

## Modelo analítico transitorio de una red de calentadores solares con depósito de almacenamiento

Transient analytical model of a solar heater net with storage tank

Nancy García Garcidueñas<sup>1</sup>, Sofía Guadalupe Hernández Bocanegra<sup>1</sup>, Elizet Sánchez Balderas<sup>1</sup>, Jhoana Itzel Vargas Gómez<sup>1</sup>, María Sonia Vázquez Cabrera<sup>1</sup>, Carlos Alberto Rubio Jiménez<sup>1</sup>, Jorge Luis García Castillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciencia Ambiental, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca; Universidad de Guanajuato. [n.garcia@ugto.mx](mailto:n.garcia@ugto.mx), [sg.hernandez@ugto.mx](mailto:sg.hernandez@ugto.mx), [e.sanchez@ugto.mx](mailto:e.sanchez@ugto.mx), [ji.vargas@ugto.mx](mailto:ji.vargas@ugto.mx), [ms.vazquez@ugto.mx](mailto:ms.vazquez@ugto.mx), [carlos.rubio@ugto.mx](mailto:carlos.rubio@ugto.mx), [garcia.jl@ugto.mx](mailto:garcia.jl@ugto.mx)

### Resumen

A nivel nacional, los sectores manufactureros y de servicios presenta una demanda importante de vapor de agua a fin de satisfacer sus procesos. Típicamente, esta calidad de agua se logra a partir de la combustión de combustibles fósiles. Algunas empresas han empezado a adoptar redes de colectores solares para la generación del vapor a fin de reducir sus emisiones de GEI; sin embargo, su dependencia con las condiciones ambientales genera limitantes importantes en procesos continuos. Este aspecto negativo se acrecienta en empresas de menor tamaño las cuales no cuenta con amplias superficies expuestas a la radiación solar dentro de su infraestructura para la colocación de redes robustas. En este trabajo se propone y analiza la respuesta transitoria de una red de calentadores solares con depósito de almacenamiento como respuesta para subsanar esta problemática. La integración del depósito en la red permite i) incrementar la energía térmica del agua una vez elevada su temperatura en la red de calentadores solares a partir de hacer uso de aceites térmicos y ii) mantener las condiciones alcanzadas que permitan mantener el proceso industrial en continuo. A partir de análisis teóricos y numéricos se determinó la configuración del depósito, el cual fue construido y probado dentro de un set experimental de una red de calentadores a nivel prototipo. Las condiciones de temperatura y presión del agua alcanzadas y tiempo de espera son evaluadas y reportadas en el presente trabajo.

**Palabras clave:** Red de calentadores solares, depósito de almacenamiento, análisis transitorio

### Introducción

De acuerdo con las agendas internacionales, la necesidad de cumplir con los ODS de las Naciones Unidas (2015) es primordial en el mediano plazo. El agua es un recurso vital para el desarrollo de los diferentes sectores productivos, siendo este vital líquido utilizado para diferentes condiciones de acuerdo con los procesos a efectuar. En un sector particular, agua a condiciones de saturación o sobrecalentamiento es utilizada para diferentes procesos enfocados a la calefacción de espacios o para la transformación de energía térmica en energía mecánica o eléctrica requeridos en los procesos (SENER (2020)).

Comúnmente el sector manufacturero y de servicios hace uso de calderas pirotubulares o acuaturbularas a base de combustibles fósiles para generar vapor de agua, siendo clave para sus procesos (Ganapathy (2002)). Sin embargo, las emisiones de GEI generadas como resultado de los procesos combustión generan impactos ambiental negativos significativos. Se estima que, a nivel mundial, el 24% de las emisiones total son resultado de estos sistemas de generación de vapor (Agencia Internacional de Energy (2024)). En México, en el 2020, se estimó que 80 millones de toneladas de CO<sub>2eq</sub> fueron generadas por calderas en procesos industriales (INEGI (2023)).

En general, este tipo de calderas en un proceso industrial, teniendo agua como fluido de trabajo, es almacenado en un depósito, siendo después suministrada a la caldera para su calentamiento a partir de combustible fósil también suministrados. Con ello la caldera entrega al proceso vapor de agua de forma continua una vez lograda su condición de estabilización después del arranque. La Figura 1 (izquierda) muestra el comportamiento transitorio del calentamiento de agua a las condiciones requeridas (línea negra).

