



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Desempeño energético de un
colector solar cilindro-parabólico
empleando diferentes fluidos
caloportadores**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

David Adrián Guzmán Rivas

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Sergio Quezada García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DESEMPEÑO ENERGETICO DE UN COLECTOR SOLAR CILINDRO-PARABOLICO EMPLEANDO DIFERENTES FLUIDOS CALOPORTADORES que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

DAVID ADRIAN GUZMAN RIVAS
Número de cuenta: 420055264

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a mis padres, Adriana Rivas y Samuel Guzmán, por haberme enseñado la disciplina, constancia, responsabilidad y dedicación a cada trabajo que hago. También por siempre apoyarme, guiarme y aconsejarme, para tomar las mejores decisiones. Ellos han sido la luz de mi camino y este logro es gracias a ellos.

Agradecimientos

A mi hermana, Leslie y mi prima Ximena, por apoyarme en todo momento.

A mis amigos Daniel Hernández y Luis González, que son personas admirables y muy trabajadoras, un verdadero ejemplo a seguir. Con ellos pasé los mejores momentos en la universidad y ha sido una amistad de mutuo apoyo.

A Mizraim Bonilla y Alison Pérez, por haberme ayudado en varias materias que cursé, gracias a ellos pude entender muchos temas.

A Yanni Martínez, por ser un gran amigo y orientarme en el proceso de elegir mi carrera.

A mi asesor, el Dr. Sergio Quezada por su gran vocación a la enseñanza.

Resumen

Se estima que en México la irradiación solar oscila entre 3 kWh/m²/día y 8.5 kWh/m²/día. La energía solar térmica puede ser aprovechada por colectores solares cilindro-parabólico (CSCP) que tengan como propósito la recolección de energía solar, para transferirla a un fluido caloportador. Idealmente, el CSCP funciona de manera que exista la máxima conducción de calor entre el colector y el fluido caloportador. El objetivo del presente trabajo es evaluar, por medio del modelado matemático y la simulación con Python 3.13, el desempeño térmico de un CSCP utilizando como fluidos caloportadores agua, sodio líquido, sal fundida Hitec, sal fundida Hitec con aditivo Ca(NO₃)₂ y sal solar; para determinar los fluidos caloportadores que maximizan su eficiencia energética. El CSCP alcanza la mayor eficiencia (0.80) con agua (a 10 MPa); mientras que, la menor eficiencia del CSCP se presenta con la sal solar con un valor máximo de 0.69.

Contenido

Dedicatoria	1
Agradecimientos.....	2
Resumen	3
1. Introducción	6
1.1 Energía solar fotovoltaica	8
1.2 Energía solar fototérmica.....	10
1.3 Objetivo.....	10
2. Colectores solares.....	11
2.1 Colectores no concentradores	11
2.2 Colectores concentradores	12
3. Colector solar cilindro-parabólico (CSCP)	14
3.1 Fluido caloportador.....	16
3.1.1 Agua.....	17
3.1.2 Sales fundidas.....	17
3.1.3 Metales líquidos	18
4. Modelo matemático	20
4.1 Descripción del sistema	20
4.2. Fenomenología.....	20
5. Verificación	27
6. Casos de estudio	29
6.1 Propiedades de los fluidos caloportadores.....	29
6.1.1 Sodio líquido	29
6.1.2 Sal fundida Hitec	33
6.1.3 Sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	35
6.1.4 Sal solar	38

6.2 Implementación y resultados	41
6.3 Discusión	46
7. Conclusión.....	47
Referencias	48

1. Introducción

Las reacciones termonucleares que ocurren en el interior del Sol dan como resultado la emisión de radiación electromagnética que viaja a través del vacío hasta finalmente llegar a la Tierra. Gracias a este fenómeno la Tierra tiene todos sus recursos energéticos, directa o indirectamente (sin incluir a la energía nuclear, mareomotriz y geotérmica). De la gran variedad de energías renovables, la de mayor presencia en la Tierra es la energía solar y se manifiesta en forma de calor y luz (Sarbu & Sebarchievici, 2013).

La constante solar es el valor que señala la afluencia de radiación solar, el valor medio de este término es 1368 W/m^2 (Sarbu & Sebarchievici, 2013). Mientras que, el valor medio de la tasa de energía interceptada por la Tierra es de aproximadamente $1.8 \times 10^{14} \text{ kW}$ con una tasa de emisión del Sol de $3.8 \times 10^{23} \text{ kW}$. Sin embargo, a medida que se propaga la radiación solar una parte se pierde en la atmósfera por dispersión, reflexión y absorción de las nubes (Kannan & Vakeesan, 2016).

El valor teórico global más alto de radiación solar por año oscila entre 2300 kWh/m^2 y 2500 kWh/m^2 (ver **Figura 1**) y las regiones con la mayor irradiación disponible son las siguientes (Kontrosh et al., 2021):

- Norte y sur de África
- Península Arábiga
- México
- Brasil
- Estados Unidos de América
- El Caribe
- El Mediterráneo

Cabe resaltar que existen algunos lugares como el este de África, la región Andina y el Himalaya, donde el potencial se puede incrementar entre 2700 kWh/m^2 y 2900 kWh/m^2 , por factores como la delgadez y transparencia de la atmósfera. Por otra parte, la región con menor potencial es el cinturón ecuatorial, debido a que presenta periodos con nubosidad a lo largo del año. Aunque pueden presentarse otros factores como el menor ángulo de inclinación de los rayos solares y la concentración de aerosoles, como es el caso de la India y partes de China, respectivamente (Kontrosh et al., 2021).

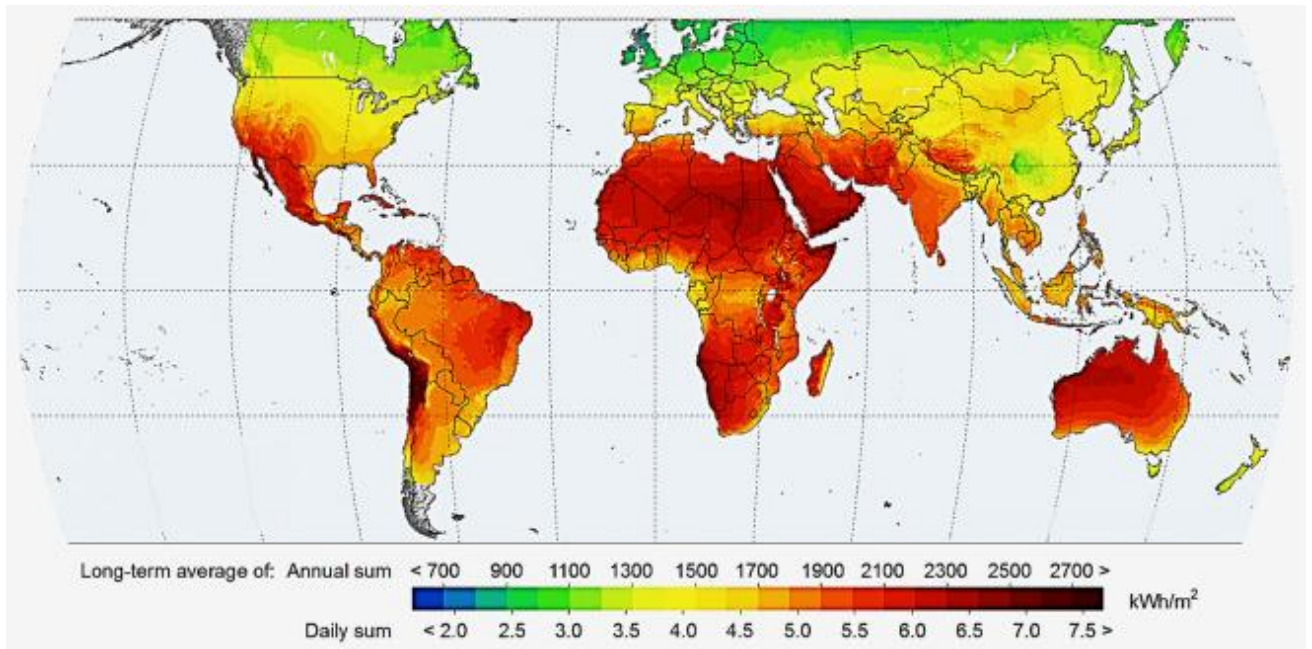


Figura 1. Mapa global de irradiación horizontal (Kannan & Vakeesan, 2016).

México posee una característica ideal para aprovechar la energía solar, teniendo en cuenta que geográficamente se localiza entre los 14° y 33° de latitud septentrional, posicionándolo como uno de los países con mayor potencial en el mundo.

Se tiene una estimación de aprovechamiento de irradiación de 5.5 kWh/m²/día; sin embargo, este valor varía dependiendo de la región del país y de la temporada del año; de tal manera que puede oscilar entre 3 kWh/m²/día y 8.5 kWh/m²/día (Ortega-Navarro & Valle-Pereña, 2025).

Tomando en cuenta que para determinar la distribución de la insolación en México se considera la cantidad promedio de días despejados y nublados, las regiones con mayor aprovechamiento son el noroeste y norte, como se muestra en la **Figura 2**.

Por otra parte, se reduce considerablemente al sureste y en la costa del Golfo de México, debido a la presencia de mayor nubosidad anual (Ortega-Navarro & Valle-Pereña, 2025).

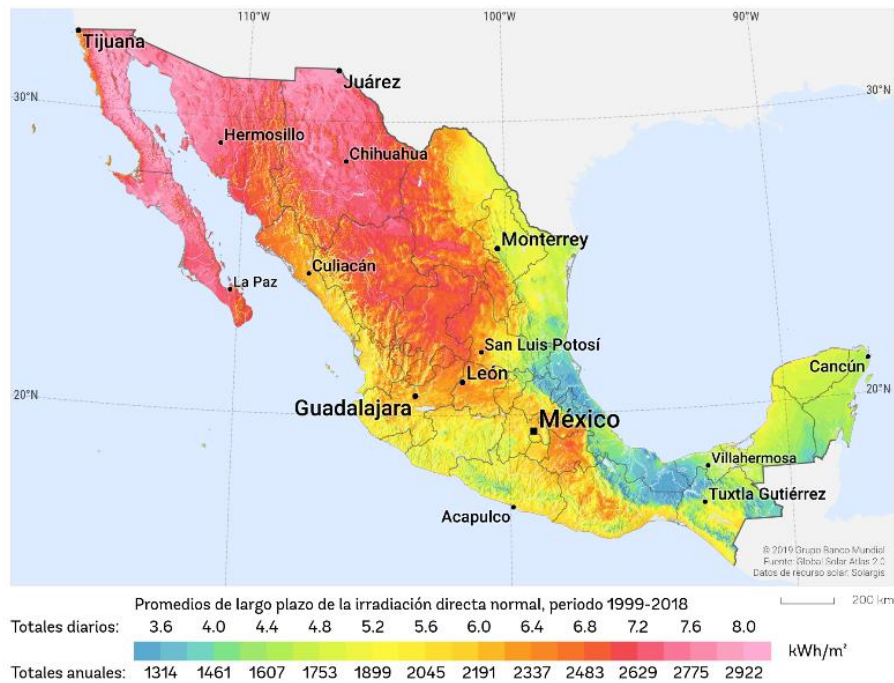


Figura 2. Mapa de recursos solares (Solargis, 2025).

Con base en la información recolectada, se muestra que existe un gran potencial en energía solar, a nivel mundial y particularmente en México, de manera que sería útil aprovecharlo para innumerables aplicaciones. Básicamente, existen dos tipos de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar: tecnología fotovoltaica y tecnología fototérmica.

1.1 Energía solar fotovoltaica

Para la tecnología fotovoltaica se aprovecha el efecto fotoeléctrico, ya que se transforma la radiación solar en electricidad, empleando materiales semiconductores. Este tipo de sistemas son los más utilizados a nivel mundial, dado a su alta confiabilidad, bajos costos de operación y mantenimiento (Elaouzy & El Fadar, 2024).

Este tipo de sistemas son muy versátiles en cuanto a los distintos lugares que se pueden instalar, aunque su eficiencia varía por los siguientes factores (Elaouzy & El Fadar, 2024):

- Radiación solar local

- Temperatura ambiente
- Equipo empleado
- Orientación y ángulo de los módulos solares
- El albedo del terreno
- Presencia de sombras

Como se aprecia en la **Figura 3**, el territorio nacional se encuentra privilegiado en poseer una amplia zona con un alto potencial fotovoltaico; sin embargo, no es aprovechado. De acuerdo con datos del Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) del año de 2024, la generación de energía eléctrica en 2023 mediante plantas de energía solar fotovoltaica fue del 18,147.462 GWh, lo que representa el 5.16 % de toda la energía que se genera. Mientras que; en la generación distribuida, la cual consiste en la generación de energía eléctrica a pequeña escala y con ciertos requisitos técnicos y legales, fue del 1.48 % (SENER, 2025).

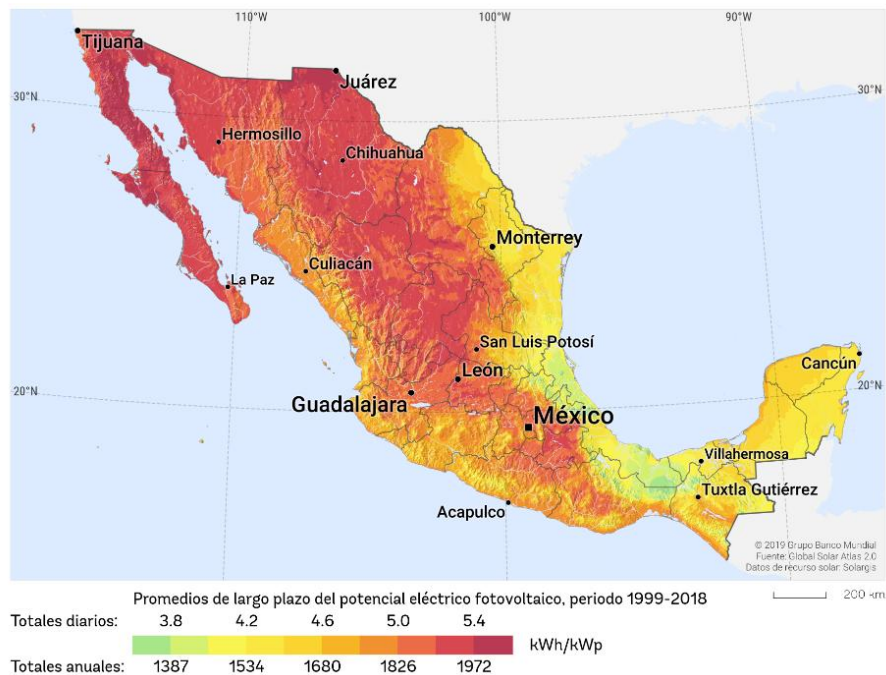


Figura 3. Mapa del potencial eléctrico fotovoltaico (Solargis, 2025).

