

## ALMACENAMIENTO TERMOSOLAR

Hernández Camacho Nereyda Vanessa (1), Martínez Rodríguez Guillermo (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato] | [nv.hernandezcamacho@ugto.mx]

2 [Departamento en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | [guimarod@ugto.mx]

### Resumen

La energía solar es una fuente de energía renovable, su potencial es ilimitado; sin embargo, se tienen retos por resolver con respecto a la variabilidad puntual, diaria y estacional. Las limitaciones tecnológicas, área de instalación, niveles máximos de temperatura y almacenamiento son variables a considerar en el diseño, construcción y operación de cualquier instalación termosolar. En este proyecto se realizó el diseño, construcción y operación de un dispositivo de almacenamiento termosolar, para validar de manera experimental un modelo teórico desarrollado, en el modelo se plantea combinar una corriente caliente y una corriente fría y predecir la temperatura de salida de la mezcla. El error entre la temperatura de salida predicha por el modelo y la medida experimental fue del 4.66 %. En una instalación termosolar el almacenamiento es parte de la estrategia de diseño para suministrar el requerimiento caliente del proceso.

### Abstract

Solar energy is a renewable source of energy with an unlimited potential; nevertheless, this technology faces several challenges due to the hourly, daily, and seasonal variability. Technology limitations, installation area, the maximum levels of temperature, and the storage are variables to consider for the design, construction, and operation of a thermosolar installation. In this project, we carry out the design, construction, and operation of a thermosolar device for storage, in order to experimentally validate a theoretical model. In such a model, we mix a hot and a cold current of liquid and predict the temperature of the mixture. The difference between the calculated and the experimental error was 4.66 %. As an interesting conclusion, the storage is one of the most important strategies to design and assure the hot supply required by the process.

### Palabras Clave

Energía solar; Consumo energético; Fuentes renovables; Balance de energía; Aplicaciones térmicas.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad la energía solar sólo cubre una pequeña fracción de la demanda mundial de energía [1]. Resulta de interés mundial que en el futuro cercano la fracción sea uno, para lo cual es necesario maximizar la explotación del recurso solar resolviendo la variabilidad de este, reduciendo el área de captación y los costos asociados con la construcción, instalación y operación de las instalaciones termosolares. La energía térmica solar es una de las tecnologías renovables más prometedoras que podría adoptarse en diferentes sectores industriales [2], reduciendo con ello el uso de fuentes que no son amigables con el medio ambiente o de recursos no renovables. Sin embargo, para tal fin se debe de garantizar el suministro de la carga al nivel de temperatura objetivo para cualquier proceso ya sea continuo o por lote.

Debido a lo elevado del costo de los combustibles fósiles y el daño al medio ambiente, el sector industrial se ve obligado a buscar la integración de sistemas limpios, los cuales hasta el momento garantizan una reducción importante en las emisiones de CO<sub>2</sub> [3].

Un sistema de almacenamiento termosolar es una tecnología en desarrollo, que resulta de crear un depósito que sea capaz de almacenar un fluido a una determinada temperatura, que por lo general se busca sea mayor a la temperatura ambiente. Este depósito es creado con fines de tener una reserva energética para usos posteriores o de emergencia, lo cual permite ampliar las aplicaciones tanto domésticas como industriales.

El almacenamiento implica el uso de la energía solar, en el cual se hace uso de colectores solares para producir la energía necesaria con la cual se pueda elevar la temperatura de dicho fluido; los colectores son dispositivos que absorben la radiación proveniente del sol y la transforman en energía térmica, con la cual se calienta el fluido de trabajo.

