destaca la sal solar) ya que trabajan a presión atmosférica, algo que con aceites o agua sería imposible.

La siguiente Tabla 10. presenta los valores numéricos de las propiedades de diferentes sales fundidas y metales líquidos, obtenidos a partir de las correlaciones en función de la temperatura que se encuentran en los apartados superiores.

Fluido a 500°C	Viscosidad (Pa s)	Conductividad térmica W/mK)	Calor específico (kJ/kgK)	Densidad (kg/m³)
Sal Solar	0.00131	0.5379	1.528	1772.1
Hitec	0.001145	0.2442	1.560	1714.14
Hitec XL	0.0011	0.519	1.378	1826
Sodio Líquido	0.000235	64.22	1.263	834.65
LBE	0.0005	14.296	0.142	10072.86

Tabla 5. Propiedades de las sales fundidas: sal solar, Hitec y Hitec XI; y de los metales fundidos: sodio líquido y LBE. Datos obtenidos de las correlaciones proporcionadas por [47][56]

En los últimos años los estudios de nuevos fluidos caloportadores tienden a desarrollar compuestos capaces de trabajar en amplios rangos de temperatura (mejorar la estabilidad térmica) y que minimicen la corrosión con los materiales de las tuberías y los equipos. Por ello mismo las sales fundidas siguen siendo de las mejores opciones, sin embargo, muchas de esas sales se basan en nitratos y nitritos, y la producción de estos está empezando a limitarse por las autoridades debido a las escasas reservas.

Nuevos estudios proponen el uso de sales fundidas basadas en cloruros o carbonatos, pero estos estudios aun no ofrecen suficiente información ni datos sobre los efectos de la corrosión en los equipos de estas nuevas sales (siendo uno de los factores determinantes a la hora de optar por una sal fundida) por lo que deben resolverse antes de empezar a ser comercializadas.

Además de todo lo anteriormente mencionado, hay que añadir que las sales fundidas comienzan a ser térmicamente inestables a partir de los 600°C, y es por ellos que los metales líquidos están en el punto de mira de la industria CSP, estos se caracterizan por sus altísimas conductividades térmicas, donde sin ir más lejos el sodio líquido posee el mayor coeficiente de transmisión de calor de los HTFs que se comercializan, gracias a su elevada conductividad térmica (la Tabla 10. muestra una comparativa de este valor con el de otros compuestos). Presentan también una baja capacidad calorífica, en comparación con otros fluidos.

La Ilustración 40. es un comparativa entre las principales propiedades termo-físicas tanto de la sal Hitec como del sodio líquido. En ella se puede apreciar como el sodio líquido posee una densidad que es prácticamente la mitad de la densidad de la sal fundida; igualmente la viscosidad del metal es mucho menor que la de la sal Hitec; los calores específicos de ambos fluidos tienden a ser parecidos Sin embargo lo que más destaca de la figura es sin duda la diferencia tan abismal que existe entre las conductividades térmicas de ambos compuestos, donde la del sodio líquido llega a ser unas 150 veces superior.

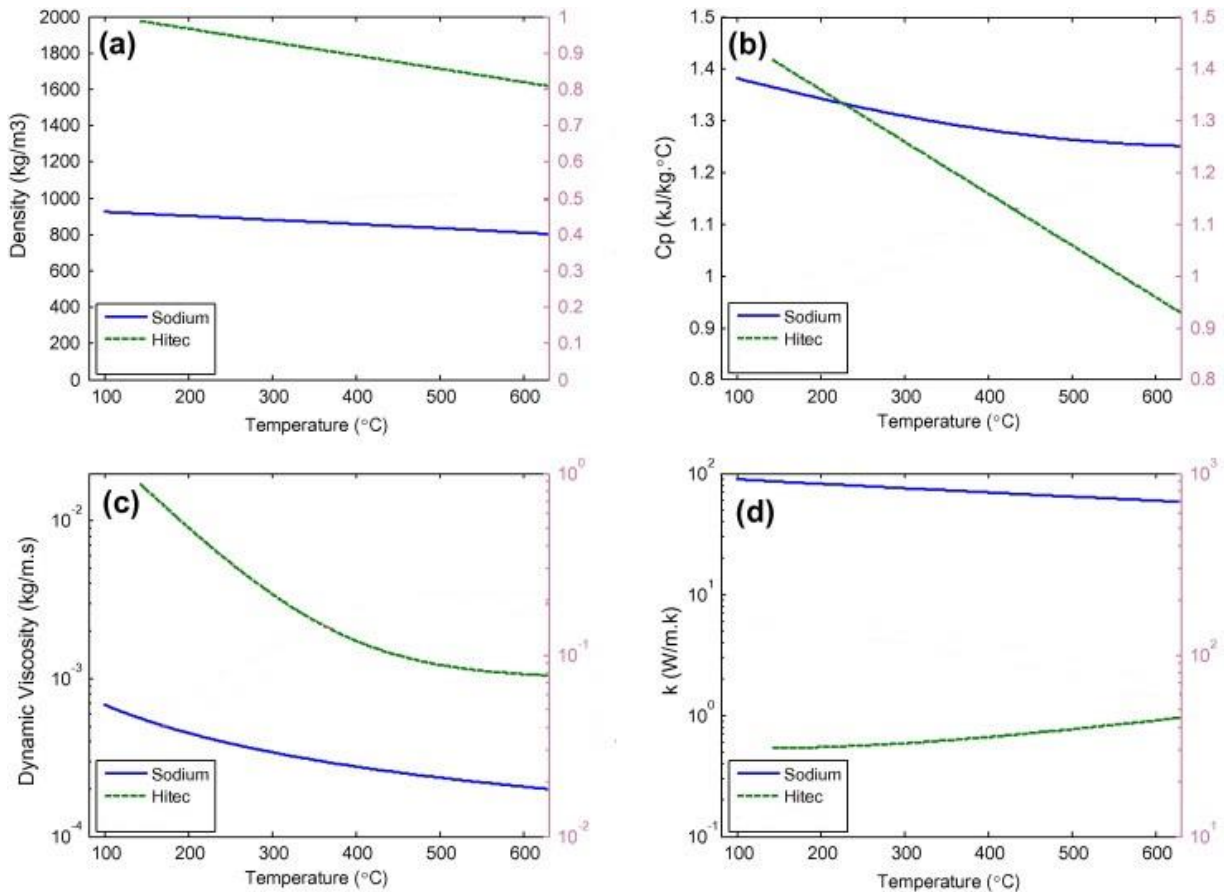


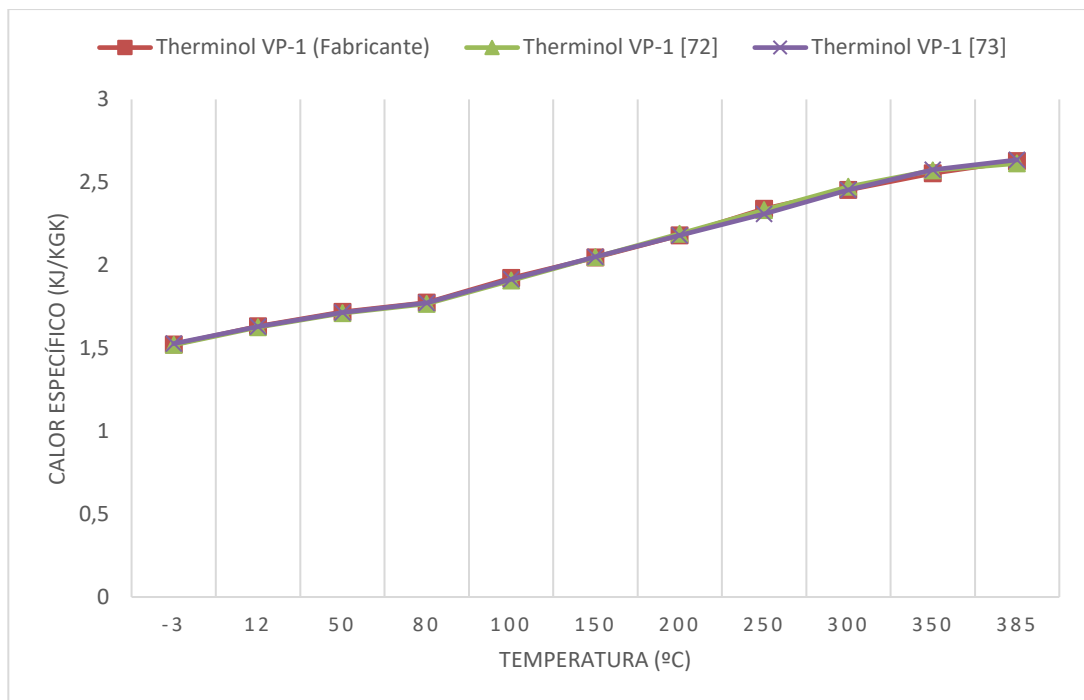
Ilustración 34. Propiedades del sodio líquido y de Hitec en función de la temperatura. a) Densidad; b) Calor específico; c) Viscosidad; d) Conductividad térmica. MODIFICADA DE [64]

La capacidad calorífica de un compuesto se calcula como el producto de la densidad por su calor específico, donde el calor específico es una magnitud que se define como la cantidad de calor que hay que aportar a una unidad de masa de un sistema para incrementar su temperatura en un grado centígrado; por ello el hecho de que la sal Hitec (y en general todas las sales fundidas) tenga una mayor capacidad calorífica que el sodio líquido, significa que, para los mismos valores de temperatura de trabajo la sal fundida necesitará mucho menos volumen, es decir, cantidad de materia para almacenar la misma cantidad de energía, lo que supone menos costes. Por ello son las sales fundidas y no otros fluidos caloportadores los que se utilizan en plantas termosolares que posean un sistema de almacenamiento térmico.