1.2 Energía solar fototérmica

La energía solar fototérmica utiliza la radiación solar para convertirla en calor, mediante colectores solares (Machi et al., 2024). Estos dispositivos tienen como propósito fundamental la recolección de radiación solar, para transferirla a un fluido de trabajo o caloportador que circula a través de él. Así que, idealmente el sistema funciona de manera que exista la máxima transferencia de calor entre el colector y el fluido caloportador, aquí radica la eficiencia del sistema (Hussein, 2016).

1.3 Objetivo

El objetivo del presente trabajo es evaluar, por medio del modelado y la simulación, el desempeño térmico de un colector solar cilindro-parabólico utilizando diferentes fluidos caloportadores. Con ello contribuir a entender los fenómenos relacionados con la transferencia de calor en esta tecnología y determinar los fluidos caloportadores que maximizan su eficiencia energética.

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera:

- En el capítulo uno se aborda la introducción, en la cual describe qué es la energía solar fotovoltaica y la energía solar fototérmica.
- En el capítulo dos se muestra la clasificación más utilizada de los colectores solares.
- En el capítulo tres se presentan las aplicaciones que tiene el colector solar cilindro-parabólico y se da una descripción general de los fluidos caloportadores como agua, sales fundidas y metales líquidos.
- En el capítulo cuatro se muestra la descripción del sistema y su fenomenología, y su respectivo modelo.
- En el capítulo cinco se aborda la verificación del modelo matemático propuesto comparándolo con datos obtenido de la literatura.
- En el capítulo seis se presentan las propiedades térmicas de los fluidos caloportadores; implementación de estas propiedades en una simulación desarrollada en Python 3.13; para finalmente obtener los resultados y discutirlos.
- Por último, en el capítulo siete aparece la conclusión de la tesis.

2. Colectores solares

La clasificación más utilizada para los colectores solares es la siguiente: colectores no concentradores y colectores concentradores. Los colectores no concentradores consisten en dispositivos cuya área de intercepción es la misma a su área de absorción; por otra parte, los colectores concentradores están diseñados con superficies reflectantes cóncavas que enfocan la irradiación solar a un área de recepción de menor tamaño (Tian & Zhao, 2013).

2.1 Colectores no concentradores

Colectores de placa plana

Los colectores solares de placa plana poseen una cubierta de vidrio, placas absorbentes, capas de aislamiento, tubos de recuperación y otros componentes auxiliares. La cubierta de vidrio puede estar formada de una o varias capas que permiten una alta transmisividad de radiación de onda corta y baja transmisividad de radiación de onda larga. Como punto importante de este tipo de colectores es que tienen que posicionarse adecuadamente, ya que son fijados permanentemente y pueden trabajar a una temperatura de entre 60°C y 100°C (Tian & Zhao, 2013) (Yang et al., 2020).

Colectores híbridos fotovoltaicos/térmicos

Los colectores híbridos fotovoltaicos/térmicos (PVT) son dispositivos que pueden convertir la irradiación solar tanto en energía eléctrica como en energía calorífica. Esta combinación permite tener una mejor eficiencia, debido a que poseen una placa absorbente que funciona como un mecanismo de eliminación de calor del módulo fotovoltaico, por lo que, el calor residual se emplea para la producción de agua caliente sanitaria y para sistemas de refrigeración por adsorción. Cabe resaltar que este tipo de colectores puede trabajar a temperaturas de entre 40°C y 80°C (Tian & Zhao, 2013) (Vaillon et al., 2020).

2.2 Colectores concentradores

Dentro de esta clasificación se incluyen los siguientes:

- Colectores de campo de helióstatos
- Colectores de plato parabólico
- Colector solar lineal Fresnel
- Colectores cilindro-parabólicos

Colectores de campo de helióstatos

El colector de campo de helióstatos posee una serie de espejos/helióstatos planos, un sistema de control automático para orientarlos mediante un sistema de seguimiento azimutal, una torre central y un generador de vapor, en donde se efectúa el proceso de absorción de la energía térmica hacia el fluido caloportador. Estos fluidos pueden ser agua/vapor, sodio líquido o sales fundidas. En cambio, para el medio de almacenamiento térmico se emplea aceite sintético de alta temperatura mezclado con roca triturada, sal de nitrato fundida o sodio líquido. Este tipo de colectores trabaja a temperaturas de entre 150°C hasta 2000°C (Tian & Zhao, 2013)(Shahin et al., 2023).

Colectores de plato parabólico

Los colectores de plato parabólico emplean una composición de espejos en forma de plato parabólico para orientar la radiación solar hacia su punto focal, en donde se encuentra un receptor. Ahí reside el fluido caloportador, el cual se calienta a condiciones de alta presión y temperatura, para posteriormente generar electricidad en un motor conectado al receptor. Como punto importante a destacar es que este tipo de colectores trabajan típicamente en un intervalo de temperaturas de entre 100°C a 500°C (Tian & Zhao, 2013) (Settino et al., 2018).

Colector solar lineal Fresnel

El colector solar lineal Fresnel puede trabajar a temperaturas de entre 60°C a 250°C y está formado por una configuración de tiras de espejos paralelos, capaces de seguir la trayectoria de los rayos del Sol. Estos espejos tienen la

capacidad de reflejar la luz solar en un foco común, donde se encuentra un tubo absorbedor o una serie de ellos. Su trabajo es hacer circular el fluido caloportador que frecuentemente es agua. A la salida del tubo absorbedor, el agua sale a alta presión y temperatura para utilizarlo posteriormente en algunos procesos térmicos (Fadhel et al., 2023) (Settino et al., 2018).

Colectores cilindro-parabólicos (CSCP)

Los CSCP son dispositivos que pueden alcanzar temperaturas de hasta 400°C y se componen de una serie de espejos en forma de parábola; su objetivo es reflejar la energía solar hacia su línea focal común y paralela al eje simétrico. La parte apta para recolectar el calor es el receptor colocado en la línea focal. Este receptor es de acero inoxidable, el cual tiene la particularidad de estar cubierto de vidrio para reducir las pérdidas de calor (Tian & Zhao, 2013) (Quezada–García et al., 2019).

Este tipo de colectores presentan grandes características como el hecho de tener una tasa de concentración de radiación solar de alrededor del 40%, que depende del tamaño del canal. Además, poseen la capacidad de expandirse fácilmente y poseen versatilidad para orientarse tanto de este-oeste como de norte-sur. (Tian & Zhao, 2013).

3. Colector solar cilindro-parabólico (CSCP)

El CSCP puede ser empleado como fuente de calor en los siguientes escenarios:

- En un ciclo de turbina de vapor
- En un ciclo combinado

Existen dos formas de implementar los CSCP. El primero es cuando se emplea el mismo fluido caloportador tanto en el bloque de potencia como en el colector, como se aprecia en la **Figura 4**.

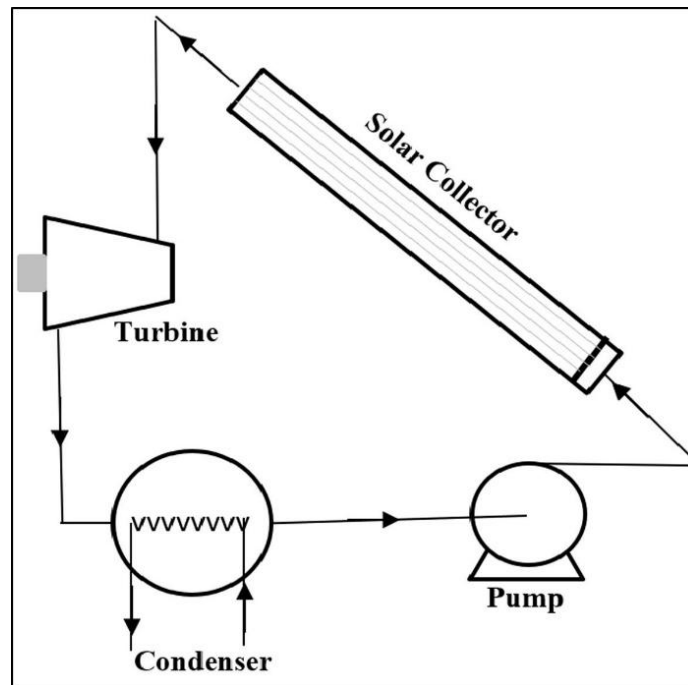


Figura 4. Planta eléctrica integrada al CSCP usando del mismo fluido caloportador (Bilal Awan et al., 2020).

La segunda forma es cuando el fluido caloportador del colector solar es distinto al fluido de trabajo del ciclo de potencia, como se muestra en la **Figura 5**, por lo que, se requiere de un intercambiador de calor (Bilal Awan et al., 2020).

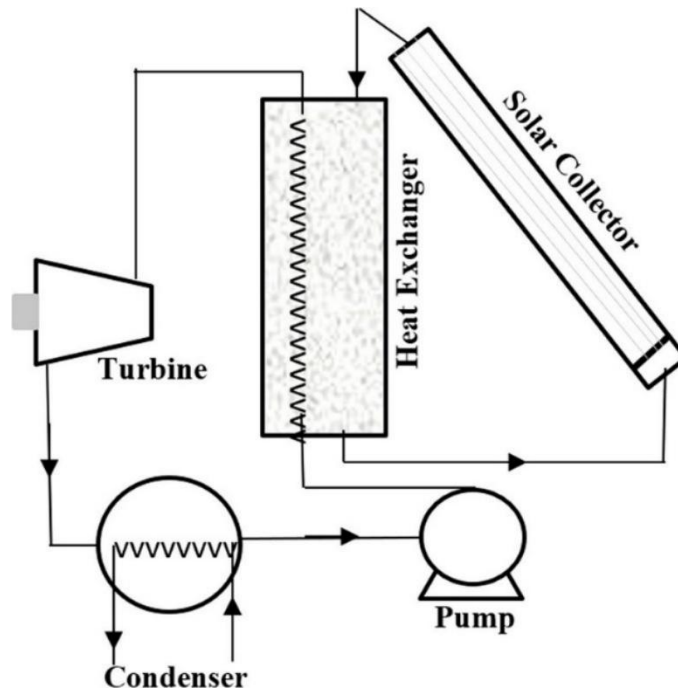


Figura 5. Planta eléctrica con un CSCP integrado y uso de un intercambiador de calor (Bilal Awan et al., 2020).

El ciclo combinado es un proceso que combina dos ciclos termodinámicos; generalmente, el primero se basa en el ciclo Brayton y el segundo en el ciclo Rankine. Para implementar el CSCP se tienen dos opciones:

- La primera es cuando el circuito solar se integra al ciclo Brayton para disminuir el uso del combustible (Bilal Awan et al., 2020).
- El segundo caso es cuando el circuito solar se emplea en el ciclo Rankine para calentar el agua antes del generador de recuperación de calor o para sobrecalentar el vapor que sale del generador de recuperación de calor; un ejemplo se muestra en la **Figura 6** (Bilal Awan et al., 2020).

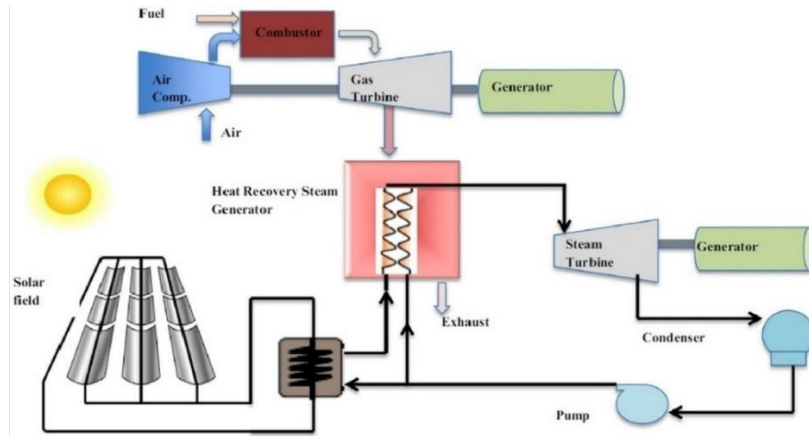


Figura 6. Implementación del CSCP en un ciclo Rankine antes del generador de recuperación de calor en un ciclo combinado (Bilal Awan et al., 2020).

3.1 Fluido caloportador

El fluido caloportador es fundamental en cualquier sistema de colectores concentradores, ya que es el encargado de absorber la energía térmica, para transferirla a los intercambiadores de calor y, por último, regresar a la fuente de calor (Bade & Bandyopadhyay, 2012). Es por eso que se requiere de un óptimo fluido caloportador que tenga las siguientes características (Vignarooban et al., 2015):

- Bajo punto de fusión
- Alto punto de ebullición
- Baja presión de vapor a alta temperatura
- Baja corrosión con aleaciones metálicas
- Baja viscosidad
- Alta conductividad térmica
- Alta capacidad térmica para almacenamiento de energía
- Bajo costo

El presente trabajo se centra en los siguientes fluidos caloportadores:

- Agua
- Sales fundidas
- Metales líquidos

3.1.1 Agua

El uso de agua como fluido caloportador inició en la década de 1980 en colectores parabólicos de generación directa de vapor y en la actualidad existen siete plantas comerciales que emplean este tipo de fluido (cuatro se encuentran en España y tres en Estados Unidos de América). Todas ellas construidas en el periodo de 2007 a 2014 (Vignarooban et al., 2015).

El agua posee las siguientes propiedades físicas a una presión de 40 atm (ver **Tabla 1**).

Tabla 1. Propiedades del agua a 40 atm y diferentes temperaturas (Vignarooban et al., 2015).

Propiedades	Temperatura [°C]		
	300	500	700
Viscosidad [Pa s]	2.0×10^{-5}	2.9×10^{-5}	3.7×10^{-5}
Conductividad térmica [W/m K]	0.051	0.069	0.096

Los grandes inconvenientes con este tipo de fluido caloportador es la presencia de corrosión por el vapor a alta temperatura y la falta de agua en regiones donde se ubican este tipo de colectores, comúnmente desiertos (Vignarooban et al., 2015).

3.1.2 Sales fundidas

En este tipo de fluidos caloportadores sus principales componentes son los nitratos/nitritos y poseen las siguientes características (Bilal Awan et al., 2020):

- Alta estabilidad térmica (superior a 500°C)
- Alta capacidad calorífica específica
- Alta densidad
- Baja presión de vapor a altas temperaturas

A pesar de que la implementación de sales fundidas como fluido caloportador se remonta a la década de 1980 para colectores de torre solar, aún sigue en fase de pruebas para los CSCP, debido al mayor tamaño de campo de colectores solares y la menor temperatura de operación (Vignarooban et al., 2015) (Bilal Awan et al., 2020). En la **Tabla 2** se presenta el rango de temperaturas de operación de diferentes sales fundidas.