Su nivel energético gradualmente asciende desde el arranque de la caldera hasta lograr las condiciones de vapor saturado, momento en el cual se inyecta este producto al proceso industrial o de manufactura (línea azul). A partir de este punto, la condición del vapor de agua se mantiene. Durante este proceso, se liberan a la atmósfera GEI de forma constante (línea roja). Además, se libera calor de la caldera que no es aprovechado y, de igual forma, los condensados de agua después del proceso industrial son desechados a la red sanitaria o drenaje de la instalación industrial, siendo estos remanentes los principales problemas que este tipo de sistemas presentan, impactando negativamente en la situación de medioambiental a nivel mundial.

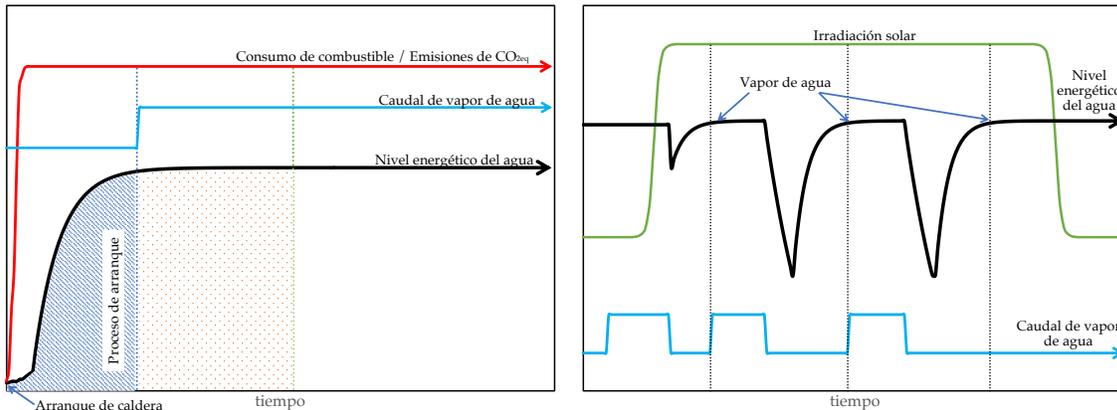


Figura 1. (izquierda) Comportamiento del nivel energético del agua hacia el proceso, el caudal entregado y las emisiones de CO<sub>2eq</sub> con el tiempo para un arreglo de calentamiento de agua exclusivamente con caldera a base de combustibles fósiles. (derecha) Comportamiento de la irradiación solar, el nivel energético del agua hacia el proceso y el caudal con el tiempo para un arreglo de calentamiento de agua con calentadores solares.

Por otra parte, empresas globales han hecho uso de redes de calentadores de agua para la generación de vapor a ser usado dentro de sus procesos, para lo cual han hecho uso de las amplias superficies expuestas a radiación solar a fin de colocar estas redes, asegurando con ello la continuidad del vapor de agua para sus procesos. Empresas de menor infraestructura han buscado adoptar estas tendencias de generación de vapor a partir de fuentes renovables, sin embargo, la principal complicación se observa en la dependencia que estas tienen con las condiciones ambientales, lo cual causa una discontinuidad de generación de vapor a lo largo del tiempo (Figura 1. (derecha)). Derivado de ello, se han hecho uso de calderas auxiliares a base de combustibles fósiles a fin de mantener la continuidad de vapor para el proceso, lo cual implica gastos de inversión y mantenimiento adicionales, así como emisiones de GEI.

Comúnmente las redes de colectores solares hacen uso de depósitos de almacenamiento para reducir lo previamente mencionado. Depósitos de circulación directa (fluido directamente calentado y almacenado) y de circulación indirecta (calor transferido al fluido a través de intercambiadores de calor) son las principales tendencias, siendo seleccionados de acuerdo con factores tales como la calidad del agua a ser calentada, el costo de inversión y mantenimiento, la pureza del vapor de agua requerido en el proceso, etc. Al momento no se identifican estudios que consideren los dos tipos de depósitos en uno solo, esto es, *i)* incrementar la energía térmica del agua una vez elevada su temperatura en la red de calentadores solares (circulación directa) a partir de hacer uso de aceites térmicos (circulación indirecta) y *ii)* mantener las condiciones alcanzadas que permitan mantener el proceso industrial en continuo. Por ello, este estudio propone una red mejorada de calentadores solares considerando un depósito de almacenamiento basado en lo previamente mencionado que permita mantener la calidad energética del agua a condiciones de saturación para un proceso industrial de forma continua (Allouhi et al. (2017), Foreno-Chacón y Garzón-Castañeda (2020), Tamme et al. (2005)).