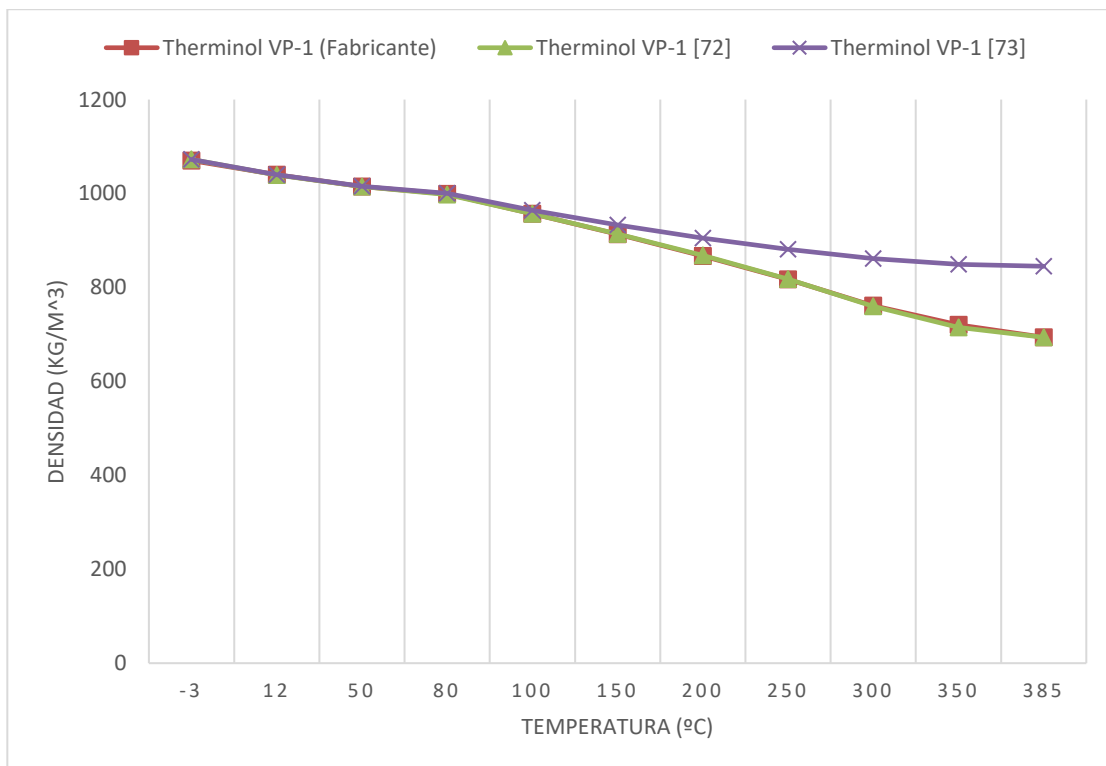
De igual forma, y para dar otro punto de vista del estudio, se han comparado las propiedades obtenidas de las diferentes fuentes referenciadas de los principales fluidos caloportadores de los tipos aceite térmico, sales fundidas y metales líquidos; estos son Therminol VP-1, Hitec, Hitec XL, sal solar y el sodio líquido.

En primer lugar, se han comparado las propiedades del aceite térmico Therminol VP-1, a partir de los datos ofrecidos por la ficha técnica que proporciona el propio fabricante [71] las correlaciones ofrecidas por un artículo que estudia experimentalmente las propiedades del Therminol VP-1 [72] y las correlaciones ofrecidas por una tesis doctoral de la universidad Politécnica de Milan [73]

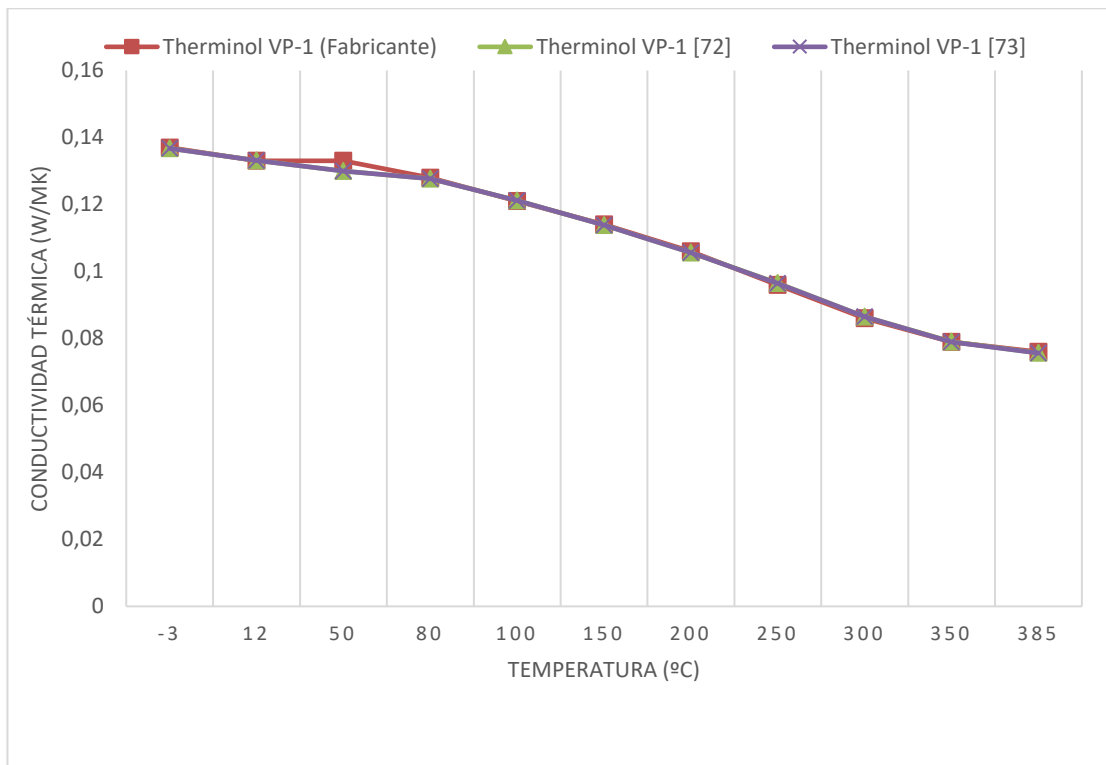
En primer lugar, la Gráfica 7 representa el calor específico de este aceite térmico, donde las curvas que representan los datos ofrecidos por el fabricante [71], por el artículo [72] y la obtenida por medio de las correlaciones proporcionadas por la tesis [73] coinciden a la perfección. En la Gráfica 8 Se muestran las tres curvas referentes a la densidad del fluido, como pasaba en la anterior, los datos del fabricante y del artículo [72] coinciden, mientras que los ofrecidos por la tesis [73] pese a también presentar los mismos valores a bajas temperaturas, a partir de unos 200°C muestra una tendencia menos decreciente que las otras dos. Por último, la Gráfica 9 representa la conductividad térmica del aceite, donde las curvas pertenecientes a los datos de las tres fuentes presentan curvas muy aproximadas.



Gráfica 7. Calor específico del Therminol VP-1 según las fuentes: rojo [71], verde [47], azul [72].



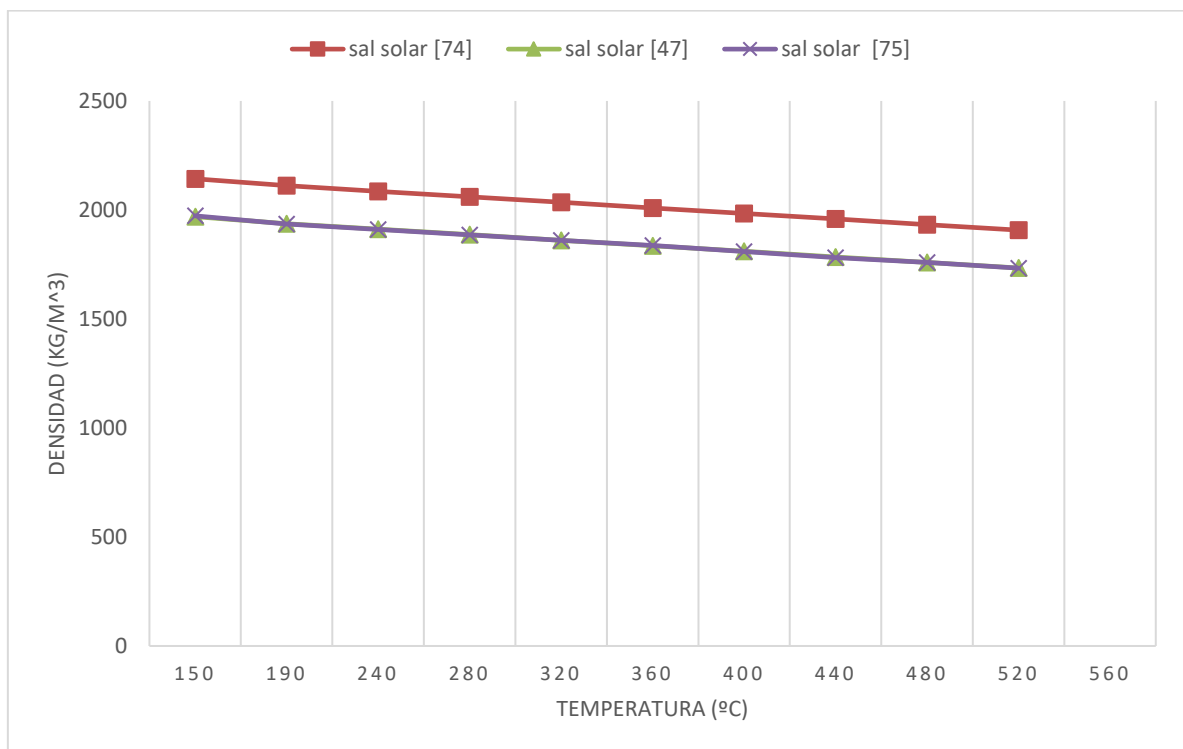
Gráfica 8. Densidad del Therminol VP-1 según las fuentes: rojo [71], verde [47], azul [72].