En la actualidad existen dos tecnologías para el almacenamiento de energía térmica a nivel comercial:

- a) Almacenamiento por sales:  
El uso de sales fundidas es el más extendido dentro de este grupo, debido a sus características térmicas, disponibilidad y costos; destacando la llamada Sal Solar (60% NaNO<sub>3</sub> y 40% KNO<sub>3</sub>) y la sal ternaria HitecXL (48% Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 7% NaNO<sub>3</sub>, y 45% KNO<sub>3</sub>). Esta tecnología es la más empleada en las plantas termosolares ya que permite llegar a temperaturas de operación de más de 550°C.
- b) Almacenamiento por aislamiento térmico:  
Este tipo de almacenamiento está ampliamente extendido por las propiedades térmicas de los materiales que lo componen, y los bajos costos, la seguridad en su manejo y tecnológicamente ha alcanzado la madurez.

## Consumo de energía del sector industrial

El sector industrial consume el 50 % de energía mundial, y la mayor parte de esta energía es usada en los sectores de construcción, agricultura, minería y manufactura [3]. En la IMAGEN 1 se muestra el consumo energético industrial previsto para el año 2030 [4]. Esta energía se obtiene principalmente por la quema de combustibles fósiles.

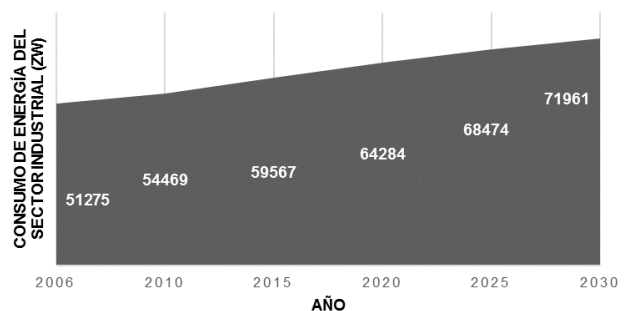


IMAGEN 1. Tendencia del consumo energético del sector industrial a nivel global [4].

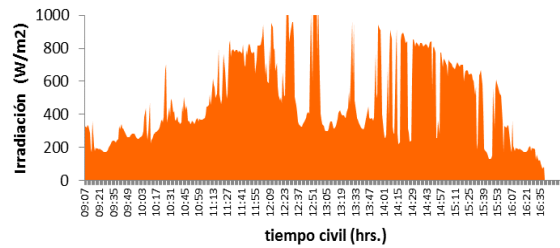
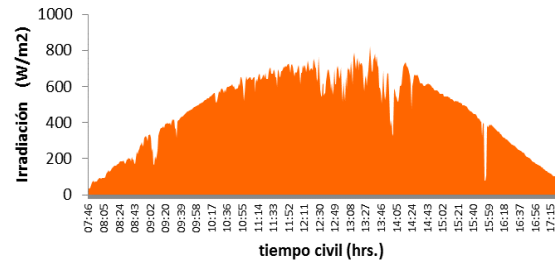
La distribución del consumo energético indica que cerca del 13% de las aplicaciones industriales

térmicas requieren bajas temperaturas (máximo 100°C), el 27% requieren temperaturas medias (200°C) [5] y 60% necesitan temperaturas mayores a 200°C como es el caso de la industria cerámica, vidriera y del acero [6]. En la Tabla 1 se presentan algunos procesos industriales y la temperatura a la que operan [7].

**Tabla 1. Algunos procesos industriales y temperaturas a las que se trabaja.**

Industria	Proceso	Temperatura (°C)
Lechera	Presurización	60-80
	Esterilización	100-120
	Secado	120-180
	Agua de alimentación a calentadores	60-90
Enlatados	Esterilización	110-120
	Pasteurización	60-80
	Cocción	60-90
Textil	Blanqueado, Pintado	60-90
	Secado, Desengrasado	100-130
	Pintado	70-90
	Fijación	160-180
Papel	Cocción y Secado	60-80
	Agua de alimentación a calentadores	60-90
	Blanqueado	130-150
Química	Jabones	200-260
	Plásticos sintéticos	150-200
	Proceso de calentamiento	120-180
	Precaentamiento de agua	60-90
Ladrillos y Bloques	Curado	60-140
Plásticos	Preparación	120-140
	Destilación	140-150
	Separación	200-220
	Secado	180-200

En la IMAGEN 2 se muestran las variaciones puntuales que se presentan al evaluar el contenido energético disponible y es este el reto a resolver si se quiere integrar la energía solar a los procesos productivos y de confort.