## Metodología

El análisis se basa en una red como la mostrada en la Figura 2. En este estudio, se considera exclusivamente la sección limitada por el recuadro rojo seccionado correspondiente al sistema de colectores solares y depósito de almacenamiento. En la Figura 3 se desglosa esta sección remarcada y de interés para este estudio y en la cual se muestra la línea de calentamiento de agua proveniente del depósito elevado (Estado

3), la cual es presurizada para ser después inyectada a la red de calentadores solares que, para este estudio a nivel escala solamente se considera un calentador solar; y que finalmente es suministrada al depósito de almacenamiento a fin de realizar las dos funciones previamente mencionadas. Una vez que se demanda vapor de agua en el proceso, este es entregado tomado del citado depósito (Estado 6). Por otra parte, aceite térmico es utilizado dentro del depósito de almacenamiento para lograr los propósitos esperados en este trabajo. En el diagrama se muestra un tanque elevado el cual almacena este aceite térmico, siendo bombeado hasta un sistema de colectores solares para aumentar su temperatura hasta condiciones cercanas a su saturación (alrededor de 200°C). Después, este es suministrado al depósito de almacenamiento (Estado 7) dentro del cual es hecho pasar por una tubería espiral por su parte interior a fin de incrementar el área de transferencia de calor permitiendo ser aprovechada por el agua previamente calentada a fin de mantener su condición térmica y lograr la condición de cambio de fase. Finalmente, este aceite con bajo nivel energético sale del depósito para ser nuevamente retornado al depósito de almacenamiento (Estado 8) y continuar con ello el ciclo.

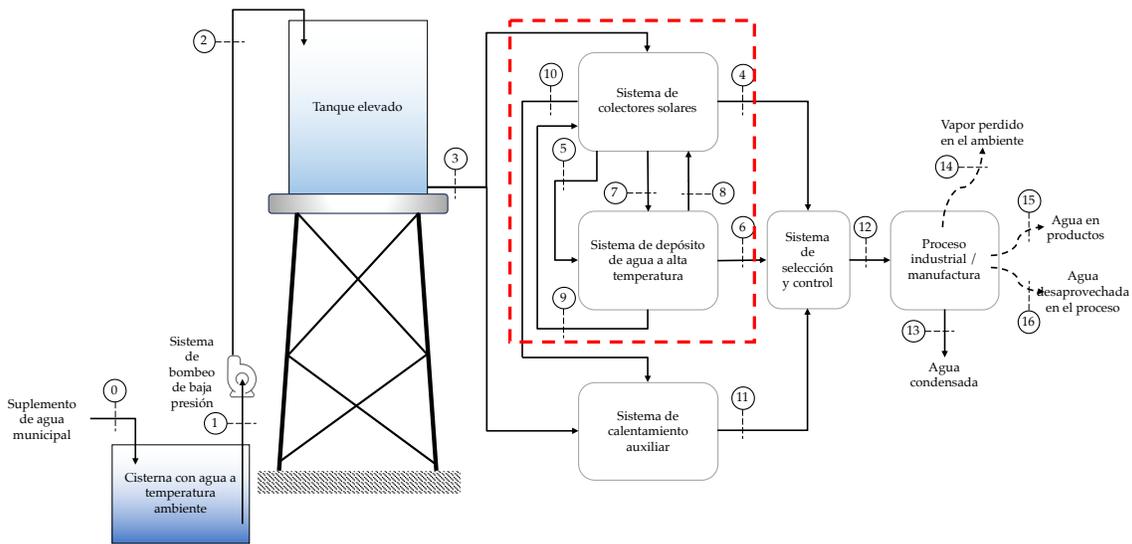


Figura 2. Diagrama esquemático de la red de calentadores solares con depósito de almacenamiento para la generación de agua a condiciones de saturación.