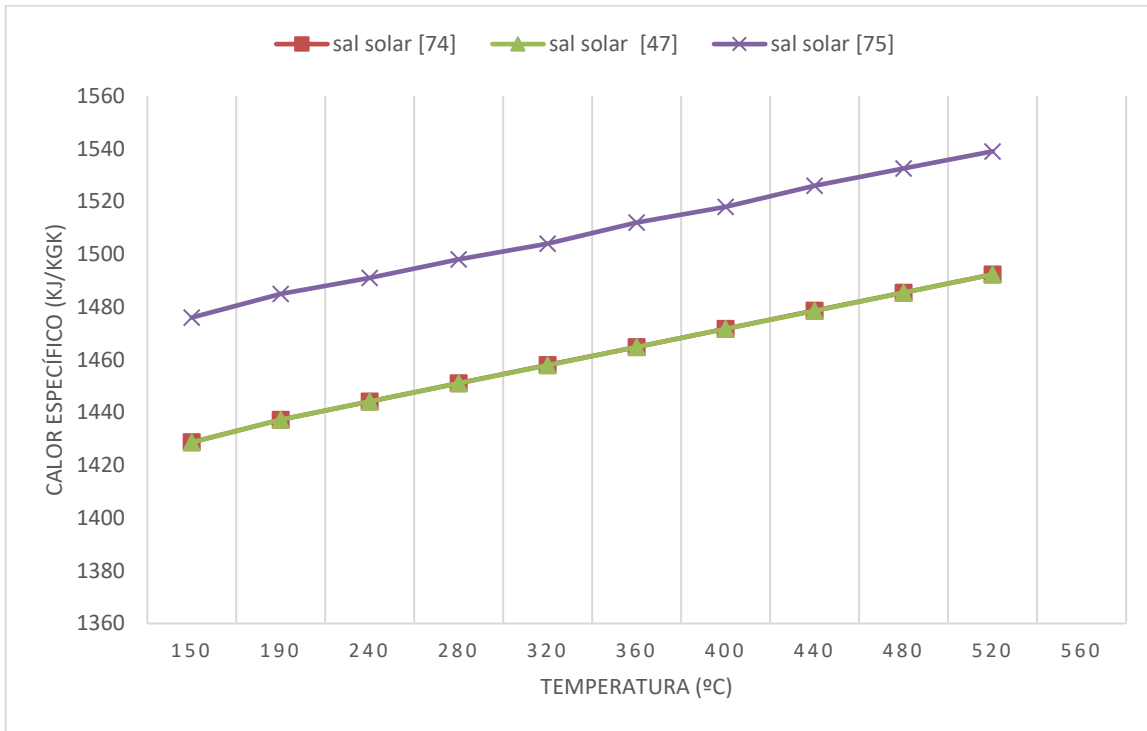
Gráfica 9. Conductividad térmica del Therminol VP-1 según las fuentes: rojo [71], verde [47], azul [72].

Las fuentes que se han utilizado para representar las propiedades de la sal solar son: el artículo [74], un estudio que recopila y analiza las propiedades termo-físicas de diferentes sales fundidas y en el que se comparan igualmente diversas fuentes eligiendo una correlación promedio. Las correlaciones del artículo [47] y, por último, la tercera fuente pertenece a la base de datos del software informático SAM, System Advisor Model [75], un reconocido simulador de plantas de producción de energías renovables.

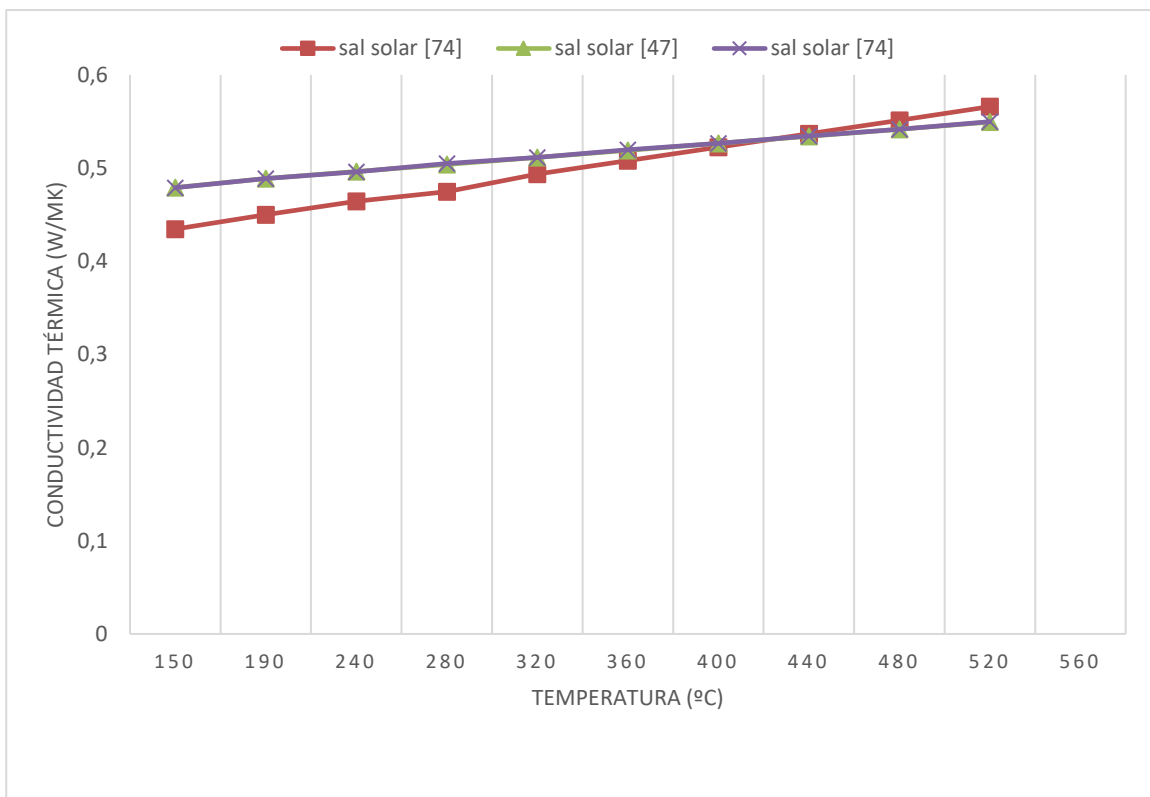
Se observa como las tres fuentes para las tres propiedades tienen las mismas tendencias, en la Gráfica 10, la densidad muestra una recta algo decreciente con la temperatura, donde los valores del artículo [74] son algo superiores a los de las otras dos fuentes. En cuanto al calor específico del fluido, representado en la Gráfica 11 es el software SAM el que aporta unos valores por encima de los determinados por los dos artículos. Finalmente, en cuanto a la conductividad térmica se refiere, cuyas rectas se muestran en la Gráfica 12 las tres fuentes presentan una conductividad creciente con la temperatura, donde la recta del artículo [74] es algo más inclinada, coincidiendo las rectas en el rango de temperaturas de entre 400°C y 500°C.



Gráfica 10. Densidad de la sal solar, según las fuentes: rojo [74], verde [47], morado [75].



Gráfica 11. Calor específico de la sal solar, según las fuentes: rojo [74], verde [47], morado [75].

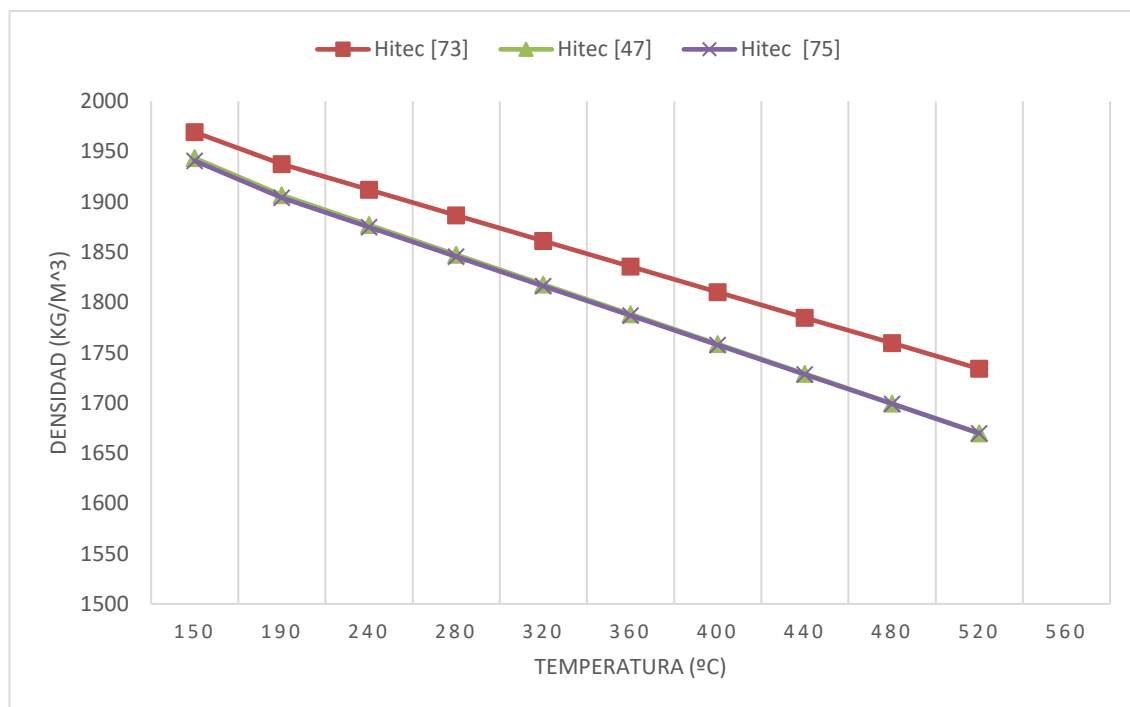


Gráfica 12. Conductividad de la sal solar, según las fuentes: rojo [74], verde [47], morado [75].