**IMAGEN 2. Irradiancia total solar sobre una superficie horizontal en un día despejado y en un día nublado [8].**

En el contexto energético actual, los avances tecnológicos en el almacenamiento de energía son una herramienta clave para la transición hacia un modelo energético bajo en carbono ya que permiten el avance de las energías renovables.

Por esta razón el objetivo del proyecto es validar experimentalmente un modelo matemático que prediga el comportamiento térmico de un tanque de mezclado y almacenamiento, que mezcla un fluente de baja temperatura con uno de alta temperatura proveniente de los colectores solares.

### Modelo matemático para el almacenamiento

Para el desarrollo del modelo se realizó un balance de energía en el tanque de mezclado que se muestra a continuación:

$$m_1 c p_1 T_1 + m_2 c p_2 T_2 - m_3 c p_3 T_3 = m_{acum} c p_{acum} T_{acum} \quad (1)$$

En donde, el  $C_p$  es la capacidad calorífica del fluido (en J/kg K), se utiliza agua como fluido de trabajo, se considera que las propiedades físicas prácticamente se mantienen constantes en un rango de operación de 0 °C a 100 °C. Además, se considera que la temperatura  $T_{acum} = T_3$  y que el mezclado dentro del tanque es casi perfecto con lo

cual la temperatura dentro y en la salida del tanque es la misma.

El modelo para predecir la temperatura de salida es el siguiente:

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{[T_1 \frac{dm_1}{dt} + m_1 \frac{dT_1}{dt} + T_2 \frac{dm_2}{dt} + m_2 \frac{dT_2}{dt}] - T_2 [\frac{dm_1}{dt} + \frac{dm_2}{dt}]}{[m_1 + m_2]} \quad (2)$$

Esta es la función con la que se trabajó, la cual es el modelo matemático que es resuelto con uso del programa Matlab, que resuelve dicha ecuación diferencial, partiendo de condiciones iniciales predefinidas y otorgando así la temperatura de salida del tanque de mezclado y almacenamiento. Se debe mencionar que el modelo desarrollado es un trabajo en progreso no publicado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema utilizado está conformado por un calentador solar, el cual suministra la corriente de agua caliente; una corriente de agua fría proveniente de la red municipal o de algún enfriador; un boiler como fuente alternativa de calentamiento si la temperatura alcanzada por el colector no es suficiente; una bomba para hacer circular el agua por la tubería y el tanque de mezclado. Un sistema de adquisición de datos para tomar lecturas de las temperaturas y flujos.

El agua fría y el agua caliente se alimentan de manera continua. La mezcla que llega al tanque es recirculada a la línea de agua caliente que ubica al colector y al calentador eléctrico para que se vuelva a mezclar con la corriente fría. Se realizaron mediciones y monitoreo de las distintas variables hasta observar que la temperatura de salida en el tanque se mantuvo constante y por tanto se alcanzó el equilibrio térmico. El sistema utilizado es mostrado en la IMAGEN 3.

Los tipos de sensores e instrumentos utilizados para las mediciones se muestran a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. Equipos e instrumentos utilizados durante el proceso.