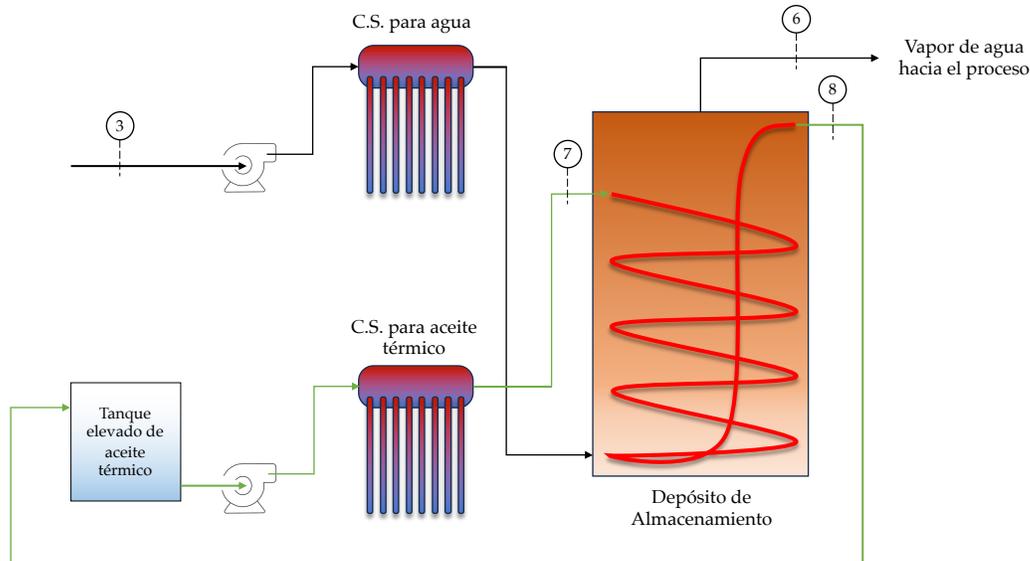


Figura 3. Diagrama esquemático de la sección bajo análisis considerando el sistema de colectores solares y el sistema de depósito de agua a alta temperatura.

## Análisis analítico

Debido a que todo el sistema se basa en el comportamiento que tendrá el aceite a alta temperatura con el agua, considerando que en todo momento se mantiene fluyendo (conservación de masa), el análisis analítico se basa en la conservación de energía para un intercambiador de calor en condiciones de diseño (Ec. (1)).

$$Q = UA\Delta T_{LM} \quad (1)$$

Siendo  $Q$  la carga térmica total a transferir [W],  $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor [ $W/m^2\text{°C}$ ],  $\Delta T_{LM}$  es la diferencia de temperaturas media logarítmica [ $\text{°C}$ ] y  $A$  es el área de transferencia de calor. Se emplea agua como fluido frío considerando que esta ingresa al intercambiador de calor después de pasar por el colector solar a una temperatura de  $70\text{°C}$  y desea ser llevada a  $100\text{°C}$ , esto con el propósito de emplear las ecuaciones de diseño en una sola fase. Se emplea la metodología de diseño propuesta por Pérez et al. (2019) la cual consiste en determinar el número de Reynolds para el lado coraza y dentro de los tubos (Ec. (2)), el cual depende de las propiedades físicas y geometría del tubo. Con ello se determina el coeficiente convectivo de transferencia de calor definido a partir de número de Nusselt.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

$$h_{tubos} = \frac{k_{aceite}}{d_i} \cdot 0.023 Re^{0.8} Pr_{aceite}^{0.33} \quad (3)$$

Debido a que se está considerando un serpentín como medio para transferir calor, el coeficiente pelicular de transferencia de calor del agua debe ser corregido  $h_{tubos,c}$  Ec. (4).

$$h_{tubos,c} = h_{tubos} \left[ 1 + 3.5 \left( \frac{d_i}{D_h} \right) \right] \quad (4)$$

De manera similar para el lado coraza, se determina el coeficiente convectivo a partir de la Ec. (5).

$$h_{coraza} = 0.6 \frac{k_{aceite}}{D_{eq}} \cdot Re^{0.5} Pr_{agua}^{0.31} \quad (5)$$

Con base en estos coeficientes, el coeficiente global de transferencia de calor esta dado como lo muestra la Ec. (6).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{tubos,c}} + \frac{1}{h_{coraza}} + \frac{\ln \left( \frac{d_o}{d_i} \right)}{2\pi k L_{serp}}} \quad (6)$$

Donde  $d_o$  es el diámetro externo de la tubería,  $k$  es la conductividad del material y  $L_{serp}$  es la longitud del serpentín. Finalmente, introduciendo la Ec. (6) en la Ec. (1) se obtiene el área de transferencia de calor del equipo,  $A$  (Ec. (7)). Esta área superficial puede ser expresada en términos de la longitud del serpentín  $L_{serp}$  y del número de vueltas  $N$  (Ec. (8)). La longitud del serpentín depende de la separación entre vueltas  $p$ .

$$A = N(\pi d_o L_{serp} / N) \quad (7)$$

$$L_{serp} = N[\pi D_h + p^2]^{1/2} \quad (8)$$

El sistema de ecuaciones se resuelve a partir de métodos numéricos teniendo como variable dependiente el área de transferencia de calor y la longitud del serpentín para transferir la carga térmica. Los resultados generados son validados con base en resultados previos y se lleva a cabo un análisis de sensibilidad realizando la variación del paso para distintos flujos máxicos de aceite. Estos modelado permitió definir la mejor configuración posible para el sistema de intercambio de calor y con ello realizar el modelado numérico del sistema. Como se observa, este análisis es a alto nivel, por lo cual es necesario realizar análisis numéricos a fin de definir el comportamiento de la presión temperatura y velocidad dentro del sistema.