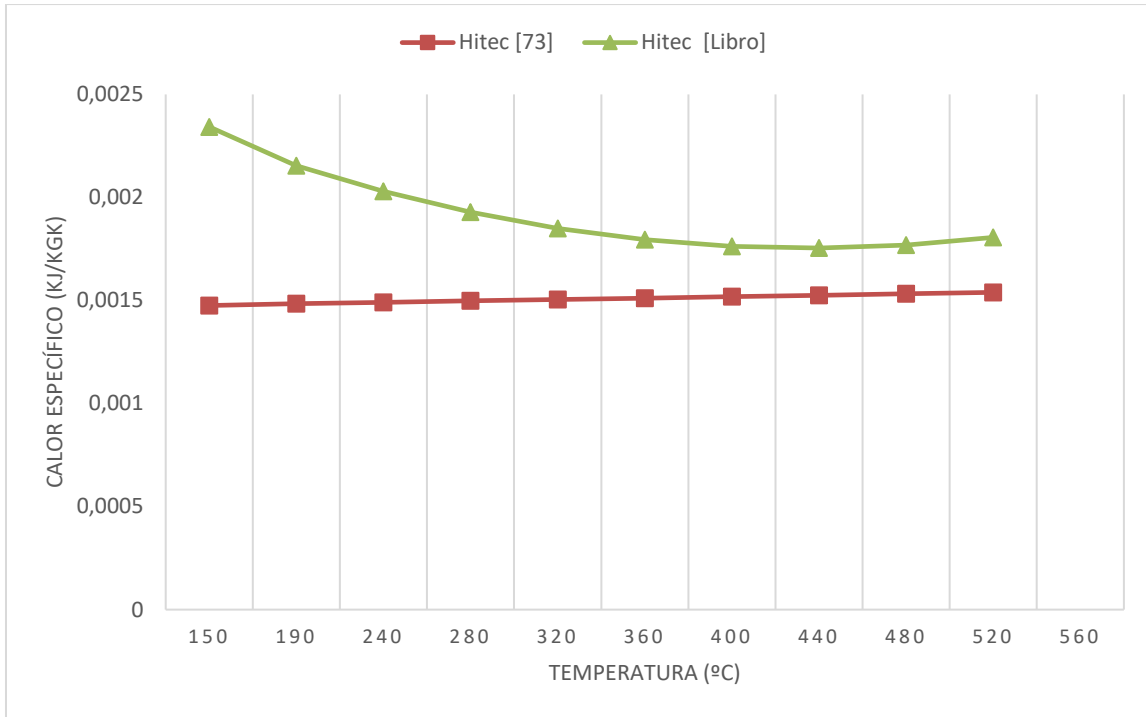
En cuanto a la sal Hitec se refiere, son muchos los estudios experimentales que han analizado las propiedades de este compuesto, en este caso se compararán las diferentes correlaciones proporcionadas por el mismo artículo que ya se ha visto en las gráficas del Therminol VP-1 [47], el artículo [76], un estudio que recopila y analiza las propiedades termo-físicas de diferentes sales fundidas y en el que se comparan igualmente diversas fuentes eligiendo una correlación promedio. También se ha utilizado como referencia un libro que trata los diferentes tipos de almacenamiento térmico [77]. Por último, la tercera fuente pertenece a la base de datos del software informático SAM, System Advisor Model [75], un reconocido simulador de plantas de producción de energías renovables.

La Gráfica 13 muestra la densidad de la sal, donde las tres fuentes presentan la misma tendencia decreciente con la temperatura. Tanto el simulador SAM [75] como el artículo [47] presentan valores prácticamente idénticos, sin embargo, la correlación promedio que ofrece el estudio [73] tiene unos valores algo superiores. Para el calor específico, Gráfica 14, solo se han podido obtener dos correlaciones diferentes, la proporcionada por el artículo [73] y la del libro mencionado [76]. Esto se debe a que numerosos estudios definen el calor específico de la sal Hitec con un valor constante, algo que resulta incongruente. Los valores de esta propiedad que se encuentran en el libro [76] muestra una tendencia decreciente con la temperatura, mientras que los del artículo dibujan una curva levemente creciente.

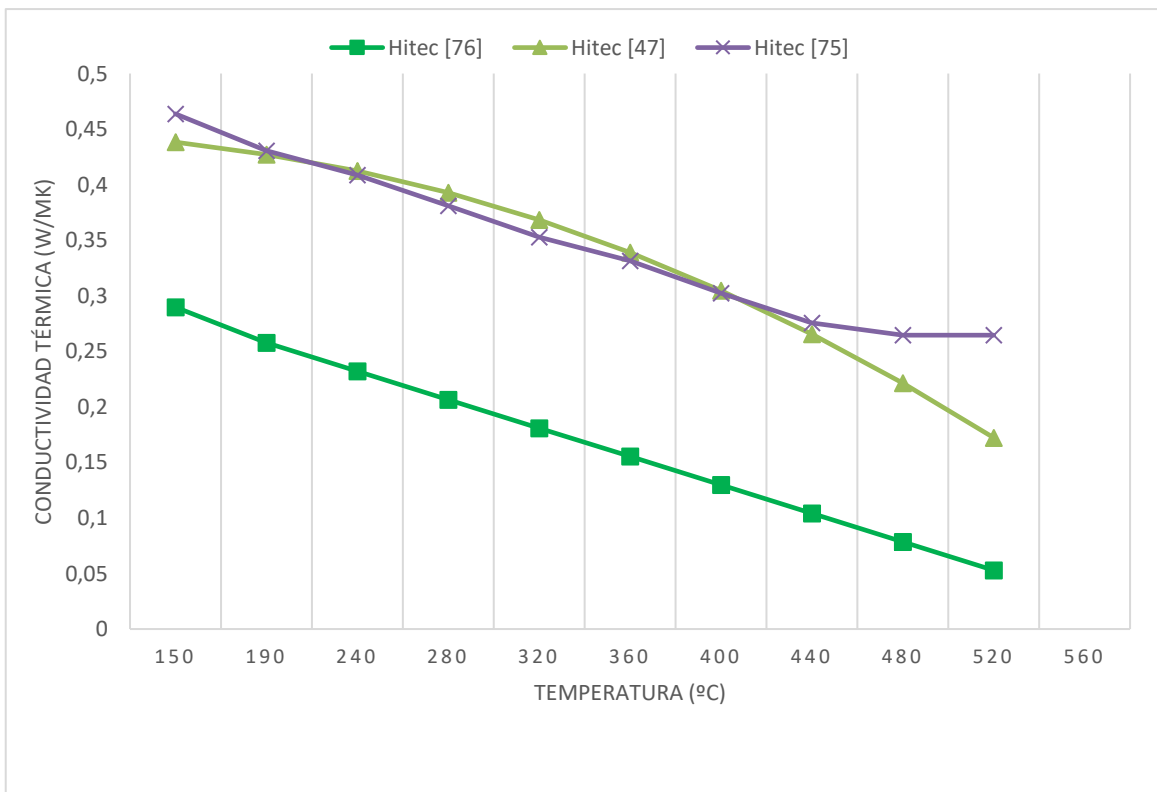
Por último, en lo que a la conductividad térmica de la sal Hitec se refiere, representada en la Gráfica 15, tanto el software [75] como el artículo [47] presentan tendencias parecidas llegando a cortar en algunos puntos de la gráfica. Finalmente, el artículo [76] muestra una curva prácticamente lineal y decreciente muy por debajo de las otras dos.



Gráfica 13. Densidad de la sal Hitec, según las fuentes: rojo [73], verde [47], morado [75].



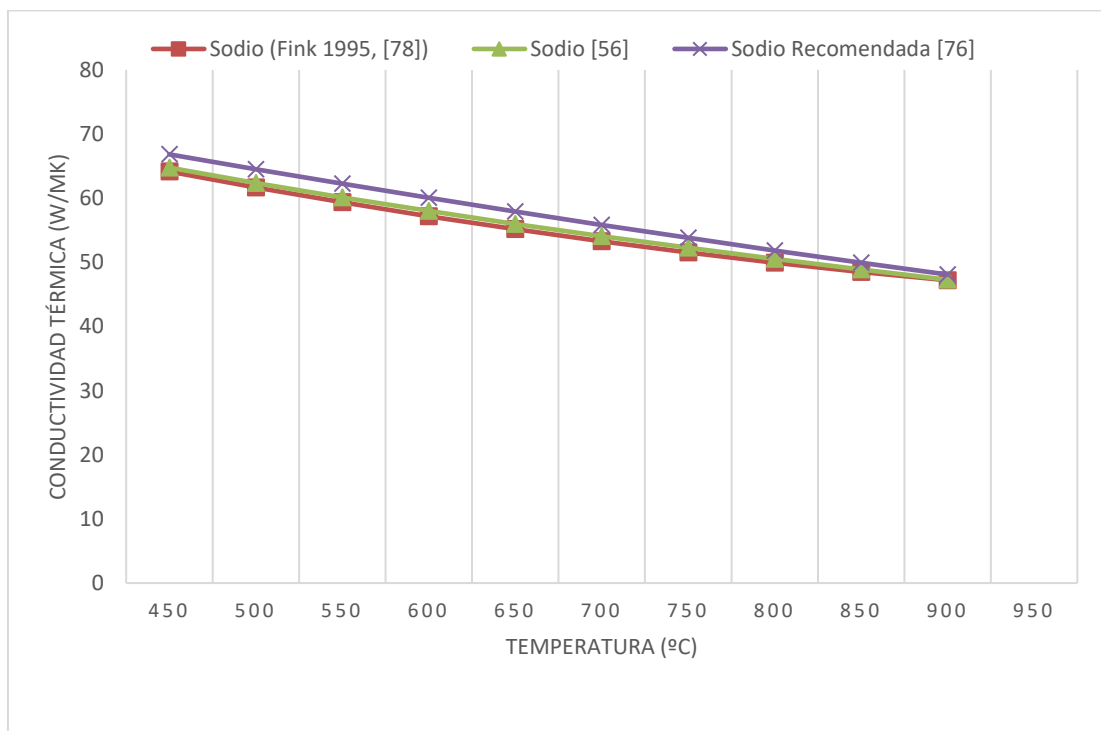
Gráfica 14. Calor específico de la sal Hitec según fuentes; rojo [73], verde [Libro].