Cantidad	Tipo
1	Termómetro de mercurio (-10 a 260 °C)
1	Calentador tipo almacenamiento. Marca: Cal-O-Rex. Modelo: E-10/120/2000
1	Bomba centrífuga tipo: 1RA3 254-2YK34
1	Sensor de temperatura Dwyer TTE-104-W-LCD
4	Sensor de temperatura tipo: RTD Pt100

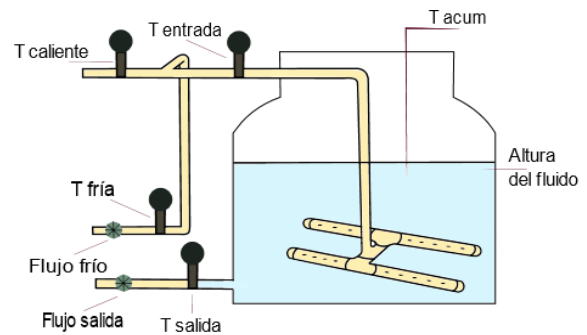


IMAGEN 3: Sistema utilizado para la experimentación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran en la IMAGEN 4 las variaciones del flujo de las corrientes fría y caliente y en la IMAGEN 5 las variaciones de la temperatura de las corrientes obtenidas mediante la experimentación. En las imágenes se quiere mostrar el comportamiento térmico que siguen las corrientes por lo cual sólo muestran un intervalo comprendido de 20 minutos correspondiente al intervalo de 100 a 700 lecturas.

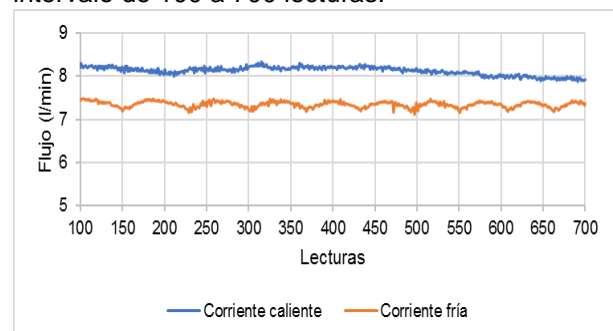
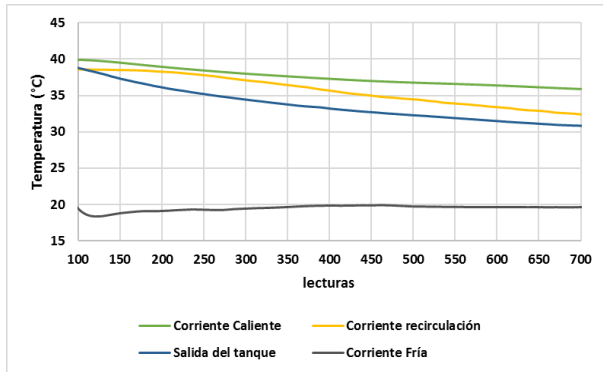


IMAGEN 4: Comportamiento de los flujos de la corriente caliente y fría.

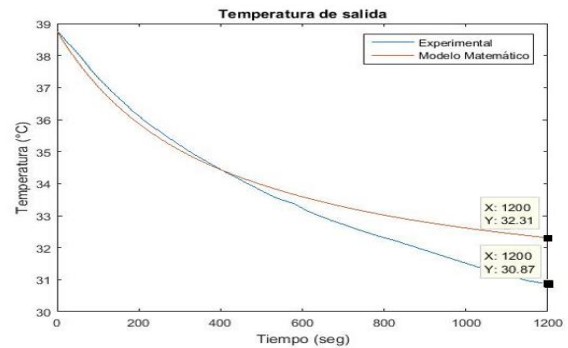


**IMAGEN 5: Comportamiento de las temperaturas de forma experimental.**

En la experimentación se estuvo trabajando con un flujo promedio en la corriente fría de 7.35 L/min y en la corriente caliente de 8.12 L/min, con dichos flujos la variación de la temperatura de las diferentes corrientes se muestra en la IMAGEN 5; en la imagen se observa que las diferentes temperaturas tienden al equilibrio térmico. En el intervalo de 20 minutos analizado, la temperatura de salida del tanque de almacenamiento pasó de una temperatura de 38.76 °C a 30.87 °C, lo cual representa una tasa de variación de 0.39 °C / min. Se considera que las pérdidas al ambiente no son significativas en base a los resultados alcanzados, sin embargo, dichas pérdidas pueden ser evaluadas.