## Análisis numérico

A partir de las ecuaciones de conservación de masa sin acumulación de materia (Ec. (9)), momentum considerando los efectos de Stokes (Ec. (10)) y energía despreciado generación interna de energía y términos viscosos disipativos (Ec. (11)), y con base en los resultados generados con el análisis analítico enfocados a definir el mejor comportamiento térmico, se construyó el modelo CAD del sistema (Figura 4), tomando en cuenta un depósito escalado a fin de reducir el tiempo de cómputo, para después ser analizado de forma numérico bajo las ecuaciones gobernantes mencionadas.

$$\nabla \vec{V} = 0 \quad (9)$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho g \quad (10)$$

$$\rho C \frac{DT}{Dt} = -\nabla kT \quad (11)$$

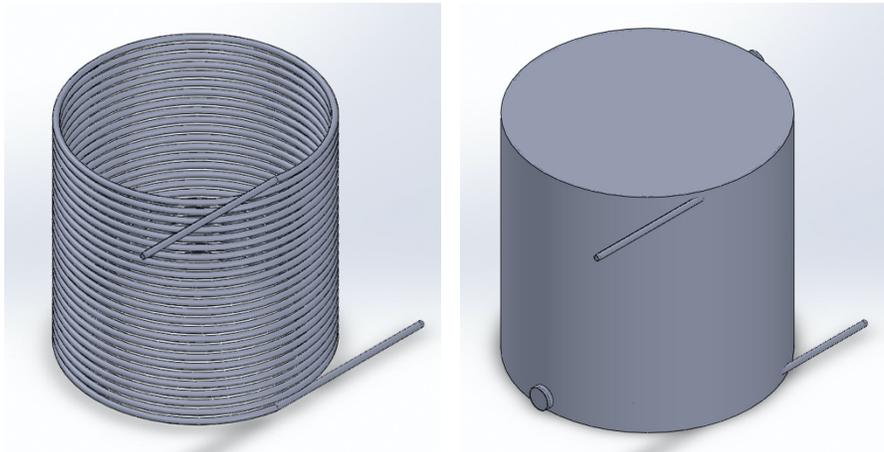


Figura 4. Modelo CAD del sistema a ser analizado, siendo (izquierda) el arreglo en espiral y (derecha) el depósito de almacenamiento que alberga al espiral. Se observan las zonas de entrada y salida de los fluidos consideradas para este análisis numérico.

A partir del uso de herramientas computacionales se discretizó el modelo considerando al menos un cuarto de millón de elementos, siendo este el resultado de un análisis de sensibilidad de malla. El modelo fue resuelto a partir de técnicas de volumen finito basado en el modelo SIMPLE y considerando un modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  con bajo número de Reynolds. Se asumió un flujo másico de agua y aceite constante a la entrada del sistema, así como razón de conservación de masa y presión relativa cero a la salida del sistema. La temperatura de entrada del agua y el aceite fue de 70°C y 180°C, respectivamente, con base en lo previamente mencionado. Las propiedades de los fluidos se ajustaron como dependientes de la temperatura. El depósito se consideró adiabático en interacción con el entorno. A fin de reducir el tiempo de cómputo, se consideró una resistencia de contacto de 0.1 m-K/W entre el aceite y el agua a lo largo de la superficie del serpentín a fin de cuantificar la resistencia generada por la pared del tubo que contiene al aceite. Las condiciones de frontera fueron consideradas como condiciones iniciales en el tiempo cero. Con ello se definieron los perfiles de temperatura y presión del sistema siendo los resultados de temperatura validados a partir del análisis analítico definido en la sección previa. Con base en esta información se construyó un prototipo del sistema.

## Análisis experimental

Con base en los resultados obtenidos en las dos secciones previas se construyó un prototipo del depósito de almacenamiento. A fin de evitar riesgos potenciales en el sistema como en el equipo de trabajo, el prototipo

se modificó en cuanto a su forma, manteniendo en todo momento el área total de transferencia de calor, la separación y paso a lo largo de toda la espiral, y las condiciones de operación. La modificación realizada se centró en generar tres arreglos en paralelo (columnas) dentro del depósito en lugar de una sola columna, como lo muestra la Figura 5. El sistema fue construido a partir de tubería de cobre flexible de 0.635 mm de diámetro interno y 0.08 mm de espesor de pared. Se generaron en total 222 vueltas (1 m de longitud de tubo por vuelta) las cuales cumplen con la superficie requerida definida por el análisis analítico. A fin de satisfacer en su mayoría un flujo en contra corriente, la sección de entrada y salida del aceite térmico fue por su parte superior, mientras que el agua a ser calentada/mantenida fue inyecta por su parte inferior, saliendo del depósito por la parte superior. Se consideró un aceite térmico comercial con calor específico cercano a los 1.8kJ/kg-K y viscosidad de 0.004 Pa-s a condiciones estándar.