Tabla 2. Rangos de operación de las sales fundidas que se comercializan (Bilal Awan et al., 2020).

Fluido caloportador	Intervalo de temperaturas de operación [°C]
NaNO_3 - KNO_3 (Sal solar)	260 - 600
NaNO_3 - NaNO_2 - KNO_3 (Hitec)	142 - 535
NaNO_3 - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - KNO_3 (Hitec XL)	130 - 550
NaNO_3 - KNO_3 - LiNO_3	130 - 600
Li_2CO_3 - Na_2CO_3 - K_2CO_3 (Carbonato de LiNaK)	400 - 850
KNO_3 - LiNO_3 - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	<80 - 500

Otro reto importante por considerar es la producción mundial limitada de sales de nitrato, ya que las minas más grandes se encuentran en Chile y Perú, las cuales son insuficientes para satisfacer la demanda (Vignarooban et al., 2015).

3.1.3 Metales líquidos

El empleo de metales líquidos se remonta a la década de 1940 en la industria nuclear, aunque sigue en fase de pruebas para implementarse en colectores concentradores de forma comercial (Vignarooban et al., 2015).

Los metales líquidos presentan propiedades prometedoras, así como desventajas, que se enlistan a continuación (Vignarooban et al., 2015):

Ventajas

- Amplio rango de temperatura de operación

- Baja viscosidad
- Características de transferencia de calor eficientes

Desventajas

- Alta combustibilidad
- Alto costo (tomando como referencia el precio de la sal solar, el Na líquido es cuatro veces más costoso, y el Na – K es veintiséis veces más).

Algunas de las propiedades físicas de los metales líquidos se enlistan en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Propiedades físicas de los metales líquidos (Vignarooban et al., 2015).

Fluido caloportador	Punto de fusión [°C]	Punto de ebullición [°C]	Viscosidad [Pa s]	Conductividad térmica [W/m K] (a 600 °C)
Na líquido	98	883	0.00021	1.25
Na - K	-12	785	0.00018	26.2
Pb - Bi	125	1533	0.00108	12.8

4. Modelo matemático

4.1 Descripción del sistema

El CSCP se compone principalmente de los siguientes elementos (ver **Figura 7**):

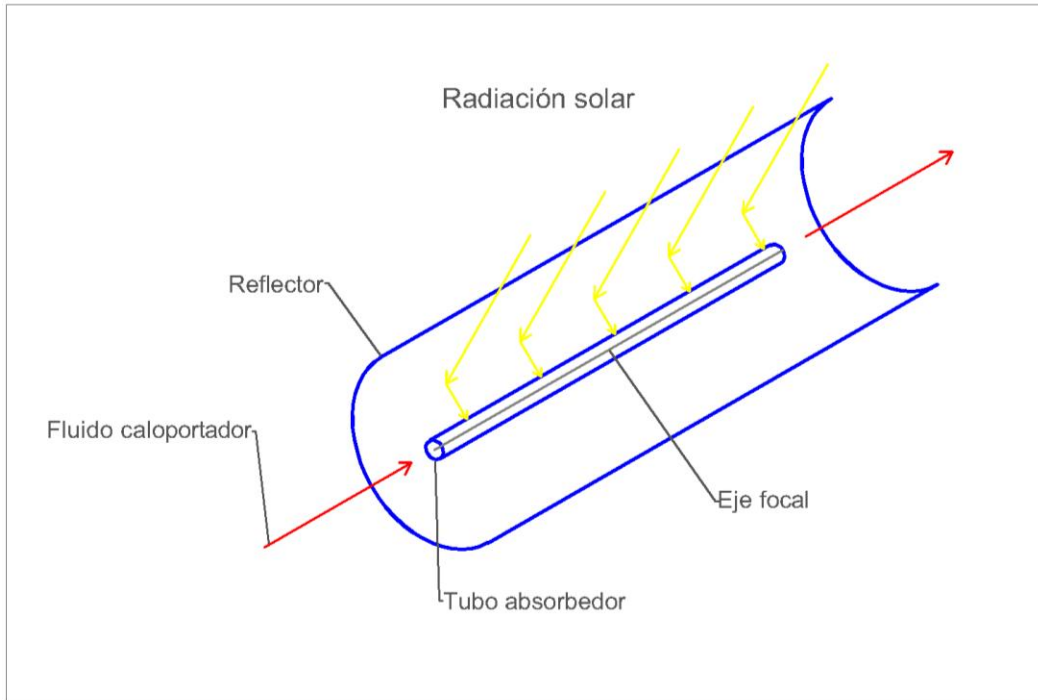


Figura 7. Partes del CSCP y el comportamiento de la irradiación solar sobre él.

4.2. Fenomenología

La radiación solar incide sobre el reflector del CSCP en todas direcciones. Posteriormente se refleja hacia su eje focal; en el cual está posicionado el tubo absorbedor, en donde se encuentra el fluido caloportador (ver **Figura 7**).

El tubo absorbedor está compuesto por un tubo metálico (comúnmente acero inoxidable) y una cubierta de vidrio para evitar las pérdidas de calor por convección y conducción, el espacio entre el tubo y la cubierta está al vacío (ver **Figura 8**).

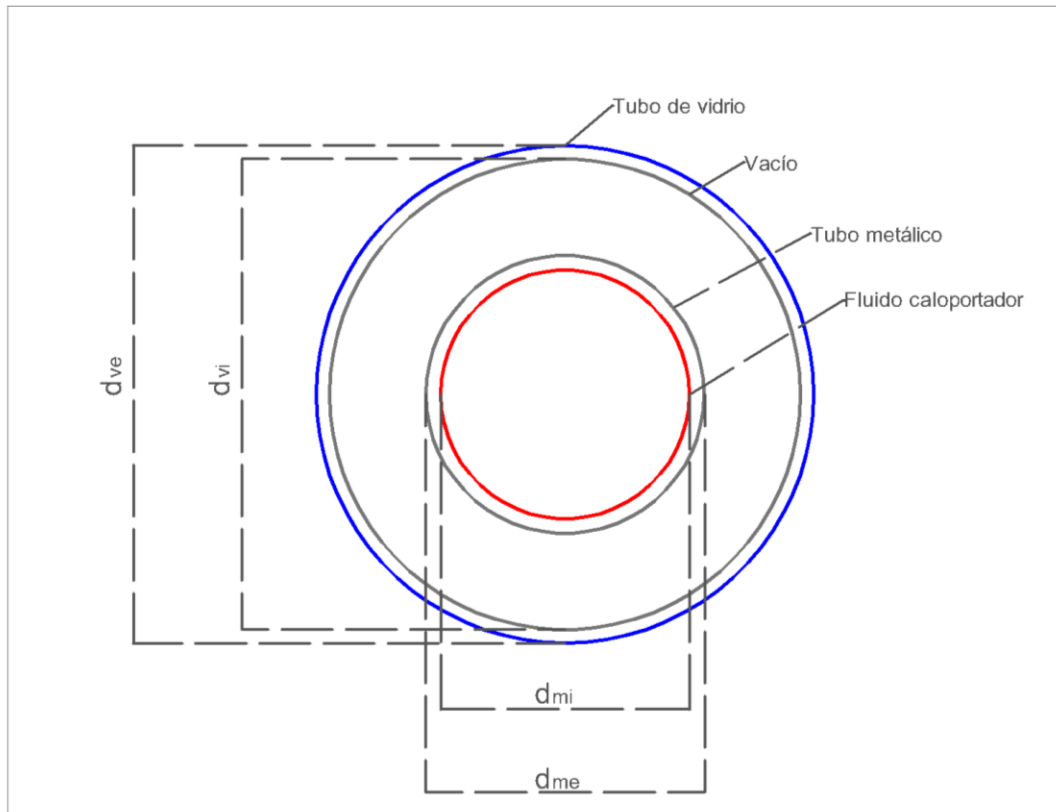


Figura 8. Composición del tubo absorbedor y sus diferentes diámetros.

En la **Figura 8** se muestran los diámetros del tubo absorbedor compuesto por un tubo de metal, hecho de acero inoxidable, y una cubierta de vidrio.

En el tubo absorbedor ocurren los siguientes fenómenos (ver **Figura 9**):

- En el tubo de vidrio incide radiación solar de onda corta, de la cual una fracción es absorbida por el vidrio (menos del 5%), otra parte es reflejada (menor al 1%), el resto penetra al vidrio hasta llegar al tubo metálico, una parte de calor es absorbida por el metal y transferida al fluido caloportador; la cantidad de calor absorbida por el fluido caloportador depende de su temperatura, las propiedades térmicas del fluido y el régimen de flujo.
- Al absorber radiación solar, el fluido caloportador aumenta de temperatura y transfiere calor al tubo metálico, el cual en consecuencia aumentará su temperatura y emitirá radiación de onda larga.

- El tubo metálico y el tubo de vidrio intercambian calor emitiendo radiación de onda larga, en el vacío entre ellos se produce un efecto invernadero.
- La cubierta de vidrio minimiza las pérdidas de calor debidas a la transferencia de calor mediante convección con el medio que le rodea.

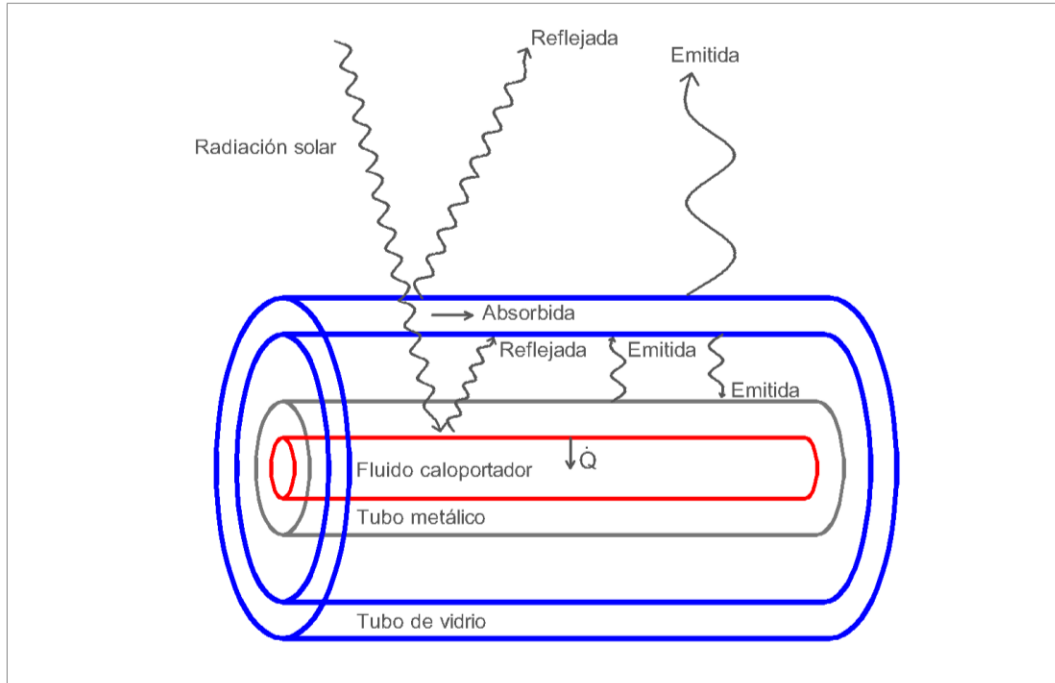


Figura 9. Flujos de calor en el tubo absorbedor.

4.3 Modelado matemático

Se realiza el balance de energía en estado estacionario del fluido caloportador (ver **Figura 10**):

$$\dot{m}h_{ent} + \dot{Q}_{neto} = \dot{m}h_{sal} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{neto} = \dot{m}(h_{sal} - h_{ent}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{neto} = \dot{m}\overline{C_p}(T_{sal} - T_{ent}) \quad (3)$$

donde $\dot{Q}_{neto}$ es el flujo de calor neto, $\dot{m}$ es el flujo másico, $\overline{C_p}$ es el calor específico promedio, T_{sal} es la temperatura a la salida del fluido caloportador y T_{ent} es la temperatura a la entrada del fluido caloportador.

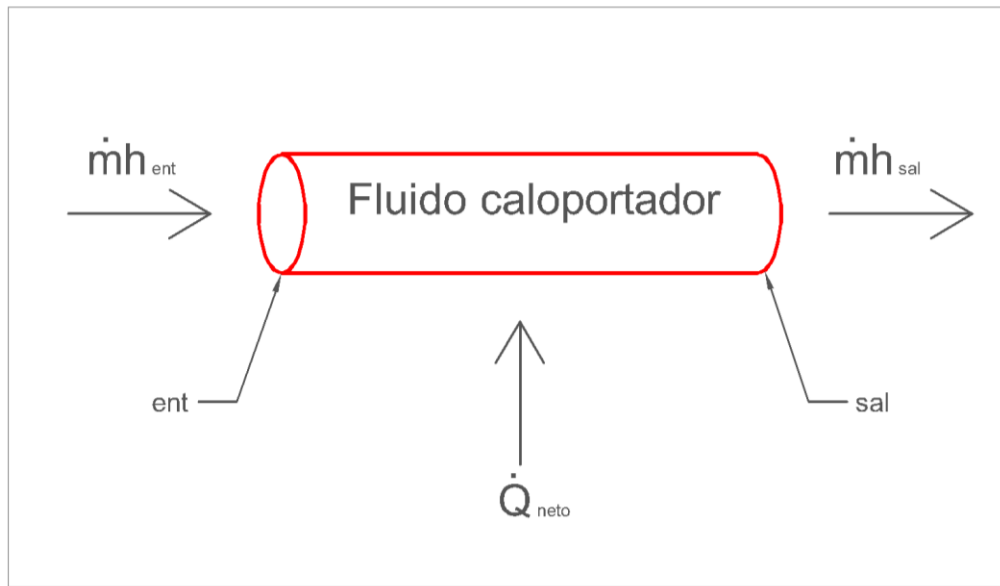


Figura 10. Balance de energía del fluido caloportador.

Posteriormente se realiza el análisis del flujo de calor para el tubo metálico (ver **Figura 11**).