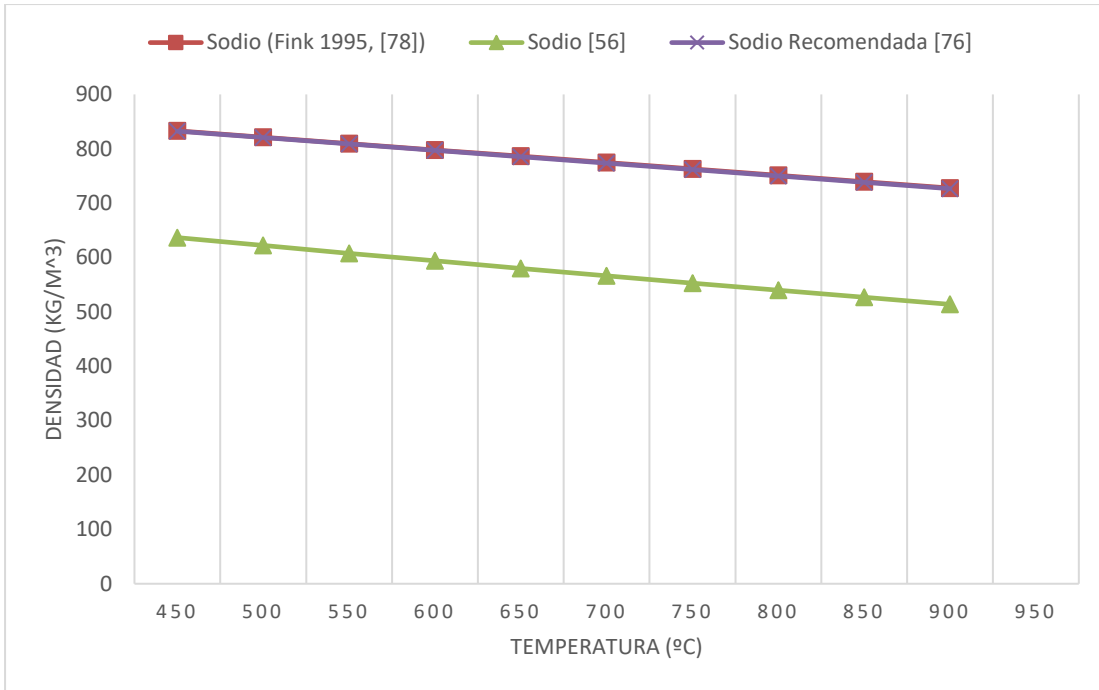
Gráfica 15. Conductividad térmica de la sal Hitec según fuentes; verde oscuro [73], verde [47], morado [75].

Para el análisis del sodio líquido, se han comparado los datos proporcionados por un trabajo en el que se estudian las propiedades de este metal líquido, [78], las correlaciones que se encuentran en el artículo [56] y, de nuevo, una correlación promedio recomendada por un estudio en forma de base de datos que, igual que ocurría con el caso de Hitec, comparaba diversas fuentes para calcular la correlación media más exacta, [76].

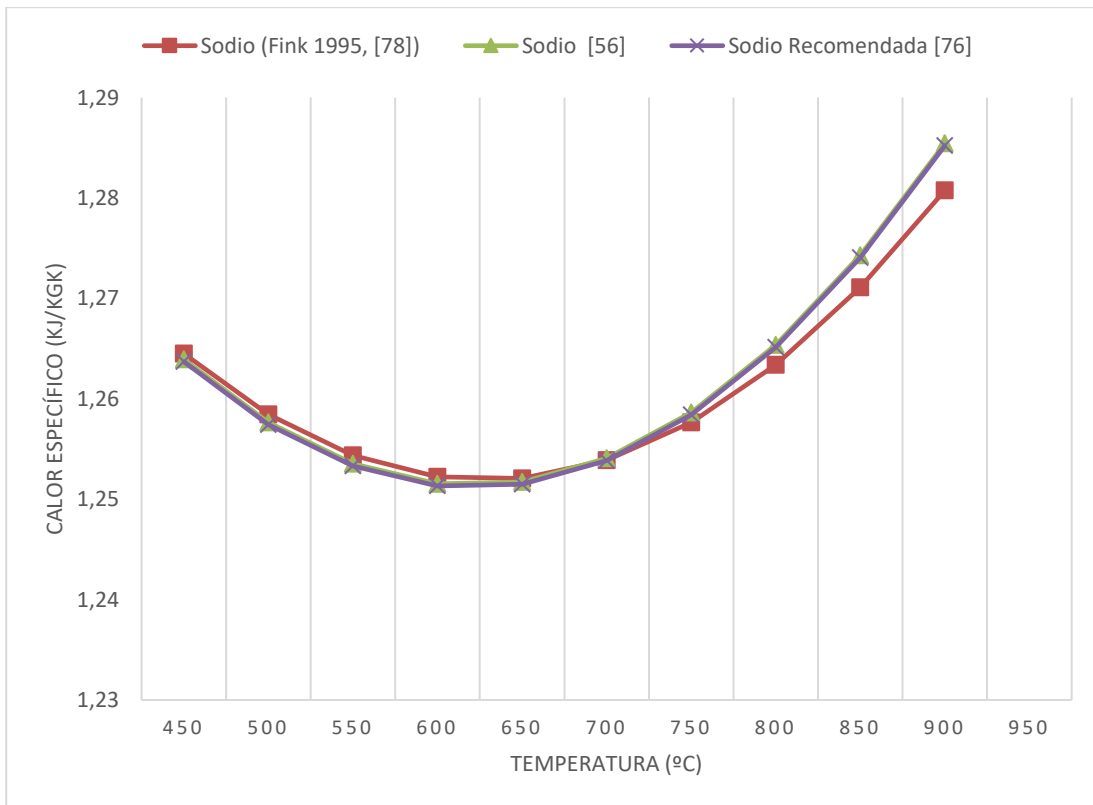
Como se puede ver en la Gráfica 16 los datos ofrecidos por las tres fuentes tienen valores muy parecidos para la conductividad térmica del sodio líquido, que, si bien muestran curvas algo decrecientes con la temperatura, no hay duda de que el sodio líquido posee la mayor conductividad térmica de los fluidos estudiados a lo largo de todo este trabajo. Para la densidad, sin embargo, Gráfica 17, las tres fuentes presentan líneas decrecientes y paralelas entre sí, donde el estudio [78] y la correlación promedio recomendada por la base de datos [76] tienen los mismos valores, pero el artículo [56] tiene unos valores menores pero constantes. Para el calor específico representado en la Gráfica 18 también presentan la misma tendencia las tres curvas, con un mínimo cercano a los 625°C.



Gráfica 16. Conductividad térmica del sodio líquido según fuentes; rojo [78], verde [56], morado [79].



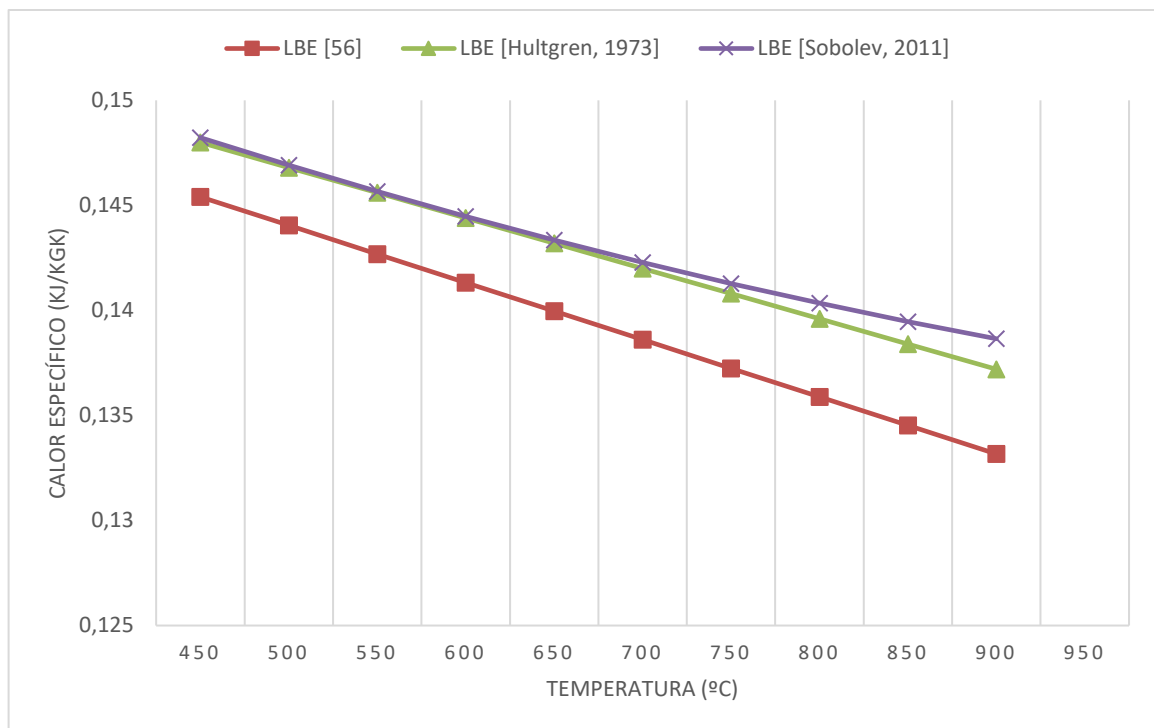
Gráfica 17. Densidad del sodio líquido según fuentes; rojo [78], verde [56], morado [79].