A partir de un Diseño de Experimentos de tipo 2<sup>k</sup> factorial de 8 bloques (días de prueba) se definieron las pruebas a realizar, teniendo como variables independientes la radiación solar, el caudal de agua y el caudal de aceite entrando al sistema. A su vez, las variable de dependiente de interés es la temperatura del agua a la salida del depósito de almacenamiento. Así, la Tabla 1 muestra los experimentos consideradas con base en este DoE.

El análisis del prototipo se realizó con un set experimental similar a lo esquematizado en la Figura 2. La línea de agua es tomada desde un depósito de almacenamiento de agua elevado, siendo a continuación presurizado con un presurizador de ½ HP para después ser suministrado en un calentador solar de 12 tubos. A El agua calentada es después suministrada al depósito de almacenamiento para ser calentada/mantenida y finalmente regresada al depósito inicial, manteniendo en todo momento el caudal de agua a lo largo de la red. Por otra parte, el aceite térmico es tomado de un tanque elevado para ser impulsado por una bomba de aceite de 1 HP, logrando con ello ser suministrada a un calentador de 18 tubos para después ser suministrada al depósito de almacenamiento, siendo retirada de este para ser nuevamente entregada al depósito inicial manteniendo en todo momento el caudal de aceite en un circuito continuo. Medidores de caudal te tipo turbina son colocado tanto para el aceite como para el agua después de ser incrementada su presión, así como antes de ser devueltos a los respectivos depósitos. Presiones y temperaturas de ambos fluidos son medidas con el apoyo de manómetros y termopares tipo k siendo la señal procesada en tarjetas de adquisición de datos después de ser presurizadas, después de pasar por los calentadores solares y después de ser removidas del depósito de almacenamiento a fin de conocer los estados termodinámicos en estas secciones. La radiación solar es medida con un irradiómetro a lo largo de las pruebas.



Figura 5. Arreglo del espiral para movimiento del aceite térmico a lo largo del depósito auxiliar.

**Tabla 1.** Diseño de experimentos para el análisis

Exp.	Irradiación [W/m <sup>2</sup> ]	Caudal agua [kg/s]	Caudal aceite [kg/s]	Exp.	Irradiación [W/m <sup>2</sup> ]	Caudal agua [kg/s]	Caudal aceite [kg/s]
1	500	0.01	0.005	13	925	0.02	0.0075
2	925	0.02	0.0075	14	1350	0.03	0.005
3	1350	0.03	0.01	15	500	0.01	0.01

4	1350	0.01	0.01	16	1350	0.01	0.01
5	500	0.03	0.005	17	500	0.03	0.005
6	925	0.02	0.0075	18	925	0.02	0.0075
7	925	0.02	0.0075	19	925	0.02	0.0075
8	500	0.01	0.005	20	500	0.03	0.01
9	1350	0.03	0.01	21	1350	0.01	0.005
10	925	0.02	0.0075	22	500	0.01	0.01
11	1350	0.01	0.005	23	925	0.02	0.0075
12	500	0.03	0.01	24	1350	0.03	0.005

## Resultados

A partir del modelado analítico realizado se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 6. En esta figura se observa la dependencia no lineal del área de superficie para transferir calor en función del paso entre tubos de la espiral dentro del sistema a diferentes caudales de aceite para un diámetro interno de 0.6 mm. En general, se observa una menor demanda de área de transferencia de calor a medida que el paso se hace más pequeño, teniendo una mayor relevancia a mediana que el caudal de aceite es elevado. Este comportamiento se debe al incremento del coeficiente global de transferencia de calor derivado de un incremento del coeficiente convectivo en el lado de la coraza cauda por la afectación que el número e Reynolds presenta debido al poco espacio que tiene el fluido para moverse entre los tubos de la espiral. Por ello, tener un paso pequeño permitirá reducir el área de transferencia de calor requerida reduciendo con ello la longitud de tubería a ser demandada.