Para comprobar que efectivamente el modelo matemático es capaz de predecir la temperatura de salida del tanque, se introdujeron las condiciones iniciales: 19.45 °C para la corriente fría, 39.94 °C para la corriente caliente, corriente de salida del tanque de almacenamiento 38.76 °C, el flujo corriente fría es de 0.13 Kg/s y el flujo corriente caliente es de 0.12 Kg/s.

En la IMAGEN 6 se muestra un comparativo entre la temperatura de salida experimental y la temperatura de salida teórica en un periodo de 20 minutos.



**IMAGEN 6: Comportamiento de la temperatura de salida de acuerdo con el modelo matemático.**

Para ese intervalo de tiempo la temperatura de salida del tanque es de 32.31 °C de acuerdo con el modelo, por lo que se encuentra 1.44 °C por arriba del dato experimental y con un error del 4.66 %. Este porcentaje de desviación de los datos experimentales puede deberse a que en el modelo se considera que el flujo de entrada de ambas corrientes siempre permanece constante, considerándolo como ideal, y se sabe que en la realidad esto no ocurre y en todo momento los flujos están variando, aunque estas variaciones son pequeñas, si pueden influir en la predicción de la temperatura.

## CONCLUSIONES

Con la validación del modelo matemático, se puede concluir que efectivamente este modelo es capaz de predecir el comportamiento experimental de la temperatura de salida de un tanque de mezclado, donde se introducen dos corrientes (agua fría y caliente) obteniendo resultados teóricos con un error del 4.66 % de diferencia, por lo que los resultados son realmente aceptables y con ello se cuenta con una nueva herramienta que es capaz de determinar la temperatura de salida de la mezcla de una corriente caliente y una fría sin la necesidad de recurrir a la experimentación y con ello el gasto de recursos.

A partir de los resultados alcanzados es posible ampliar las aplicaciones de la energía termosolar en el sector doméstico e industrial.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Guanajuato que a través la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado me permitió ser parte de tan gratificante experiencia, a MIQ. Amanda Lucero Fuentes Silva por la orientación y apoyo brindado durante la realización de este proyecto y por permitirme junto con el Dr. Guillermo Martínez Rodríguez ser parte de su equipo de trabajo. Así como a mi familia por el apoyo y motivación incondicional.

## REFERENCIAS

- [1] Gallego, A. J., Ruiz-Pardo, A., Cerezuola-Parish, A., Sánchez, J., Martín-Macareno, C., Cabeza, L. F., Camacho, E. F. & Oró, E. (2013). Mathematical modeling of a PCM storage tank in a solar cooling plant. *Solar Energy*, 93, 1-10.
- [2] Quijera, J. A. & Labidi, J. (2013). Pinch and exergy based thermosolar integration in a dairy process. *Applied Thermal Engineering*, 50, 464-474.
- [3] Mekhilef S., Saidur R. & Safari A. (2011). A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1777-1790.
- [4] Kalogirou S. (2003). The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy* 76, 337-361.
- [5] Goyal R.K. & Tiwari G.N. (1999). Performance of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: a new concept. *Energy Conversion Management* 40, 385-392.
- [6] Schnitzer H. & Christoph B., Gwehenberger G. (2007). Minimizing greenhouse gas emissions through the application of solar thermal energy in industrial processes. Approaching zero emissions, *Journal of Cleaner Production*, 15, 1271-1286.
- [7] Kalogirou-Soteris A. (2004). Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 231-295.
- [8] Martínez-Rodríguez, G., Fuentes-Silva, A. L. & Picón-Núñez, P. (2016). Potencial Energético Solar del estado de Guanajuato, AMIDIQ.