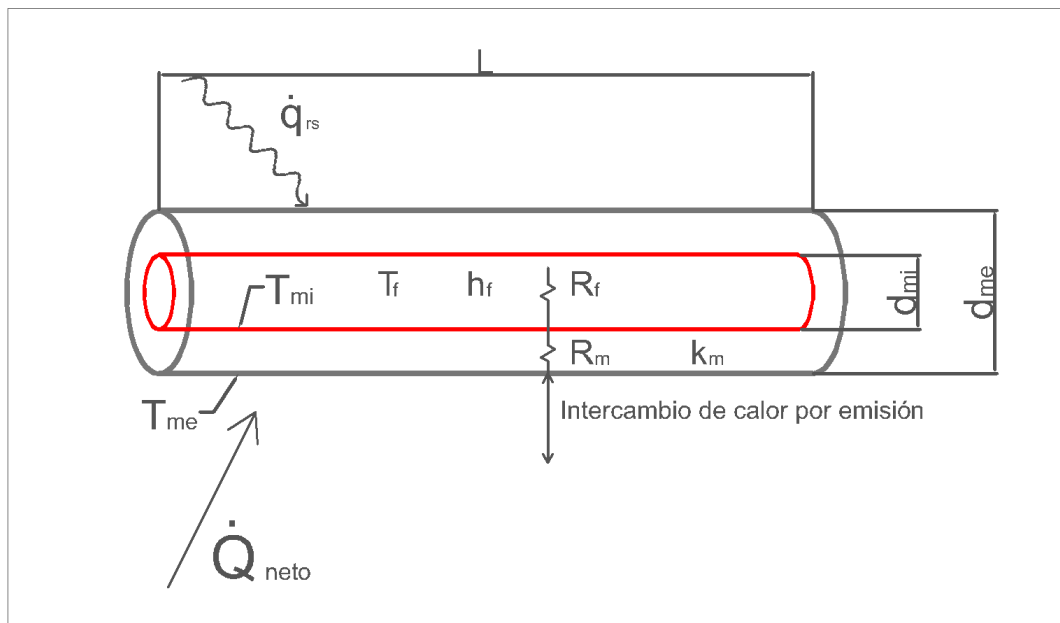


Figura 11. Flujo de calor en el tubo metálico.

La diferencia de temperatura en las paredes del tubo metálico está dada por:

$$T_{me} - T_{mi} = \dot{Q}_{neto} R_m \quad (4)$$

donde T_{me} es la temperatura medida en el diámetro externo del tubo metálico, T_{mi} es la temperatura medida en el diámetro interno del tubo metálico y R_m es la resistencia térmica del metal, dada por la siguiente expresión:

$$R_m = \frac{\ln\left|\frac{d_{me}}{d_{mi}}\right|}{2\pi k_m L} \quad (5)$$

donde d_{me} es el diámetro externo del tubo metálico, d_{mi} es el diámetro interno del tubo metálico, k_m es el coeficiente de conductividad térmica del metal y L es la longitud del tubo absorbedor.

La diferencia de temperaturas entre el tubo metálico y el fluido caloportador está dada por:

$$T_{me} - T_f = \dot{Q}_{neto} R_{Total} \quad (6)$$

donde T_f es la temperatura del fluido y R_{Total} es la resistencia térmica total y está dada de la siguiente forma:

$$R_{Total} = R_m + R_f \quad (7)$$

donde R_f es la resistencia térmica del fluido caloportador y está dada:

$$R_f = \frac{1}{\pi d_{mi} h_f L} \quad (8)$$

donde h_f es el coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido caloportador.

El flux de calor absorbido por el tubo metálico está dado:

$$\dot{q}_{rsa} = \alpha_m \dot{q}_{rs} \quad (9)$$

donde α_m es la absorptividad del tubo metálico y $\dot{q}_{rs}$ es el flux de calor debido a la radiación solar incidente.

La tasa total de calor que incide sobre el tubo metálico está dada por:

$$\dot{Q}_{neto} = \dot{q}_{rsa} (\pi d_{me} L) \quad (10)$$

La tasa de intercambio de calor por emisión el tubo metálico y la cubierta de vidrio está dada por (Cengel, 2007):

$$\dot{Q}_{12} = \frac{A_{me}\sigma(T_{me}^4 - T_{vi}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} \left(\frac{d_{me}}{d_{vi}} \right)} \quad (11)$$

donde T_{vi} es la temperatura medida en el diámetro interno del tubo de vidrio, ε_m es la emisividad del tubo metálico, A_{me} es el área de la superficie externa del tubo metálico y está dada por:

$$A_{me} = \pi d_{me} L \quad (12)$$

Por último, se realiza el análisis para la cubierta de vidrio. En la **Figura 12** se visualiza cómo interactúan los flujos de calor.

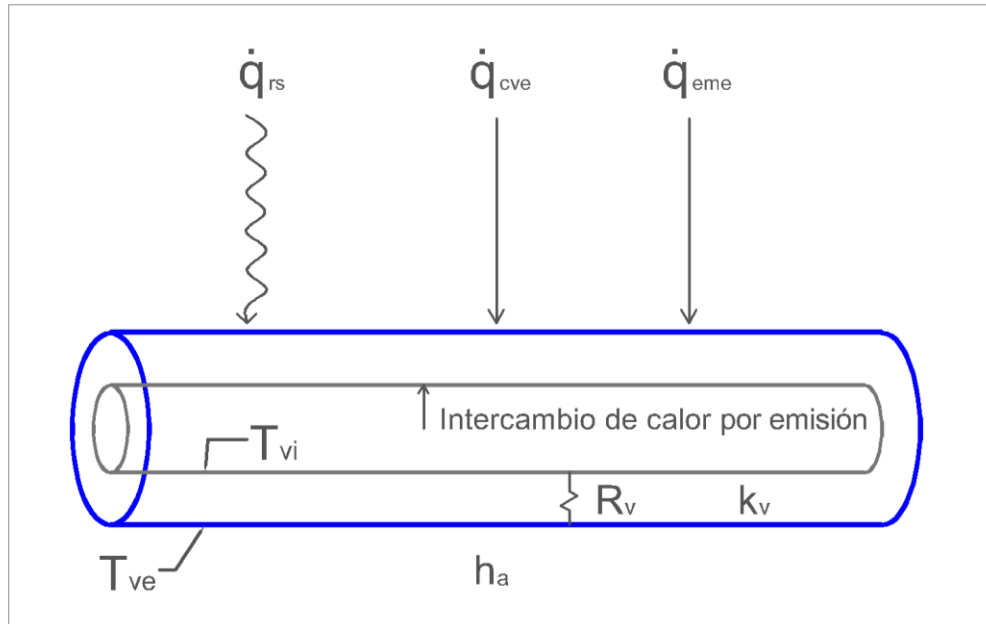


Figura 12. Flujos de calor para la cubierta de vidrio.

La diferencia de temperatura en las paredes del tubo de vidrio está dada por:

$$T_{vi} - T_{ve} = \dot{Q}R_v \quad (13)$$

donde T_{ve} es la temperatura medida en el diámetro externo del tubo de vidrio, T_{vi} es la temperatura medida en el diámetro interno del tubo de vidrio y R_v es la resistencia térmica del vidrio y está dada por:

$$R_v = \frac{\ln \left| \frac{d_{ve}}{d_{vi}} \right|}{2\pi k_v L} \quad (14)$$

donde d_{ve} es el diámetro externo del tubo de vidrio, d_{vi} es el diámetro interno del tubo de vidrio y k_v es el coeficiente de conductividad térmica del tubo de vidrio.

Posteriormente se obtiene el flux de calor evaluado en el diámetro externo del tubo de vidrio.

$$\dot{q}|_{d=d_{ve}} = \dot{q}_{cve} + \dot{q}_{eme} \quad (15)$$

donde $\dot{q}_{cve}$ es el flux de calor que se pierde por convección en el exterior y $\dot{q}_{eme}$ es el flux de calor que se pierde por emisión en el exterior, y están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{q}_{cve} = h_a(T_a - T_{ve}) \quad (16)$$

donde h_a es el coeficiente de transferencia de calor por convección y T_a es la temperatura del ambiente.

$$\dot{q}_{eme} = \varepsilon_v \sigma (T_{sky}^4 - T_{ve}^4) \quad (17)$$

donde ε_v es la emisividad del vidrio, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, T_{sky} es la temperatura del cielo y está dada por:

$$T_{sky} = T_a - 13 [K] \quad (18)$$

La cantidad total de energía solar que incide sobre el tubo absorbedor está dada por la siguiente ecuación:

$$q_{sr} = \rho_r q_{rs} \frac{A_r}{A_{ve}} \quad (19)$$

donde ρ_r es la reflectividad del relector solar, A_r es el área de captación del reflector y A_{ve} es el área exterior del vidrio; estas áreas están dadas por:

$$A_r = WL \quad (20)$$

$$A_{ve} = \pi d_{ve} L \quad (21)$$

donde W es la abertura del reflector.

5. Verificación

El modelo matemático de transferencia de calor para el CSCP se implementa en Python 3.13 con un número de 500 nodos. Posteriormente, se verifica utilizando como fluido caloportador agua a 2 MPa y los datos de la **Tabla 4**, debido a que son los datos reportados en el estudio de (Tzivanidis et al., 2015) para su modelo y es uno de los pocos estudios con suficientes datos para ser reproducibles.

Tabla 4. Datos para la verificación del modelo matemático (Tzivanidis et al., 2015).

Parámetros	Valor	Dimensiones del CSCP	Valor (m)
ε_m	0.10	W	0.840
ε_v	0.88	L	1.000
ρ_r	0.8015	d_{mi}	0.020
q_{rs}	500 W/m ²	d_{me}	0.022
$\dot{m}$	0.02 kg/s	d_{vi}	0.032
T_a	10 °C	d_{ve}	0.034
h_a	10 W/m ² K		

En la **Figura 13** se muestra la eficiencia térmica del CSCP obtenida con el modelo matemático propuesto (curva roja continua) y la reportada por (Tzivanidis et al., 2015) (curva negra segmentada).

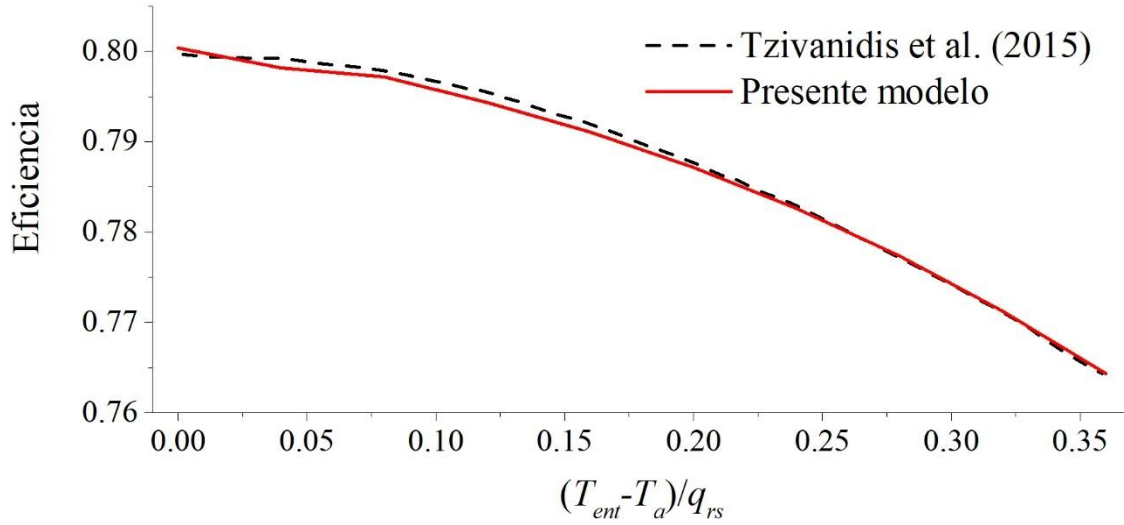


Figura 13. Validación del presente modelo.

Como se observa en la **Figura 13**, con el presente modelo se obtienen resultados que se aproximan a los datos reportados por (Tzivanidis et al., 2015), obteniendo un coeficiente de correlación (R^2) de 0.978122; por lo cual, el modelo es válido.

Cabe resaltar que la relación $\frac{T_{ent} - T_a}{q_{rs}}$, está en función de la temperatura de entrada, debido a que, a mayor temperatura de entrada, mayor será la temperatura de salida y se tendrá una mayor diferencia de temperatura entre la superficie del tubo absorbedor y el ambiente, provocando una mayor transferencia de calor hacia el ambiente.

6. Casos de estudio

Para el estudio se utilizan sodio líquido, sal fundida Hitec, sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y sal solar. A continuación, se presentan las propiedades térmicas y posteriormente se implementan en el modelo matemático.

6.1 Propiedades de los fluidos caloportadores

A continuación, se muestran las curvas y polinomios de la conductividad térmica, densidad, calor específico y viscosidad dinámica de los siguientes fluidos caloportadores:

- Sodio líquido
- Sal fundida Hitec
- Sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
- Sal solar

Todas las propiedades se reportan a presión atmosférica.

6.1.1 Sodio líquido

En las **Figura 14-17** se muestran las curvas de la conductividad térmica, densidad, calor específico y viscosidad dinámica del sodio líquido, respectivamente. La curva segmentada de color negro corresponde a los datos de Boerema et al. (2012); mientras que, la curva continua de color rojo se obtiene a partir de los polinomios propuesto en el presente trabajo. La Eq. (22) corresponde a la conductividad térmica cuyo coeficiente de correlación (R^2) es igual a 0.9966.