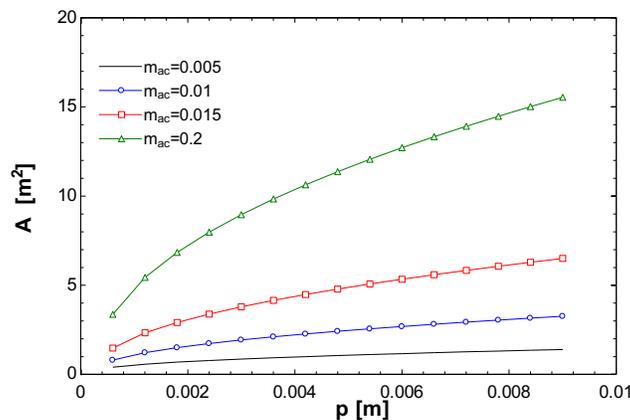


Figura 6. Área de superficie requerida en función del paso entre espiras a diferentes caudales.

Un aspecto importante para considerar es la caída de presión resultante en los cálculos, la cual se determina teóricamente a partir de la ecuación de Bernoulli ajustada de acuerdo con la espiral. Los resultados de diseño para un flujo másico de aceite de 0.015 kg/s (54 kg/h) presentan la mejor relación entre el paso, el área de transferencia de calor y la caída de presión. Los resultados de diseño se muestran a continuación en la Tabla 2. De acuerdo con estos resultados, un paso de 8 mm requiere un área de transferencia de calor de 5.584 m<sup>2</sup> equivalente a 222 m de longitud de tubería de 0.635 mm de diámetro interior.

La Figura 7 (izquierda) muestra los contornos de temperatura definidos a partir del análisis numérico realizado para el sistema escalado. El agua a condiciones de 70°C entra por la parte inferior del depósito (zona azul), siendo gradualmente calentada dentro del depósito, saliendo por la parte superior del depósito (zona verde) a una temperatura máxima de 110.5°C. A lo largo de esta transición se observa gradientes bajos de temperatura a lo alto del depósito. Por otra parte, el aceite térmico entra al espiral a una temperatura de

180°C, transfiriendo esta energía al agua hasta llegar a 115.3°C a la salida. En general, estos resultados indican que el sistema permite incrementar la temperatura del agua hasta condiciones de saturación, así como mantenerla. Por otra parte, la Figura 7 (derecha) muestra el contorno de presiones de los fluidos a su paso dentro del depósito de almacenamiento. En el caso del agua se observa una variación de presión entre la entrada y salida de 5.5 kPa, mientras que para el aceite esta variación de presión es de 17.7 kPa que, a pesar de que la viscosidad del aceite es mucho menor que la del agua, el hacerlo pasar por una sección transversal reducida genera este incremento de caída de presión. Estos resultados indican un consumo de energía importante para hacer fluir el aceite dentro del depósito, lo cual se debe satisfacer con el equipo de bombeo destinado para este fin.

**Tabla 2.** Resultados analíticos de diseño para el espiral a ser utilizado dentro del depósito de almacenamiento.

$p$ [mm]	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$L_{serp}$ [m]
6.4	5.024	199.9
7.2	5.312	211.4
<b>8.0</b>	<b>5.584</b>	<b>222.2</b>
8.8	5.841	232.4
9.6	6.086	242.1

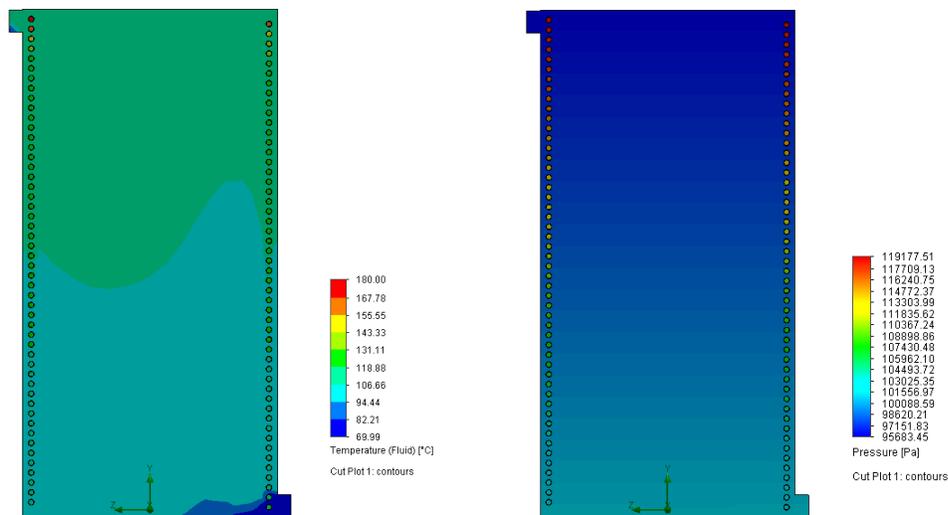


Figura 7. Contornos de temperatura (izquierda) y presión (derecha) del depósito de almacenamiento generados numéricamente.