Gráfica 18. Calor específico del sodio líquido según fuentes; rojo [78], verde [56], morado [79].

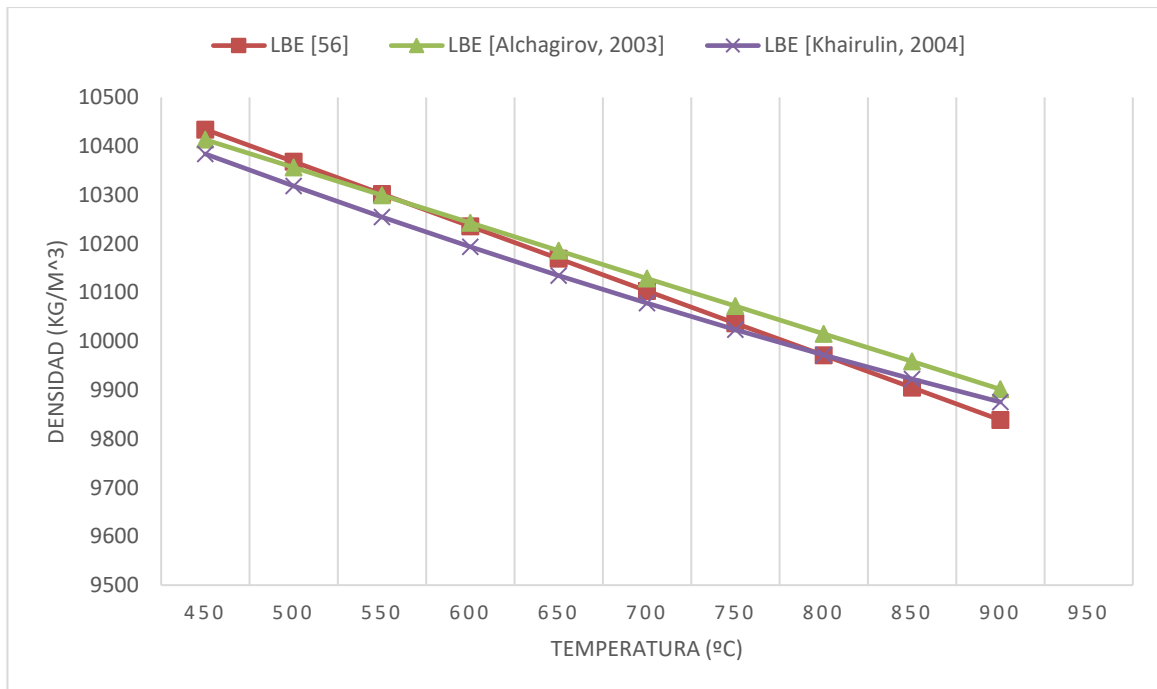
De nuevo, para el análisis comparativo de las propiedades del metal líquido LBE, las correlaciones del artículo [56] están presente en las tres gráficas, sin embargo, debido a la dificultad para encontrar referencias que estudien las mismas propiedades, se han encontrado diferentes autores para las diferentes propiedades.

En cuanto al calor específico de este metal líquido, los estudios experimentales de los autores Hultgren [80] y Sobolev [81] proporcionan valores muy similares mientras que el artículo [56], pese a tener la misma tendencia decreciente en función de la temperatura, presenta unos números más bajos.



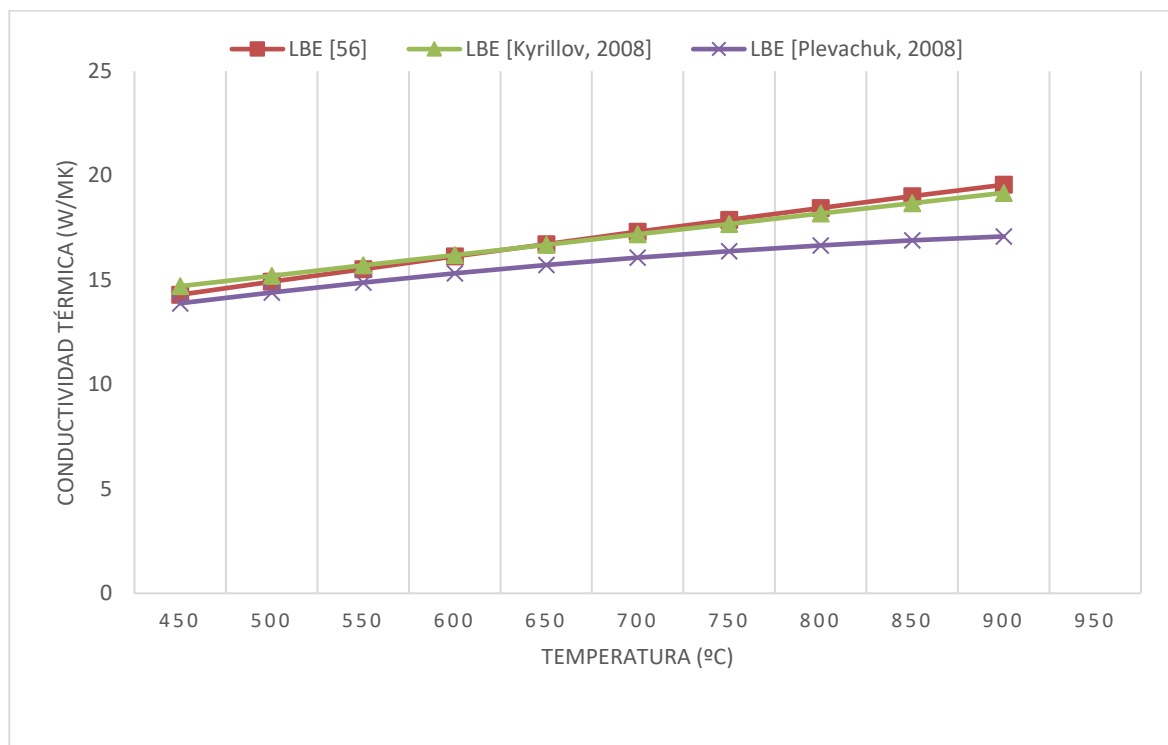
Gráfica 19. Calor específico del LBE según fuentes; rojo [56], verde [80], morado [81].

Por otro lado, en lo que a densidad se refiere, el artículo [56], los estudios de Alcharigov [82] y los de Khirulin [83] son bastante parecidos, si bien el primero tiene una pendiente más inclinada en su tendencia decreciente.



Gráfica 20. Densidad del LBE según fuentes; rojo [56], verde [82], morado [83].

Por último, la Gráfica 21 representa las curvas de la conductividad térmica del metal líquido, donde el artículo [56] y las correlaciones presentadas por los estudios del autor Kyrillov [84], son muy aproximadas; los estudios de Plevachuk [85] presentan la misma tendencia creciente, aunque menos marcada.



Gráfica 21. Conductividad térmica del LBE según fuentes; rojo [56], verde [84], morado [85].

5 CONCLUSIÓN

Es por todos conocido la importancia de la descarbonización en la industria para solventar los problemas medioambientales, donde las energías renovables están teniendo y tendrán un papel fundamental. En este trabajo y dentro del marco de las energías renovables se ha tratado en particular la energía solar de concentración, concretamente uno de sus componentes más importantes, el fluido caloportador. Este fluido cede el calor absorbido por medio de los sistemas de captación a unos intercambiadores para producir un vapor a presiones elevadas que permita generar energía eléctrica a partir de un ciclo de potencia; y evitando así emisiones y residuos contaminantes que perjudiquen al medioambiente.

Las propiedades que caracterizan a un buen fluido caloportador son: buena estabilidad térmica, alta conductividad térmica, baja agresividad frente a los materiales en contacto, baja presión de vapor incluso a altas temperaturas, baja viscosidad, alta densidad de energía, baja toxicidad y bajo impacto ambiental, además de un bajo coste y un índice bajo de pérdidas térmicas.

A lo largo de todo el estudio, se han analizado y comentado los principales tipos de fluidos caloportadores que se utilizan en la industria termosolar; agua, aceites térmicos, sales fundidas, metales líquidos y por último los nanofluidos.

El agua, por su abundancia y elevada conductividad térmica, es el fluido caloportador más utilizado en aplicaciones con rangos de temperaturas relativamente bajos, pues la elevada presión de vapor que posee al superar su temperatura de ebullición limita su uso. A partir de esos valores se hace uso de los aceites térmicos (minerales, sintéticos o con base de silicona), entre los que destacan Therminol VP-1, Dowtherm A o Helisol 5A, capaces de operar a presiones de vapor cercanas a la atmosférica a temperaturas de hasta 400°C.

Desde que se empezó a desarrollar la producción de energía eléctrica a partir de la energía solar, los ingenieros y científicos no han dejado de trabajar para dar con la solución al mayor problema que este tipo de generación posee y que le impedía competir con los métodos de producción de energía convencionales: ser capaz de producir energía ininterrumpidamente, es decir, incluso cuando no exista radiación solar. La solución a este inconveniente han resultado ser las sales fundidas y su aplicación en sistemas de almacenamiento térmico.

El almacenamiento térmico en sales fundidas es el factor determinante y diferenciante de la energía termosolar a escala mundial, ya que con su uso es posible mantener almacenado el calor obtenido por los sistemas de captación durante las horas de mayor radiación solar y utilizarlo cuando esta no sea posible (por la noche). Aquí la importancia del estudio de estos fluidos, pues el almacenamiento térmico es el mejor argumento a favor de la tecnología termosolar cuando se comparan con otras fuentes de energías renovable a priori más simples y baratas como la eólica o la fotovoltaica. Esta gran ventaja de las plantas CSP, es gracias a la alta capacidad calorífica que poseen las sales fundidas, como pueden ser la sal solar, Hitec o Hitec XL, y que les permite conservar la energía en volúmenes no muy grandes.