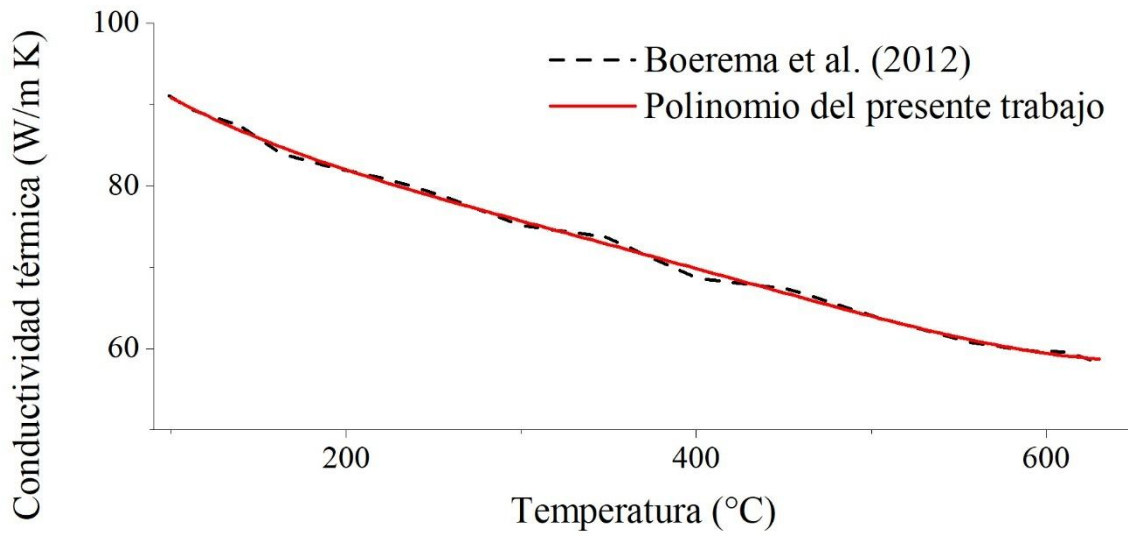


Figura 14. Curvas de la conductividad térmica del sodio líquido.

$$k(T) = 106.16282 - 0.20326T + 5.99595 \times 10^{-4}T^2 - 1.0869 \times 10^{-6}T^3 + 7.26262 \times 10^{-10}T^4 \quad (22)$$

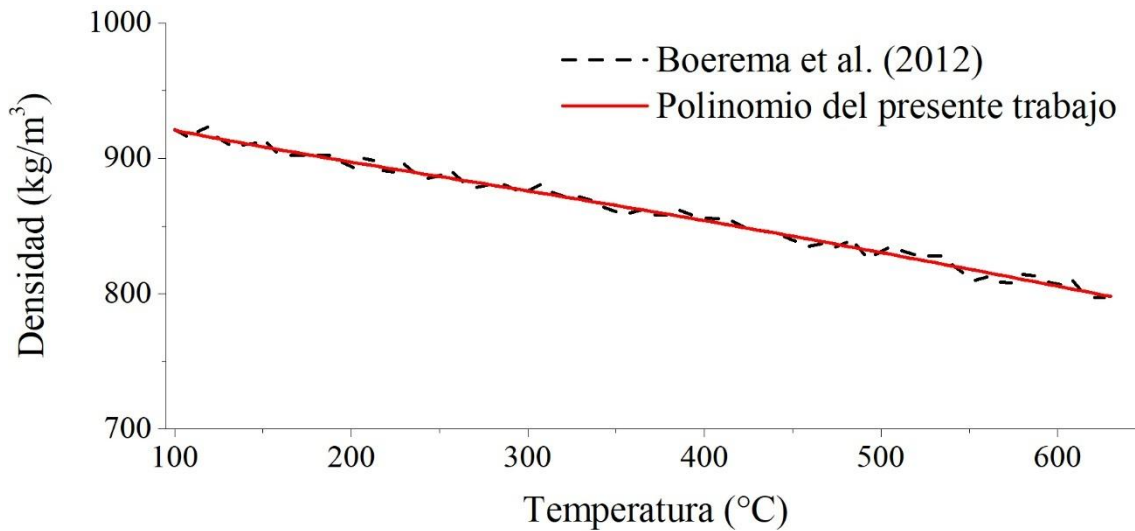


Figura 15. Curvas de la densidad del sodio líquido.

La densidad del sodio líquido se calcula a partir del siguiente polinomio con el que se obtiene un valor de $R^2 = 0.9863$:

$$\rho(T): 950.34406 - 0.34286T + 5.72397 \times 10^{-4}T^2 - 1.03512 \times 10^{-6}T^3 + 6.05454 \times 10^{-10}T^4 \quad (23)$$

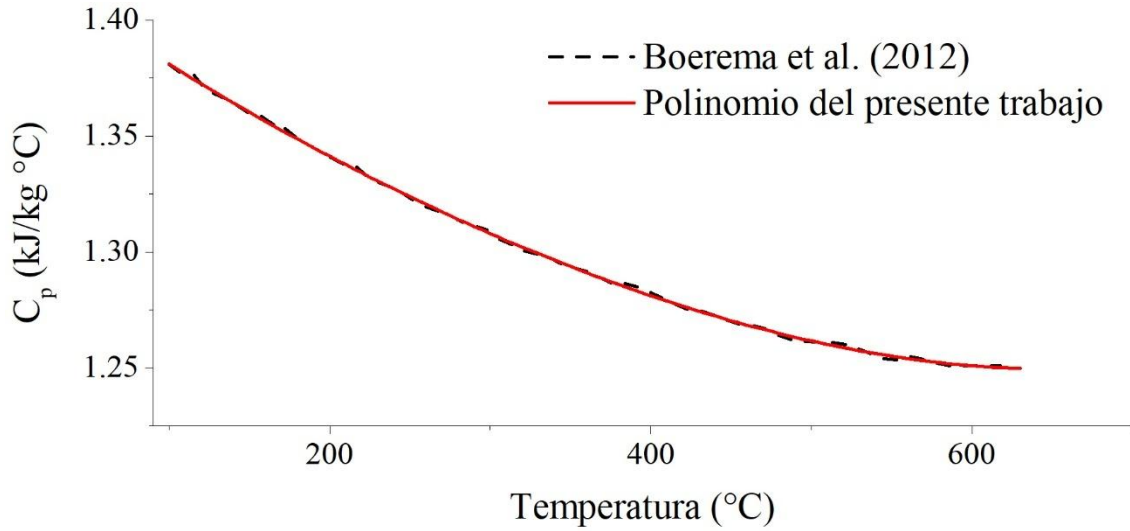


Figura 16. Curvas del C_p sodio líquido.

El C_p del sodio líquido se calcula a partir del siguiente polinomio con el que se obtiene un valor de $R^2 = 0.9993$:

$$C_p(T) = 1.42817 - 5.12471 \times 10^{-4}T + 4.43906 \times 10^{-7}T^2 - 3.36212 \times 10^{-10}T^3 + 3.32895 \times 10^{-13}T^4 \quad (24)$$

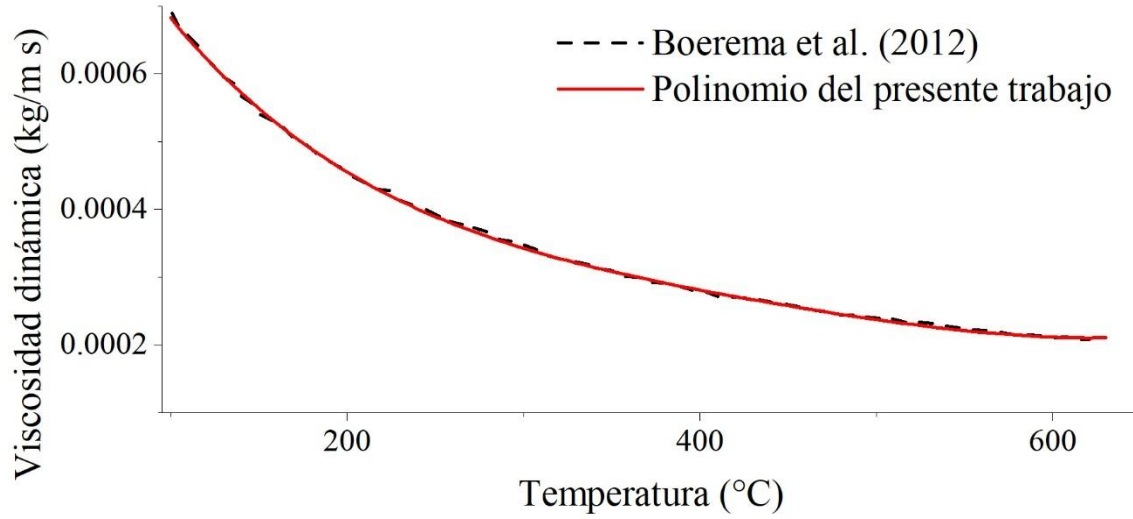


Figura 17. Curvas de la viscosidad dinámica del sodio líquido.

La viscosidad dinámica del sodio líquido se calcula a partir del siguiente polinomio con el que se obtiene un valor de $R^2 = 0.9993$:

$$\mu(T) = 0.00112 - 5.82847 \times 10^{-6}T + 1.6764 \times 10^{-8}T^2 - 2.38566 \times 10^{-11}T^3 + 1.31684 \times 10^{-14}T^4 \quad (25)$$

Los polinomios propuestos para calcular las propiedades del sodio líquido (Ecs. (22)-(25)) son válidas para $100^\circ\text{C} < T < 630^\circ\text{C}$.

6.1.2 Sal fundida Hitec

En la **Figura 18-21** se muestran las curvas de la conductividad térmica, densidad, calor específico y viscosidad de la sal fundida Hitec, respectivamente. De manera similar al caso anterior, la curva segmentada de color negro corresponde a los datos de Boerema et al. (2012); mientras que, la curva continua de color rojo se obtiene a partir del polinomio propuesto en el presente trabajo. La Eq. (26) corresponde a la conductividad térmica cuyo coeficiente de correlación (R^2) es igual a 0.998.

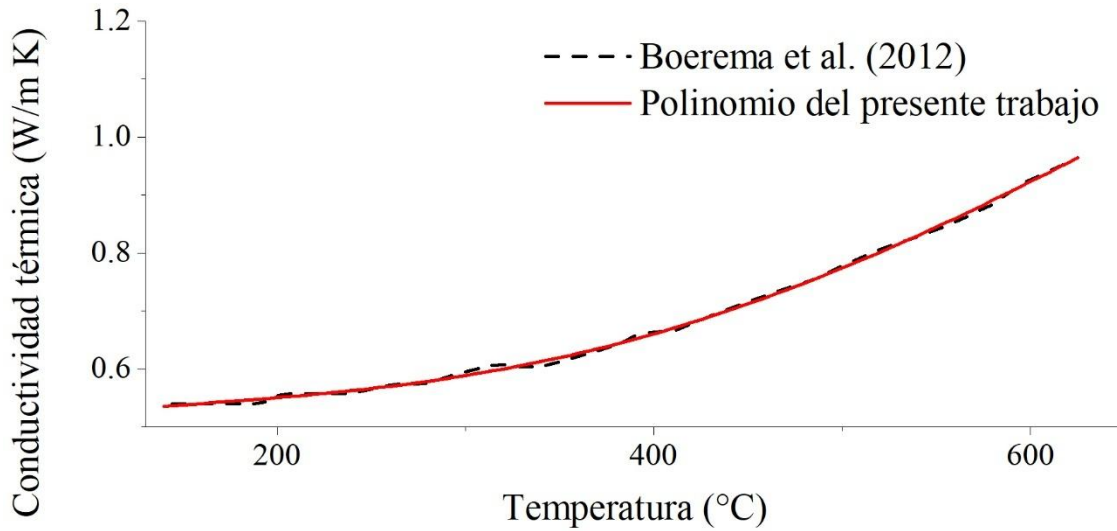


Figura 18. Curvas de la conductividad térmica de la sal fundida Hitec.

$$k(T) = 0.48074 + 6.92664 \times 10^{-4}T - 3.25893 \times 10^{-6}T^2 + 8.78108 \times 10^{-9}T^3 - 5.37685 \times 10^{-12}T^4 \quad (26)$$

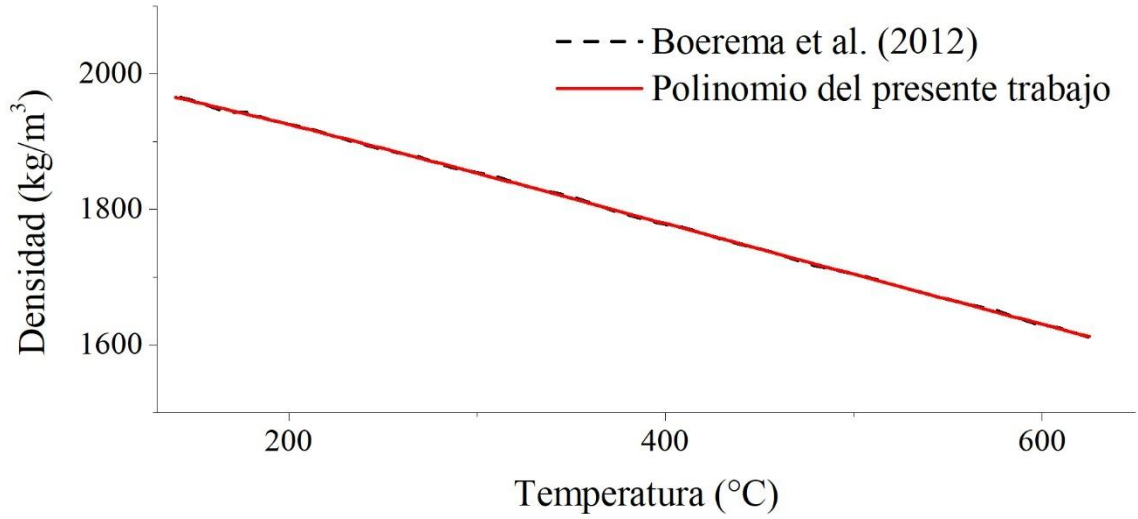


Figura 19. Curvas de la densidad de la sal fundida Hitec.

La densidad de la sal fundida Hitec se calcula a partir del siguiente polinomio con el que se obtiene un valor de $R^2 = 0.9997$:

$$\rho(T) = 2044.13079 - 0.45819T - 8.86652 \times 10^{-4}T^2 + 1.14692 \times 10^{-6}T^3 - 5.16517 \times 10^{-10}T^4 \quad (27)$$

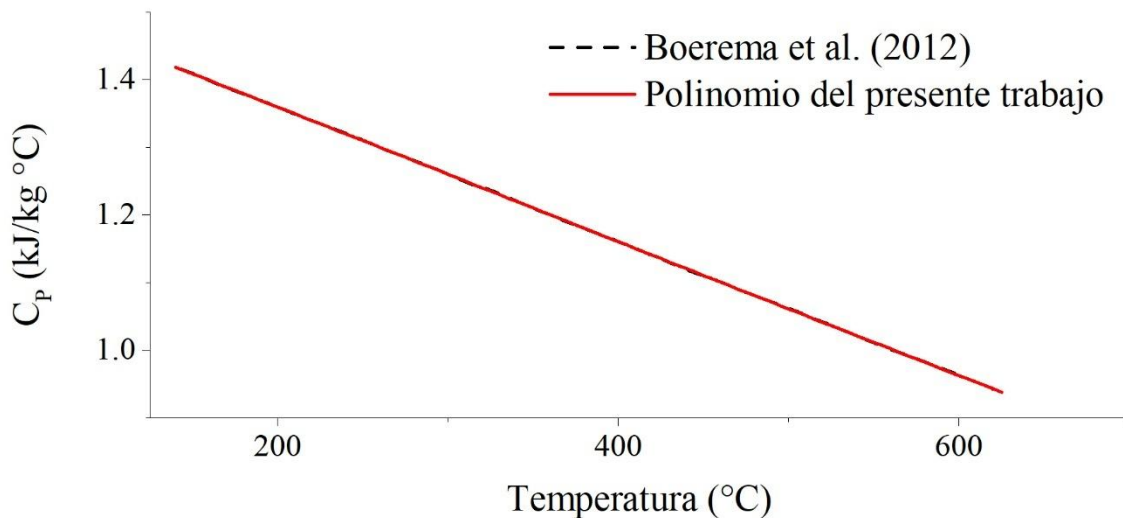


Figura 20. Curvas del C_p de la sal fundida Hitec.