Para el análisis experimental, el serpentín fue construido de acuerdo con las modificaciones mencionadas anteriormente. La Figura 5 y Figura 8 a) muestra vistas de éste con la tubería indicada y usando separadores para mantener el paso requerido. De igual forma, el set experimenta basado en lo esquematizado en las Figuras 2 y 3 fue construido. La Figura 8 b) a d) muestra vistas de éste. Se realizaron pruebas de funcionalidad en las cuales se observa que el set experimental permite variar el caudal de agua de 13 a 20 LPM alcanzando presiones monoméricas desde 9 a 20 psi; y para el aceite caudales de 35 a 38 LPM con variaciones de presión de 20 a 30 psi.

Lamentablemente, las condiciones ambientales a lo largo del mes de Julio no permitieron probar el sistema propuesto con base en el DoE definido debido a la baja irradiación solar causada por las lluvias, por lo cual no se reportan resultados experimentales los cuales permitirán observar la respuesta transitoria del sistema. En cuanto se tengan condiciones favorables se evaluará esta parte experimental.



Figura 8. Serpentin del depósito de almacenamiento y componentes del set experimental.

## Conclusiones

Los resultados analíticos muestran que un depósito de almacenamiento acoplado a una red de calentadores solares considerando un arreglo de tipo serpentin con tubo de 0.635 mm, paso de 8 mm y 222 metros de longitud permite tener un área reducida a un cauda definido considerando aceite como fluido de trabajo.

De acuerdo con los análisis numéricos, esta configuración permite alcanzar temperaturas de agua dentro del depósito de almacenamiento oscilantes a las condiciones de saturación, considerando que el fluido fue previamente calentado alcanzando temperaturas de alrededor de 70°C. En este sentido, el aceite térmico como fluido de trabajo presenta reducciones de temperatura de 50°C.

La caída de presión de la línea de aceite térmico es importante, siendo esta la mayor demanda de energía que se tiene en todo el proceso de generación de vapor bajo esta propuesta.

Las condiciones ambientales no permitieron evaluar experimentalmente al prototipo de acuerdo con el DoE propuesto debido a la baja irradiación solar y lluvias presentes.

## Bibliografía

- A. Allouhi, Y. Agrouaz, Mohammed Benzakour Amine, S. Rehman, MS Buker, T. Kousksou, A. Jamil, A. Benbassou, Optimización del diseño de un sistema de calentamiento solar térmico multitemperatura para un proceso industrial, *Energía aplicada*, Volumen 206, 2017, Páginas 382-392, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.196>.

- Forero-Chacón, N.L. y Garzón-Castañeda, P.D. (2020). Medida de la eficiencia de un colector solar de placa plana, mediante un montaje experimental desarrollado con instrumentación virtual. *Tecnura*, 24(65) 109-124. DOI: 10.14483/22487638.15929.
- Ganapathy, V. (2002). *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications, and Calculations*. Ucrania: Taylor & Francis, ISBN: 9780824743673, 0824743679
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024), <https://inegi.org.mx>.
- International Agency of Energy (2024), Report of worldwide energy consumption, <https://www.iea.org/data-and-statistics>
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible: Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/goals>
- Pérez Sánchez, A., Pérez Sánchez, E., Heredia Sánchez, A., & Pazos Amayuela, L. (2019). Design of helical-coil heat exchanger for acetone cooling. *Nexo Scientific Journal*, 32(01), 61–74. <https://doi.org/10.5377/nexo.v32i01.7988>
- Rey Martínez, F. J., Valasco Gomez, E. (2006). *Eficiencia energética en edificios*, (E-Book). España: Ediciones Paraninfo, S.A., ISBN: 9788497324199, 8497324196
- Secretaría de Energía (2020), Reporte energético nacional 2020, <https://sie.energia.gob.mx/inicio/>
- Tamme, R, Steinmann, W, & Laing, D. "Thermal Energy Storage Technology for Industrial Process Heat Applications." *Proceedings of the ASME 2005 International Solar Energy Conference*. Solar Energy. Orlando, Florida, USA. August 6–12, 2005. pp. 417-422. ASME. <https://doi.org/10.1115/ISEC2005-76250>