En cuanto a los metales líquidos se refiere, en el estudio se muestra que son los fluidos HTF que poseen una mayor conductividad térmica, y con mucha diferencia con respecto a los demás. Destacando esta propiedad el sodio líquido es el que resulta más interesante, sin embargo, es altamente tóxico al contacto con el aire por lo que en caso de utilización deberá estar totalmente aislado en el sistema y su baja capacidad térmica supondría grandes volúmenes de materia, sin ser precisamente un compuesto económico.

La tendencia de los nuevos fluidos caloportadores, como ya se mencionó en el apartado del análisis de datos, es desarrollar compuestos con mejores estabilidades térmicas, que sean capaces de trabajar en grandes rangos de temperatura sin sufrir degradaciones ni perder sus propiedades, y son precisamente los metales líquidos los que poseen las mayores estabilidades térmicas. Por ello será cuando se empiecen a desarrollar plantas CSP que operen a temperaturas muy elevadas, cercanas a los 1000°C, cuando probablemente más partido y rendimiento se le pueda sacar a estos metales líquidos, como el ya mencionado sodio líquido o el LBE. Incluso, se podría hablar de almacenamiento térmico en metales líquidos, pues la capacidad calorífica de estos aumenta con la temperatura, pudiendo reducir el volumen de materia necesario.

Los nanofluidos por otro lado, son aún un gran desconocido, es una tecnología muy novedosa todavía y son necesarios estudios tanto teóricos como experimentales que arrojen luz sobre el uso de estos como fluido

caloportador. Sin duda poseen excelentes propiedades termo-físicas que los convierte en excelentes candidatos para el futuro, como es la elevada conductividad térmica, la mayor superficie de transmisión de calor o las propiedades ajustables según las necesidades operativas; sin embargo, hay que seguir estudiándolos para profundizar en las consecuencias de sus aplicaciones y mejorar sus inconvenientes. Entre ellos, la viscosidad que produce añadir nanopartículas (cuyos materiales tienden a ser perjudiciales, como el carbón) al fluido base o las posibles dificultades que acarrearán el tamaño de estas nanopartículas.

Después de todo lo comentado a lo largo de este trabajo, probablemente la mejor opción como fluido caloportador para un rango de temperaturas de operación de hasta unos 400°C sea el aceite térmico con base en silicona Helisol 5A. Si bien es verdad que todavía es una novedad en el campo, y que como se vio en la Ilustración 18. y la Gráfica 5. sus propiedades térmicas siguen siendo similares a las de otros aceites, otras características como son principalmente la elevada estabilidad térmica que posee, así como la nula toxicidad, su larguísima vida útil (apenas se ve afectada su composición después de largos periodos de funcionamiento) y su escaso nivel de mantenimiento hacen que se posicionen como el candidato número uno para dicho rango.

Por otro lado, para un rango de entre 400°C y 600°C sin duda la mejor opción son las sales fundidas, principalmente por su capacidad calorífica, propiedad que hace posible el almacenamiento térmico. De entre ellas destacar Hitec o Hitec XL por encima de la sal solar, es cierto que poseen un límite de temperatura máximo de trabajo menor que el de la sal solar, pero este inconveniente queda compensado ya que son más baratas y tienen un punto de fusión bastante más bajo, lo que facilita mucho paliar los problemas de congelación.

Igualmente, los metales líquidos también podrían actuar en el anterior rango de temperaturas, pero no saldría rentable debido a su elevado precio y a las medidas de seguridad que necesitan, por supuesto a esas temperaturas no podrían actuar como almacenamiento térmico, por lo que no serían nada rentables. Por ello y como se ha mencionado anteriormente no se les podrá sacar todo su potencial hasta que no se empiecen a desarrollar plantas que trabajen a temperaturas aún mayores, donde por supuesto serán la mejor opción por su elevadísima estabilidad térmica y potencial como futuro fluido de almacenamiento térmico.

Finalmente, y con toda la información recogida a lo largo de este estudio, queda claro que no es posible elegir un único fluido caloportador capaz de satisfacer las diferentes aplicaciones de la industria. Cada fluido tiene unas propiedades, unas ventajas y unos inconvenientes diferentes; por lo que siempre existirá uno, el más adecuado para ese caso que maximice la eficiencia del ciclo para el que ha sido seleccionado. Para ello, serán necesarios multitud de estudios y simulaciones, que comparen las diferentes opciones hasta dar con el más óptimo en cada caso.

REFERENCIAS

- [1] “Calor de Proceso.” http://www.cph.uson.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=10:calor-de-proceso&catid=4:temasdeinvestigacion&Itemid=18 (accessed Mar. 24, 2022).
- [2] K. Vignarooban, X. Xu, A. Arvay, K. Hsu, and A. M. Kannan, “Heat transfer fluids for concentrating solar power systems – A review,” *Applied Energy*, vol. 146, pp. 383–396, May 2015, doi: 10.1016/J.APENERGY.2015.01.125.
- [3] “Circuitos y calderas de fluido térmico en centrales termosolares | Pirobloc.” <https://www.pirobloc.com/aplicaciones-y-sectores/produccion-de-energia-solar/> (accessed Mar. 24, 2022).
- [4] “Caloportador - Wikipedia, la enciclopedia libre.” <https://es.wikipedia.org/wiki/Caloportador> (accessed Mar. 24, 2022).
- [5] R. Párraga, C. Tutor, and C. Prieto, “Trabajo Fin de Grado Ingeniería de la Energía Pasado, presente y futuro de la sal solar en CSP.”
- [6] “Sistemas de fluido térmico: la guía completa - Pirobloc.” <https://www.pirobloc.com/sistemas-de-fluido-termico-la-guia-completa/#cap2> (accessed Mar. 24, 2022).
- [7] “Aceite térmico mineral - Pirobloc.” <https://www.pirobloc.com/blog-es/aceite-termico-mineral/> (accessed Mar. 24, 2022).
- [8] G. de Termotecnia, “2. FLUIDOS CALOPORTADORES INSTALACIONES TÉRMICAS INDUSTRIALES.”
- [9] “Conductividad térmica - Wikipedia, la enciclopedia libre.” https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_t%C3%A9rmica (accessed Apr. 07, 2022).
- [10] M. Teresa *et al.*, “Estudio de nuevos fluidos caloportadores y de almacenamiento térmico y su compatibilidad con materiales de construcción en plantas termosolares”.
- [11] “Presión de vapor - EcuRed.” https://www.ecured.cu/Presi%C3%B3n_de_vapor (accessed Apr. 07, 2022).
- [12] T. Fin De Carrera and E. C. Simonneau, “ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN UNIVERSIDAD DE CANTABRIA”.
- [13] “Número de Prandtl - Wikipedia, la enciclopedia libre.” https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Prandtl (accessed May 23, 2022).
- [14] “Número de Prandtl - Wikipedia, la enciclopedia libre.” https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Prandtl (accessed Apr. 07, 2022).
- [15] W. (Wei) Shyy, “Aerodynamics of low Reynolds number flyers,” p. 177, 2008.
- [16] “Pérdidas por Fricción en Tuberías – Fesmex.” <https://www.fesmex.com.mx/article/p%C3%A9rdidas-por-friccion-en-tuberias/> (accessed May 20, 2022).
- [17] H. Benoit, L. Spreafico, D. Gauthier, and G. Flamant, “Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 298–315, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.10.059.
- [18] “Número de Nusselt - Wikipedia, la enciclopedia libre.” https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Nusselt (accessed May 23, 2022).
- [19] “El Agua como Fluido Caloportador | ESIngenieria.pro.” <https://esingenieria.pro/el-agua-como-fluido-caloportador/> (accessed Mar. 24, 2022).

- [20] “capitulo4”.
- [21] A. Giglio, A. Lanzini, P. Leone, M. M. Rodríguez García, and E. Zarza Moya, “Direct steam generation in parabolic-trough collectors: A review about the technology and a thermo-economic analysis of a hybrid system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 453–473, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.01.176.
- [22] A. Fernández-García, E. Zarza, L. Valenzuela, and M. Pérez, “Parabolic-trough solar collectors and their applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 1695–1721, Sep. 2010, doi: 10.1016/J.RSER.2010.03.012.
- [23] José Solé Busquet, *Fluido Caloportador. Aceite Térmico*. 2016.
- [24] “(1) CONTAMINACIÓN DEL SUBSUELO EN CENTRALES TERMOSOLARES | LinkedIn.” <https://www.linkedin.com/pulse/contaminaci%C3%B3n-del-subsuelo-en-centrales-termsolares-ram%C3%ADrez-orozco/?originalSubdomain=es> (accessed Apr. 04, 2022).
- [25] “¿Cuál es el mejor tipo de fluido de transferencia de calor? - Pirobloc.” <https://www.pirobloc.com/blog-es/cual-es-el-mejor-tipo-de-fluido-de-transferencia-de-calor/> (accessed May 23, 2022).
- [26] “Características del aceite térmico - Pirobloc.” <https://www.pirobloc.com/blog-es/aceite-termico/> (accessed Mar. 24, 2022).
- [27] “Mobiltherm 603.” <https://www.mobil.com.mx/es-mx/lubricantes/industrial/lubricants/products/products/mobiltherm-603> (accessed May 25, 2022).
- [28] A. Ullah, A. Mushtaq, R. A. Qamar, and Z. U. Ali, “Performance analysis and modeling of parabolic trough based concentrated solar facility using different thermal fluid mediums,” *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, vol. 9, no. 1, pp. 13–50, Feb. 2021, doi: 10.36909/JER.V9I1.8605.
- [29] R. Malviya, A. Agrawal, and P. v. Baredar, “A comprehensive review of different heat transfer working fluids for solar thermal parabolic trough concentrator,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 5490–5500, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.09.240.
- [30] “Heat Transfer Fluids By Vapour Phase Liquid Phase Heat Transfer Fluid 12°C to 400°C”.
- [31] “Therminol VP-1 Heat Transfer Fluid | Therminol | Eastman.” <https://www.therminol.com/product/71093459?pn=Therminol-VP-1-Heat-Transfer-Fluid> (accessed Mar. 31, 2022).
- [32] “What is Therminol VP-1?. Therminol VP-1 is a clear colorless... | by Roberto Baldizon | Luszol | Medium.” <https://medium.com/luszol/what-is-therminol-vp-1-3bd9bd131fe8> (accessed Apr. 04, 2022).
- [33] H. Benoit, L. Spreafico, D. Gauthier, and G. Flamant, “Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 298–315, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.10.059.
- [34] “Therminol 66 Heat Transfer Fluid | Therminol | Eastman.” <https://www.therminol.com/product/71093438?pn=Therminol-66-Heat-Transfer-Fluid> (accessed Apr. 01, 2022).
- [35] “Therminol 66 Heat Transfer Fluid | Therminol | Eastman.” <https://www.therminol.com/product/71093438?pn=Therminol-66-Heat-Transfer-Fluid> (accessed Apr. 01, 2022).
- [36] “DOWTHERM™ A Heat Transfer Fluid | Dow Inc.” <https://www.dow.com/es-es/pdp.dowtherm-a-heat-transfer-fluid.238000z.html> (accessed Apr. 05, 2022).
- [37] “HELISOL® 5A-HEAT TRANSFER FLUID Extended Technical Data Extended Technical Data HELISOL® 5A.”
- [38] C. Jung, J. Dersch, A. Nietsch, and M. Senholdt, “Technological Perspectives of Silicone Heat Transfer Fluids for Concentrated Solar Power,” *Energy Procedia*, vol. 69, pp. 663–671, May 2015, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.03.076.