El C_p de la sal fundida Hitec se calcula a partir del siguiente polinomio con el que se obtiene un valor de $R^2 = 0.999$:

$$C_p(T) = 1.5521 - 9.29555 \times 10^{-4}T - 2.13582 \times 10^{-7}T^2 + 2.62158 \times 10^{-10}T^3 - 8.64344 \times 10^{-14}T^4 \quad (28)$$

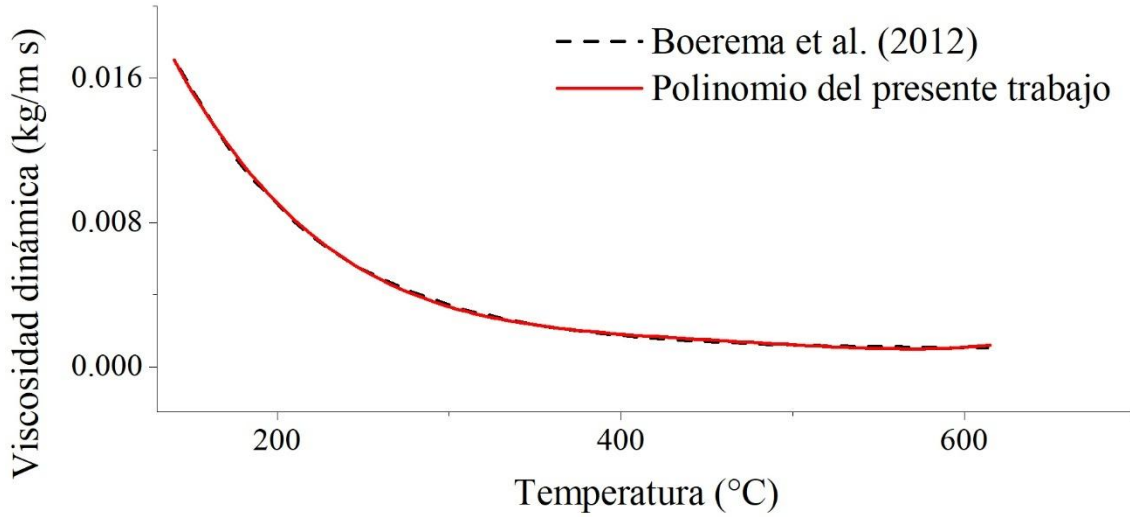


Figura 21. Curvas de la viscosidad dinámica de la sal fundida Hitec.

La viscosidad de la sal fundida Hitec se calcula a partir del siguiente polinomio con el que se obtiene un valor de $R^2 = 0.999$:

$$\mu(T) = 0.06051 - 4.8638 \times 10^{-4}T + 1.53744 \times 10^{-6}T^2 - 2.1894 \times 10^{-9}T^3 + 1.17163 \times 10^{-12}T^4 \quad (29)$$

Los polinomios propuestos para calcular las propiedades de la sal fundida Hitec (Ecs. (26)-(29)) son válidas para $140^\circ\text{C} < T < 625^\circ\text{C}$.

6.1.3 Sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

En la **Figura 22-24** se muestran las curvas de la conductividad térmica, densidad y calor específico, respectivamente, de la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Teniendo la siguiente composición: 16.67 % en peso de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $4\text{H}_2\text{O}$, 44.17 % en peso de KNO_3 , 5.83 en peso de NaNO_3 y 33.33 % en peso de NaNO_2 .

La curva segmentada de color negro corresponde a los datos de Zou et al. (2019); mientras que, la curva continua de color rojo se obtiene a partir del polinomio propuesto en el presente trabajo (Eq. 30), cuyo coeficiente de correlación (R^2) es igual a 0.999.

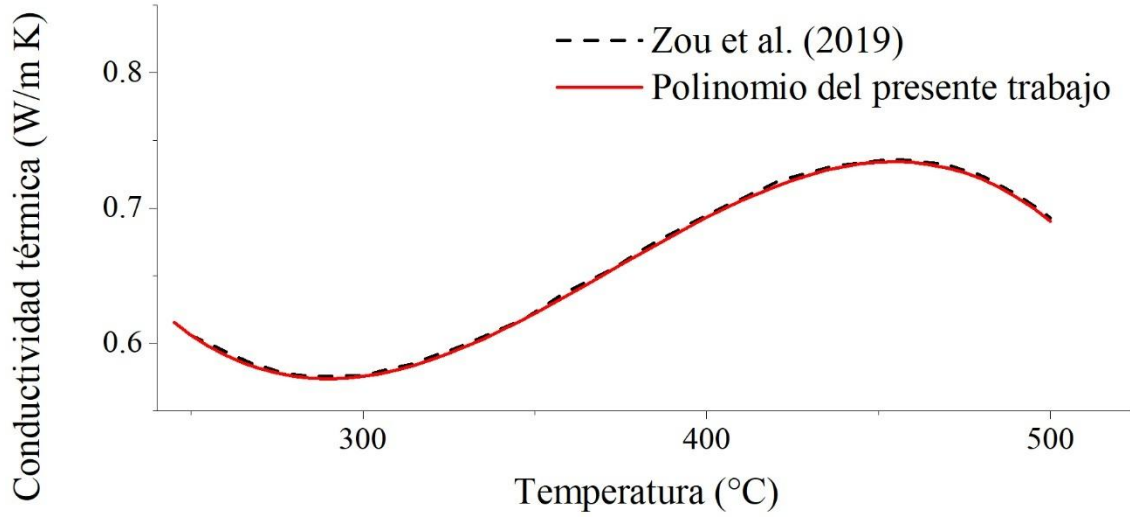


Figura 22. Curvas de la conductividad térmica de la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$.

$$k(T) = 3.71812 - 0.02733T + 7.5851 \times 10^{-5}T^2 - 6.39949 \times 10^{-8}T^3 - 5.21927 \times 10^{-12}T^4 \quad (30)$$

Válida para $245^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$

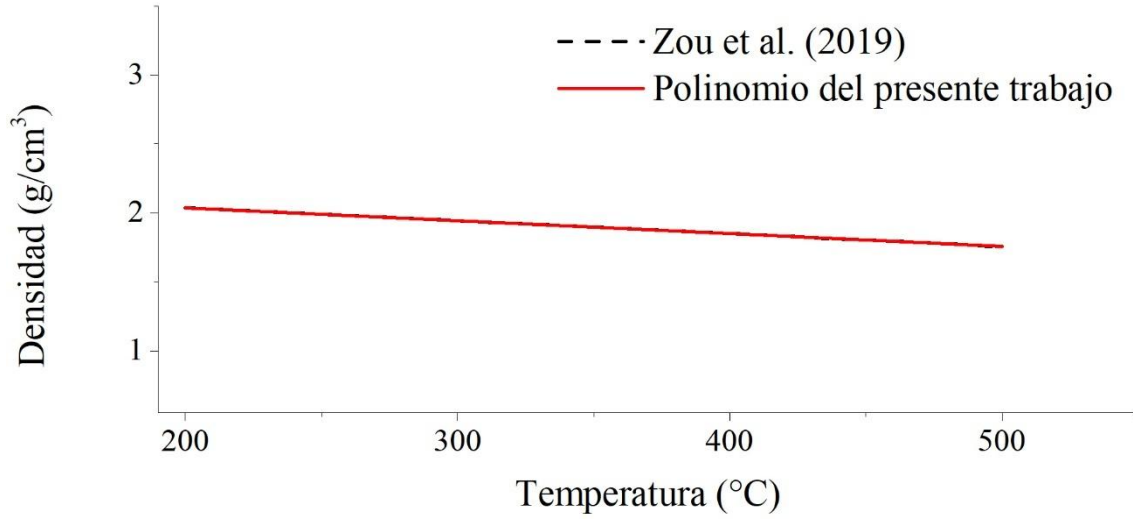


Figura 23. Curvas de la densidad de la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$.

La densidad de la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ se calcula a partir del siguiente polinomio con el que se obtiene un valor de $R^2 = 0.999$:

$$\rho(T) = 2.22584 - 9.37644 \times 10^{-4}T - 5.28554 \times 10^{-9}T^2 \quad (31)$$

Válida para $200^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$

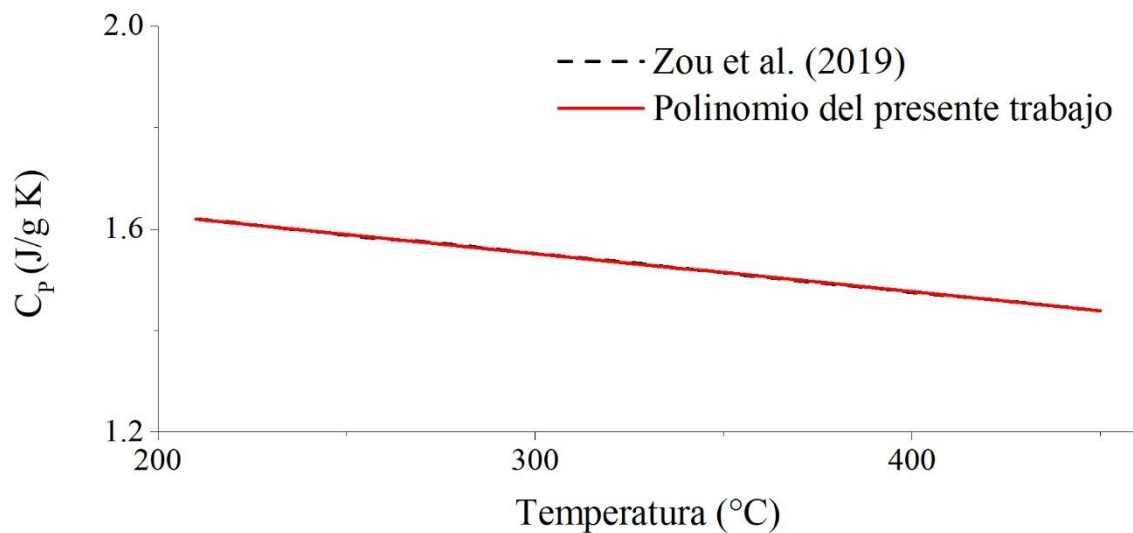


Figura 24. Curvas del C_p de la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$.

El C_p de la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ se calcula a partir del siguiente polinomio con el que se obtiene un valor de $R^2 = 0.999$:

$$C_p(T) = 1.77816 - 7.55131 \times 10^{-4}T + 2.35255 \times 10^{-9}T^2 \quad (32)$$

Válida para $210^\circ\text{C} < T < 450^\circ\text{C}$

El rango en el que todos los polinomios coinciden para calcular las propiedades de la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (Ecs. (30)-(32)) es de $245^\circ\text{C} < T < 450^\circ\text{C}$.

Para esta sal no se encontró la viscosidad, por lo que, para efectos de la simulación en Python 3.13, se toma la viscosidad de la sal Hitec.

6.1.4 Sal solar

En las **Figura 25-28** se muestran las curvas de la conductividad térmica, densidad, calor específico y viscosidad dinámica de la sal solar, respectivamente. La curva segmentada de color negro corresponde a los datos de Wei et al. (2020); mientras que, la curva continua de color rojo se obtiene a partir de los polinomios propuestos en el presente trabajo. La Eq. (33) corresponde a la conductividad térmica cuyo coeficiente de correlación (R^2) es igual a 0.999.

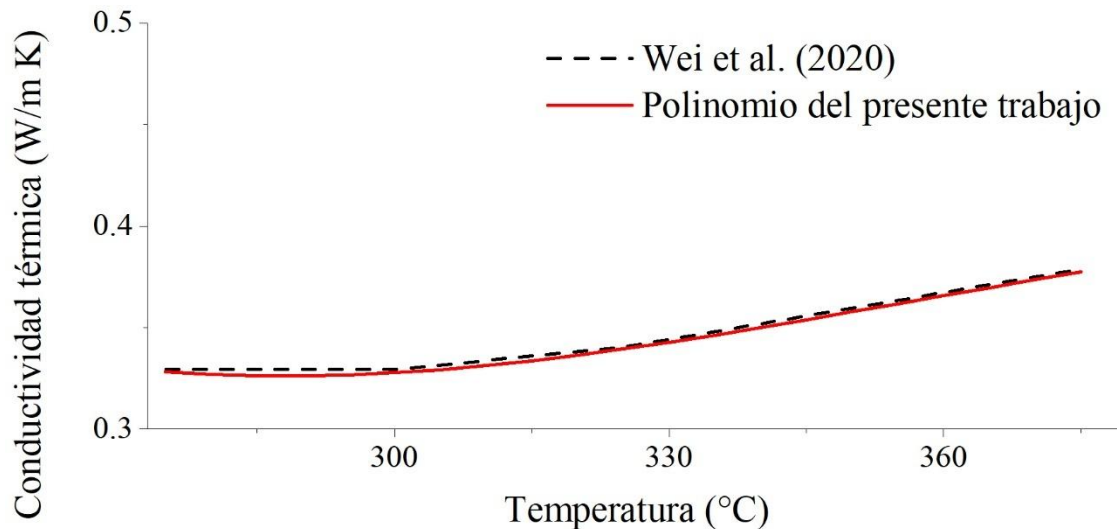


Figura 25. Curvas de la conductividad térmica de la sal solar.

$$k(T) = 2.70836 - 0.0214T + 6.24483 \times 10^{-5}T^2 - 5.85548 \times 10^{-8}T^3 \quad (33)$$

Válido para $275^\circ\text{C} < T < 375^\circ\text{C}$

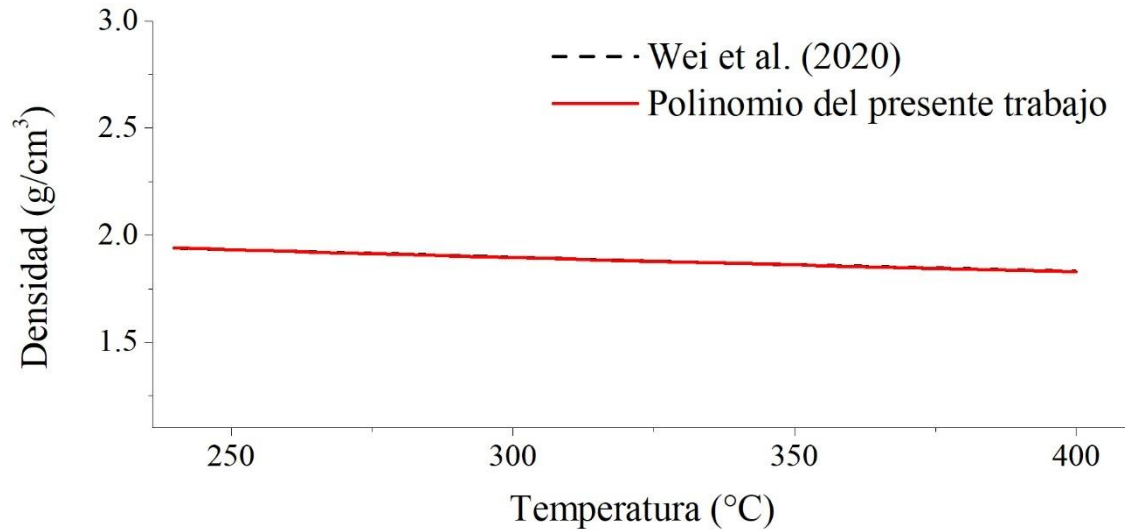


Figura 26. Curvas de la densidad de la sal solar.

La densidad de la sal solar se calcula a partir del siguiente polinomio con el que se obtiene un valor de $R^2 = 0.999$:

$$\rho(T) = 2.16123 - 0.00106T + 5.78564 \times 10^{-7}T^2 \quad (34)$$

Válida para $240^\circ\text{C} < T < 400^\circ\text{C}$

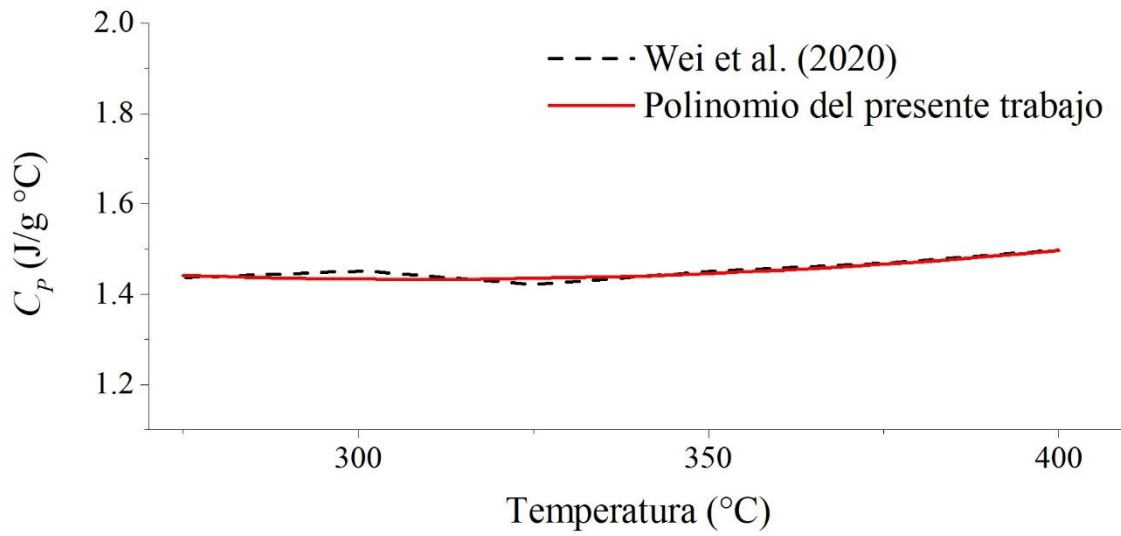


Figura 27. Curvas del C_p de la sal solar.

El C_p de la sal solar se calcula a partir del siguiente polinomio con el que se obtiene un valor de $R^2 = 0.746$:

$$C_p(T) = 2.16063 - 0.00471T + 7.62399 \times 10^{-6}T^2 \quad (35)$$

Válida para $275^\circ\text{C} < T < 400^\circ\text{C}$

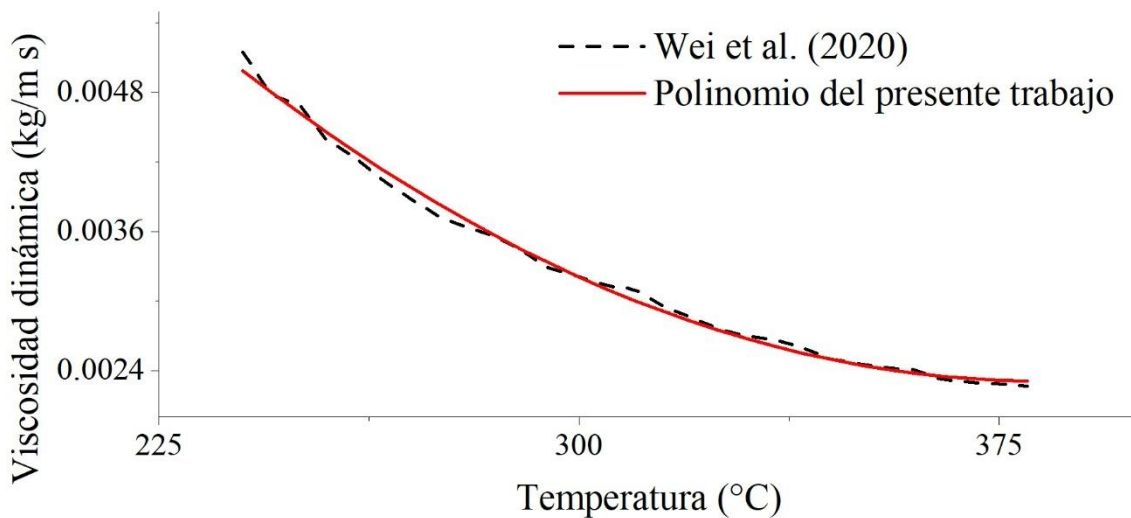


Figura 28. Curvas de la viscosidad dinámica de la sal solar.

La viscosidad dinámica de la sal solar se calcula a partir del siguiente polinomio con el que se obtiene un valor de $R^2 = 0.995$:

$$\mu(T) = 21.5768 - 0.10073T + 1.31667 \times 10^{-4}T^2 \quad (36)$$

Válida para $240^\circ\text{C} < T < 380^\circ\text{C}$

El rango en el que todos los polinomios coinciden para calcular las propiedades de la sal solar (Ecs. (33)-(36)) es de $275^\circ\text{C} < T < 375^\circ\text{C}$.

6.2 Implementación y resultados

En las **Figuras 29-33** se muestra la eficiencia térmica del CSCP empleando como fluido caloportador agua a 10 MPa, sodio líquido, sal fundida Hitec, sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y sal solar, respectivamente. Cabe destacar que para la simulación en Python 3.13 se consideraron los datos de la **Tabla 4**.

Se puede observar que los fluidos caloportadores que tienen mayor rango de operación son el agua a 10 MPa y el sodio líquido con $10^\circ\text{C} < T < 506^\circ\text{C}$ y $100^\circ\text{C} < T < 630^\circ\text{C}$, respectivamente. Mientras que, los fluidos caloportadores que tienen menor rango de operación son la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y la sal solar con $245^\circ\text{C} < T < 450^\circ\text{C}$ y $275^\circ\text{C} < T < 375^\circ\text{C}$, respectivamente.

En las **Figuras 29-33** se observa que a medida que aumenta la temperatura de entrada del fluido caloportador, disminuye la eficiencia de CSCP, debido a que existe una mayor diferencia de temperatura (ΔT) entre el tubo absorbedor y la temperatura del ambiente. Por lo cual, existe una mayor transferencia de calor por emisión y convección hacia el ambiente.

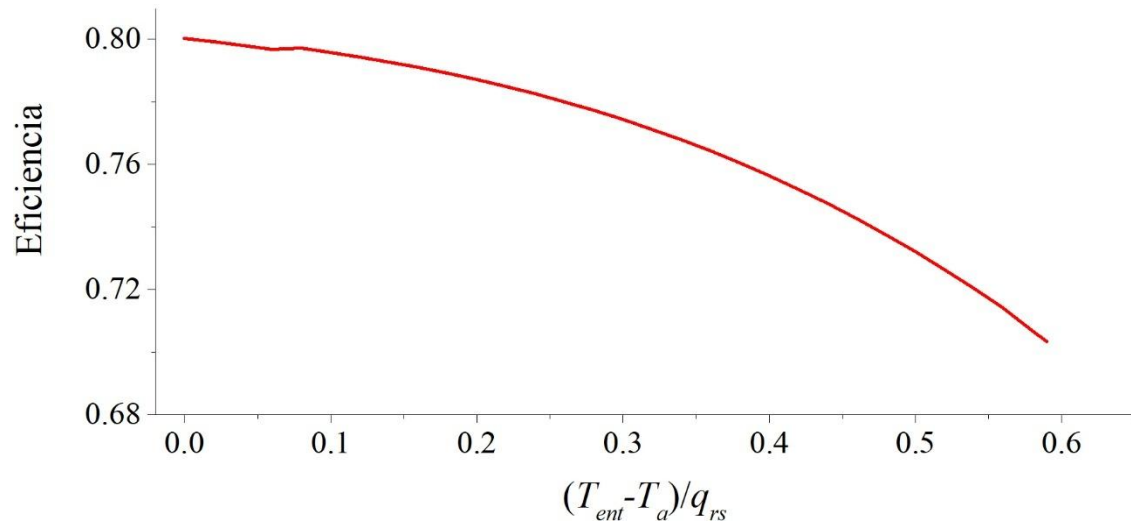


Figura 29. Eficiencia térmica del CSCP empleando agua a 10 MPa como fluido caloportador.

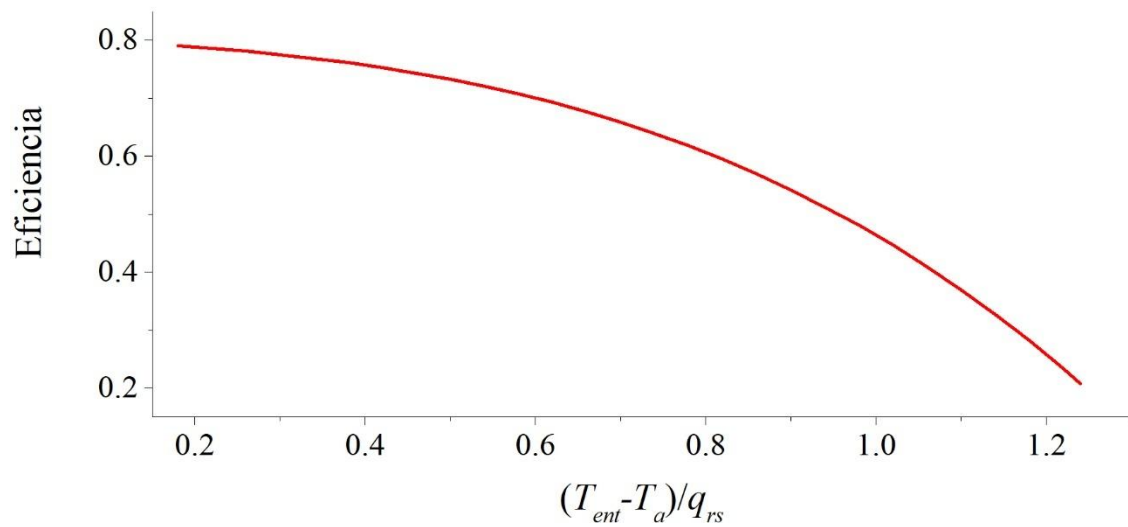


Figura 30. Eficiencia térmica del CSCP empleando sodio líquido como fluido caloportador.

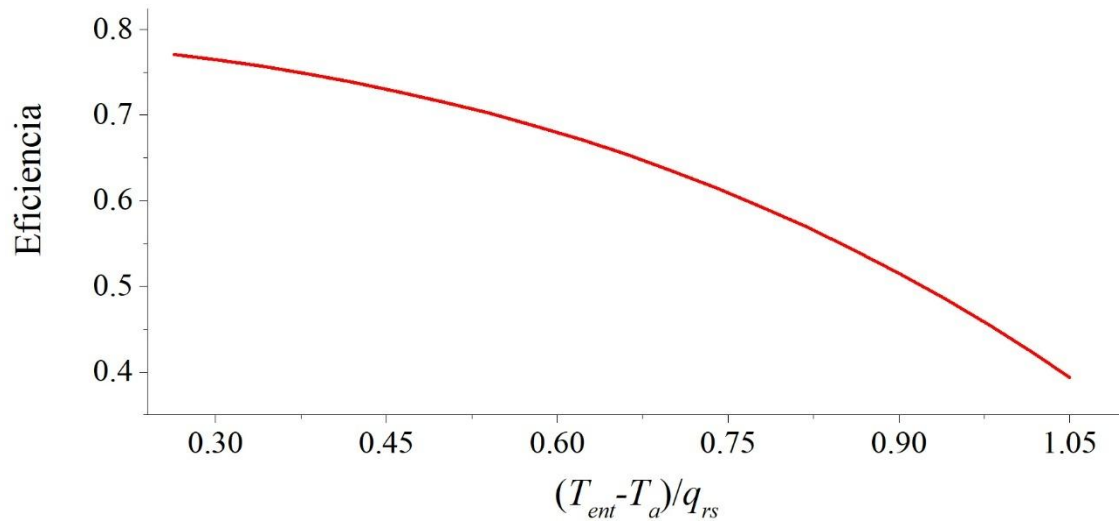


Figura 31. Eficiencia térmica del CSCP empleando sal fundida Hitec como fluido caloportador.

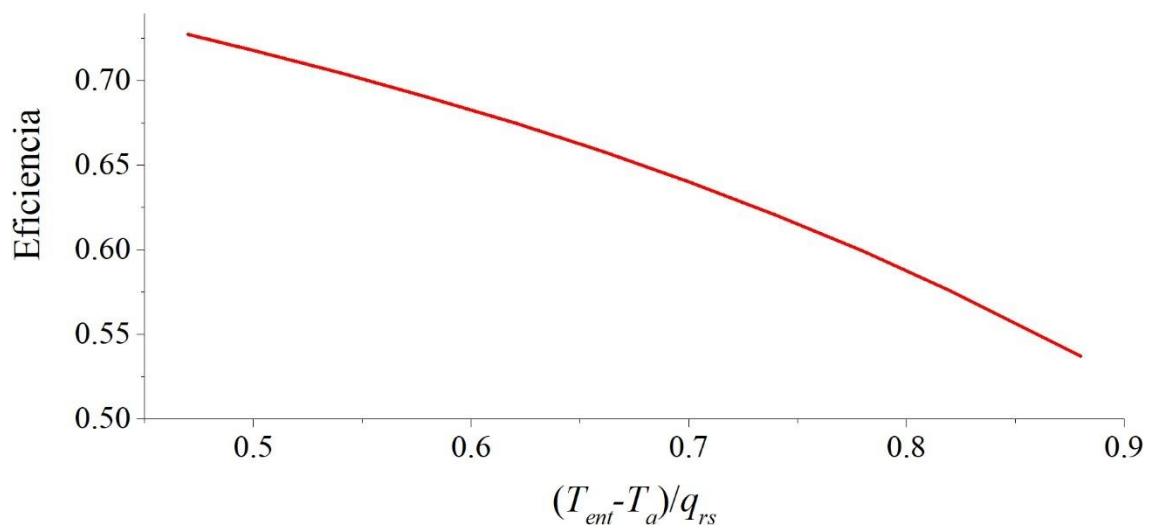


Figura 32a. Eficiencia térmica del CSCP empleando sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ como fluido caloportador.