- [39] R. I. Dunn, P. J. Hearps, and M. N. Wright, “Molten-salt power towers: Newly commercial concentrating solar storage,” in *Proceedings of the IEEE*, 2012, vol. 100, no. 2, pp. 504–515. doi: 10.1109/JPROC.2011.2163739.
- [40] Ú. Desarrollos, “Tecnología de Almacenamiento de CSP.”
- [41] S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, and E. K. Stefanakos, “Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, no. 4, pp. 285–319, Aug. 2013, doi: 10.1016/J.PECS.2013.02.001.
- [42] “Gemasolar - Wikipedia, la enciclopedia libre.” <https://es.wikipedia.org/wiki/Gemasolar> (accessed May 12, 2022).
- [43] V. M. B. Nunes, C. S. Queirós, M. J. V. Lourenço, F. J. V. Santos, and C. A. Nieto de Castro, “Molten salts as engineering fluids – A review: Part I. Molten alkali nitrates,” *Applied Energy*, vol. 183, pp. 603–611, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.09.003.
- [44] “Instalaciones de sales fundidas para la industria | °LAUDA.” <https://www.lauda.de/es/sistemas-individuales/sistemas-industriales-de-calefaccion-y-refrigeracion/instalaciones-de-sales-fundidas> (accessed Mar. 24, 2022).
- [45] A. Bonk, S. Sau, N. Uranga, M. Hernaiz, and T. Bauer, “Advanced heat transfer fluids for direct molten salt line-focusing CSP plants,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 67, pp. 69–87, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.PECS.2018.02.002.
- [46] “Univertidad Jaume I.”
- [47] Y. Krishna, M. Faizal, R. Saidur, K. C. Ng, and N. Aslfattahi, “State-of-the-art heat transfer fluids for parabolic trough collector,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 152, p. 119541, May 2020, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2020.119541.
- [48] T. Wang, D. Mantha, and R. G. Reddy, “Novel low melting point quaternary eutectic system for solar thermal energy storage,” *Applied Energy*, vol. 102, pp. 1422–1429, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.APENERGY.2012.09.001.
- [49] X. Xu, G. Dehghani, J. Ning, and P. Li, “Basic properties of eutectic chloride salts NaCl-KCl-ZnCl₂ and NaCl-KCl-MgCl₂ as HTFs and thermal storage media measured using simultaneous DSC-TGA,” *Solar Energy*, vol. 162, pp. 431–441, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.SOLENER.2018.01.067.
- [50] A. G. Fernández and L. F. Cabeza, “Corrosion evaluation of eutectic chloride molten salt for new generation of CSP plants. Part 1: Thermal treatment assessment,” *Journal of Energy Storage*, vol. 27, p. 101125, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.EST.2019.101125.
- [51] P. P. Luque and J. P. Lucena, “Análisis de los Aplicación como Análisis de los Nanofluidos y su plicación como Fluido HTF.”
- [52] T. Aguilar, I. Carrillo-Berdugo, P. Martínez-Merino, A. Yasinskiy, M. Rodríguez-Fernández, and J. Navas, “Improving stability and thermal properties of TiO₂-based nanofluids for concentrating solar energy using two methods of preparation,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2020 144:3*, vol. 144, no. 3, pp. 895–905, Apr. 2020, doi: 10.1007/S10973-020-09615-W.
- [53] N. A. Che Sidik, M. Mahmud Jamil, W. M. A. Aziz Japar, and I. Muhammad Adamu, “A review on preparation methods, stability and applications of hybrid nanofluids,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 1112–1122, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.05.221.
- [54] G. Oswaldo and B. Garcia, “Preparation and characterization of graphene and functionalized carbon nanotubes nanofluids for use in heat transfer processes.”
- [55] K. H. Solangi *et al.*, “A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids,” *Energy*, vol. 89, pp. 1065–1086, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.ENERGY.2015.06.105.
- [56] M. Lomascolo, G. Colangelo, M. Milanese, and A. de Risi, “Review of heat transfer in nanofluids: Conductive, convective and radiative experimental results,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 1182–1198, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2014.11.086.

- [57] E. Sadeghinezhad *et al.*, “A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications,” *Energy Conversion and Management*, vol. 111, pp. 466–487, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2016.01.004.
- [58] “Efecto-de-distintos-nanofluidos-en-la-absorcion-de-radiacion-solar”.
- [59] “TFG_ALBERTO_GONZALEZ_SANCHEZ”.
- [60] P. Fin De Carrera, “Equation Chapter 1 Section 1”.
- [61] J. Pacio and T. Wetzel, “Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems,” *Solar Energy*, vol. 93, pp. 11–22, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.SOLENER.2013.03.025.
- [62] P. Fin De Carrera, “Equation Chapter 1 Section 1”.
- [63] “TFG_Daniel_Lopez_Dalmau_2017”.
- [64] N. Boerema, G. Morrison, R. Taylor, and G. Rosengarten, “Liquid sodium versus Hitec as a heat transfer fluid in solar thermal central receiver systems,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2293–2305, Sep. 2012, doi: 10.1016/J.SOLENER.2012.05.001.
- [65] J. K. Fink and L. Leibowitz, “Thermodynamic and Transport Properties of Sodium Liquid and Vapor.”
- [66] J. P. Kotzé, T. W. von Backström, and P. J. Erens, “NaK as a primary heat transfer fluid in thermal solar power installations.”
- [67] A. Loizaga Barea, F. Javier, and P. Lucena, “Equation Chapter 1 Section 1 Proyecto Fin de Máster.”
- [68] O.J. Foust, “Sodium-NaK engineering handbook, Liquid metal engineering centre,” New York, 1972.
- [69] V. Sobolev, “Thermophysical properties of lead and lead–bismuth eutectic,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 362, no. 2–3, pp. 235–247, May 2007, doi: 10.1016/J.JNUCMAT.2007.01.144.
- [70] J. Pacio, C. Singer, T. Wetzel, and R. Uhlig, “Thermodynamic evaluation of liquid metals as heat transfer fluids in concentrated solar power plants,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 60, no. 1–2, pp. 295–302, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2013.07.010.
- [71] “Therminol VP-1 Heat Transfer Fluid | Therminol | Eastman.” <https://www.therminol.com/product/71093459> (accessed Jun. 02, 2022).
- [72] A. Mwesigye, İ. H. Yilmaz, and J. P. Meyer, “Numerical analysis of the thermal and thermodynamic performance of a parabolic trough solar collector using SWCNTs-Therminol®VP-1 nanofluid,” *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 844–862, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.RENENE.2017.10.047.
- [73] Andrea Giotri, “Trasient effects in linear concentrating solar thermal power plant,” Politecnico di Milano, 2014.
- [74] R. Serrano-ópez, J. Fradera, and S. Cuesta-López, “Molten salts database for energy applications,” *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 73, pp. 87–102, Nov. 2013, doi: 10.1016/J.CEP.2013.07.008.
- [75] “System Advisor Model.”
- [76] Y. T. Wu, C. Chen, B. Liu, and C. F. Ma, “Investigation on forced convective heat transfer of molten salts in circular tubes,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 39, no. 10, pp. 1550–1555, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2012.09.002.
- [77] C. C. Pei-Wen Li, *Thermal Energy Storage Analyses and Designs*.
- [78] L. L. Fink J.K., “Thermodynamic and transport properties of sodium liquid and vapour,” Argonne, Illinois, 1995.
- [79] Vitaly Sobolev, “Database of thermophysical properties of liquid metal coolants for GEN-IV,” Mol, 2011.
- [80] R. Hultgren, “Selected Values of the Thermodynamic Properties of the Elements,” 1973.

-
- [81] V. Sobolev, "Thermodynamic equations of state for heavy liquid metal coolants," *Fifth edition of the International workshop on materials for HLM-cooled reactors and related technologies*, 2009.
- [82] B. B. Alchagirov, "High Temperature," 2004.
- [83] R. A. Khairulin, "J. Alloys and Compounds," 2005.
- [84] Kirillov, "Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data," *IAEA*, 2008.
- [85] Yu. Plevachuk, "J. Nucl. Mater.," 2008.