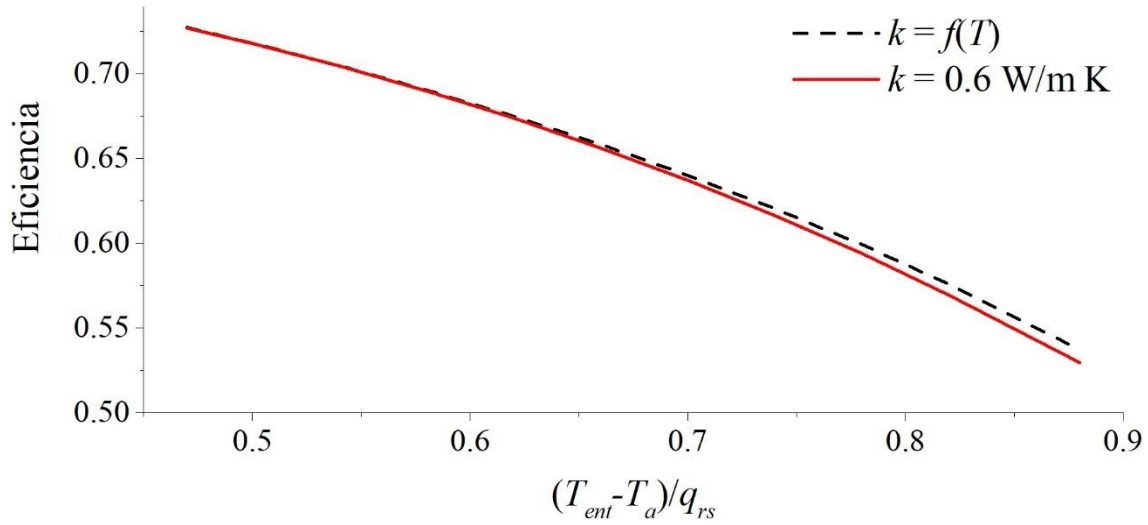


Figura 32b. Comparativa de la eficiencia del CSCP empleando sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ como fluido caloportador, cuando se toma k con un valor constante

Debido al comportamiento que tiene la conductividad térmica de este fluido (ver **Figura 22**), se esperaría que tuviera un cambio significativo en la eficiencia del CSCP. Sin embargo, como se ve en la **Figura 32b**, la cual muestra la eficiencia del CSCP manteniendo constante la conductividad térmica de la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, muestra que no es el caso.

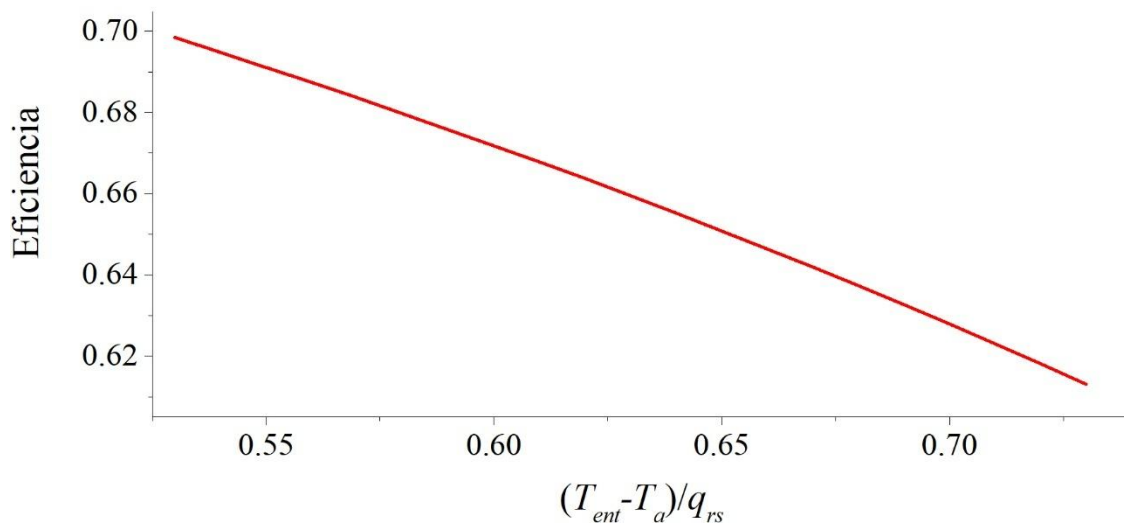


Figura 33. Eficiencia térmica del CSCP empleando sal solar como fluido caloportador.

En la **Figura 34** se compara la eficiencia del CSCP con los diferentes fluidos caloportadores en un rango de operación de $275^{\circ}\text{C} < T < 306^{\circ}\text{C}$; la cual, es válida para todos ellos. Se considera una presión de 10 MPa para el agua utilizada y garantizar con ello que no hay cambio de fase. Como se observa en la **Tabla 5**, el CSCP alcanza las siguientes eficiencias:

Tabla 5. Eficiencias de los fluidos caloportadores en un mismo rango de operación.

	Máxima	Mínima
Agua	0.72351	0.70272
Sodio líquido	0.72349	0.7029
Sal Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0.70813	0.6859
Sal Hitec	0.70576	0.68307
Sal solar	0.69849	0.67503

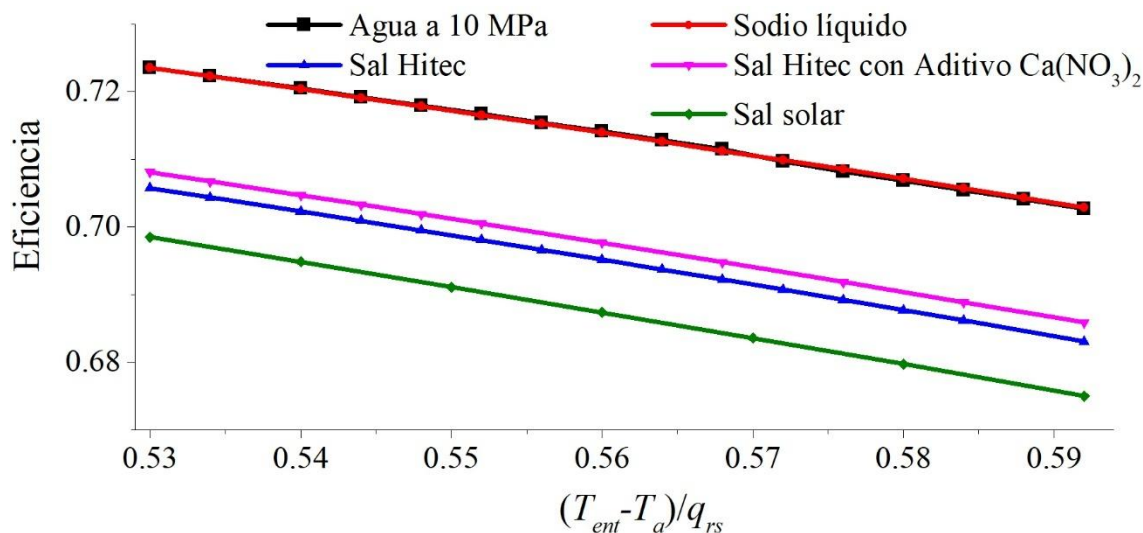


Figura 34. Comparación de las eficiencias térmicas del CSCP empleando los diferentes fluidos caloportadores en un mismo rango de operación.

6.3 Discusión

El fluido caloportador que presenta las mejores características es el agua a 10 MPa, ya que opera a un bajo punto de fusión y un alto punto de ebullición, volviéndolo ideal para evitar la corrosión (Vignarooban et al., 2015). Una de las desventajas que presenta es que opera a altas presiones para poder trabajar en un amplio rango de operación, así como evitar el cambio de fase.

El agua y el sodio líquido se comportan de forma similar en el rango de operación de $275^{\circ}\text{C} < T < 306^{\circ}\text{C}$. Aunque, de manera práctica se tiene que considerar la alta combustibilidad que tiene el sodio líquido (Vignarooban et al., 2015), haciéndolo peligroso al momento de alguna fuga.

Cabe mencionar que en la literatura disponible no se describen con la profundidad requerida las propiedades de los fluidos caloportadores, o bien se han encontrado inconsistencias entre los modelos matemáticos recabados y, en muchas ocasiones, no se presentan como propiedades termodependientes

En algunos casos se tuvieron que proponer algunos valores, por ejemplo, para el caso de la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ se tuvo que considerar la viscosidad dinámica de la sal fundida Hitec. Para el caso de la sal solar, su rango de operación es limitado porque no se encontraron suficientes datos en la literatura.

Uno de los grandes inconvenientes que presenta la sal fundida Hitec, la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y la sal solar es su rango de operación, debido a que poseen un alto punto de fusión, el cual hace que se presenten mayores pérdidas por transferencia de calor hacia el ambiente. Otro problema que presenta el rango de operación de estos fluidos caloportadores es que está limitado por la temperatura máxima a la que puede operar el CSCP.

Para un trabajo futuro se tendrá que obtener la viscosidad dinámica de la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, mediante algún método experimental. Asimismo, se podría seleccionar alguna región del país que tenga un gran recurso solar para contemplar la irradiación solar presente y conocer la eficiencia térmica que tendría el Colector Solar Cilindro-Parabólico, así como la cantidad de energía térmica que se podría obtener de este.

7. Conclusión

El presente trabajo evaluó, mediante el modelado y la simulación, el desempeño térmico de un colector solar cilindro-parabólico utilizando como fluidos caloportadores agua, sodio líquido, sal fundida Hitec, sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y sal solar.

Los valores de eficiencia máxima y mínima de los fluidos caloportadores calculados son (ver **Figuras 29-33**):

- Agua: 0.80036 y 0.70341
- Sodio líquido: 0.78998 y 0.20804
- Sal Hitec: 0.77115 y 0.39364
- Sal Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$: 0.72732 y 0.53725
- Sal solar: 0.69849 y 0.61305

Los fluidos caloportadores que tienen mayor rango de operación son el agua y el sodio líquido con $10^\circ\text{C} < T < 506^\circ\text{C}$ y $100^\circ\text{C} < T < 630^\circ\text{C}$, respectivamente, seguido por la sal fundida Hitec con $142^\circ\text{C} < T < 535^\circ\text{C}$. Aquellos con menor rango de operación son la sal fundida Hitec con aditivo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y la sal solar con $245^\circ\text{C} < T < 450^\circ\text{C}$ y $275^\circ\text{C} < T < 375^\circ\text{C}$, respectivamente.

Este estudio contribuye a entender los fenómenos relacionados con la transferencia de calor en el colector solar cilindro-parabólico y determinar los fluidos caloportadores que maximizan su eficiencia energética.

Referencias

- Bade, M. H., & Bandyopadhyay, S. (2012). *Targeting Minimum Heat Transfer Fluid Flow for Multiple Heat Demands* (pp. 675–679). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59507-2.50127-X>
- Bilal Awan, A., Khan, M. N., Zubair, M., & Bellos, E. (2020). Commercial parabolic trough CSP plants: Research trends and technological advancements. *Solar Energy*, 211, 1422–1458. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.072>
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa* (Tercera). McGraw-Hill.
- Elaouzy, Y., & El Fadar, A. (2024). Solar and Photovoltaics Energy Utilization and Sustainability. In *Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment* (pp. 195–210). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-93940-9.00002-5>
- Fadhel, A., Eddhibi, F., Charfi, K., & Balghouthi, M. (2023). Investigation of a Linear Fresnel solar collector (LFSC) prototype for phosphate drying. *Energy Nexus*, 10, 100188. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100188>
- Hussein, A. K. (2016). Applications of nanotechnology to improve the performance of solar collectors – Recent advances and overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 767–792. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.050>
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092–1105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
- Kontrosh, L. V., Kalinovsky, V. S., Khramov, A. V., & Kontrosh, E. V. (2021). Estimation of the chemical materials volumes required for the post-growth technology manufacturing InGaP/GaAs/Ge with a concentrator and planar α -Si:H/Si solar cells for 1 MW solar power plants. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100186. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100186>
- Machi, M. H., Farkas, I., & Buzas, J. (2024). Enhancing solar air collector performance through optimized entrance flue design: A comparative study. *International Journal of Thermofluids*, 21, 100561. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100561>
- Ortega-Navarro, H. O., & Valle-Pereña, J. A. (2025, February 21). *Prospectivas de Energías Renovables 2012-2026*.
- Quezada–García, S., Sánchez–Mora, H., Polo–Labarrios, M. A., & Cázares–Ramírez, R. I. (2019). Modeling and simulation to determine the thermal

- efficiency of a parabolic solar trough collector system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 16, 100523. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100523>
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2013). Review of solar refrigeration and cooling systems. *Energy and Buildings*, 67, 286–297. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.022>
- SENER. (2025, March 4). *Programas Indicativos para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas (PIIRCE)*. PRODESEN. <https://base.energia.gob.mx/PRODESEN2024/prodesen24-38cap4.PDF>
- Settino, J., Sant, T., Micallef, C., Farrugia, M., Spiteri Staines, C., Licari, J., & Micallef, A. (2018). Overview of solar technologies for electricity, heating and cooling production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 892–909. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.112>
- Shahin, M. S., Orhan, M. F., Saka, K., Hamada, A. T., & Uygul, F. (2023). Energy assessment of an integrated hydrogen production system. *International Journal of Thermofluids*, 17, 100262. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100262>
- Solargis. (2025, February 19). *Mapas de recursos solares y datos SIG*. <https://Solargis.Com/Resources/Free-Maps-and-Gis-Data?Locality=mexico>.
- Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538–553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>
- Tzivanidis, C., Bellos, E., Korres, D., Antonopoulos, K. A., & Mitsopoulos, G. (2015). Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector. *Case Studies in Thermal Engineering*, 6, 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.10.005>
- Vaillon, R., Parola, S., Lamnatou, C., & Chemisana, D. (2020). Solar Cells Operating under Thermal Stress. *Cell Reports Physical Science*, 1(12), 100267. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100267>
- Vignarooban, K., Xu, X., Arvay, A., Hsu, K., & Kannan, A. M. (2015). Heat transfer fluids for concentrating solar power systems – A review. *Applied Energy*, 146, 383–396. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.125>
- Yang, L., Huang, J., & Zhou, F. (2020). Thermophysical properties and applications of nano-enhanced PCMs: An update review. *Energy Conversion and Management*, 214, 112876. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112876>