

## Análisis de un sistema solar de tubos evacuados para calentamientos de agua con clima de Querétaro

### Analysis of a solar system of evacuated pipes for water heating with Querétaro climate

SERNA-AGUIRRE, Jonathan<sup>1†</sup>, RAMIREZ-LOPEZ, Raúl<sup>1</sup>, RANGEL-MIRANDA, Domingo<sup>1</sup>, SERRANO-ARELLANO, Juan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Querétaro, ITQ-TecNM. Av. Tecnológico s/n esq. Gral. Mariano Escobedo. Colonia Centro Histórico, Querétaro, Qro. C.P. 76000. México.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico Superior de Huichapan-ITESHU-TecNM. División de Arquitectura. Dom. Conocido S/N, El Saucillo, Huichapan, Hgo, México. C.P. 42411.

ID 1<sup>er</sup> Autor: Jonathan, Serna-Aguirre

ID 1<sup>er</sup> Autor: Raúl, Ramirez-Lopez

ID 1<sup>er</sup> Autor: Domingo, Rangel-Miranda

ID 1<sup>er</sup> Autor: Juan, Serrano-Arellano

Recibido 23 de Julio, 2018; Aceptado 12 de Septiembre, 2018

#### Resumen

En este trabajo se llevó a cabo un estudio para estimar la energía auxiliar necesaria para suplir una de las necesidades básicas de agua sanitaria caliente en el municipio Querétaro. En este estudio se tomó en cuenta una necesidad de agua caliente a 60 °C. Para calcular la energía necesaria se hizo uso de una rutina en un software llamado TRNSYS (Transient System Simulation Tool). Esta investigación está orientada a una de la necesidad más básica en una vivienda, la cual es poder tener acceso a agua caliente sanitaria debido a que los climas en varios meses del año tienden a ser fríos a muy fríos. Para este sistema se consideró el uso de un colector solar de tubos evacuados (CSTE). Las variables tomadas en cuenta en el modelo fueron: la temperatura ambiente, velocidad del viento, radiación solar directa y radiación difusa. Con los datos obtenidos de la simulación se puede observar que los meses de diciembre y enero son los que necesitan mayor energía para auxiliar el sistema de CSTE.

**Energía solar, Tubos Evacuados, Calentador, TRNSYS**

#### Abstract

In this work a study was carried out to estimate the auxiliary energy needed to supply one of the basic needs of hot sanitary water in the municipality of Santiago de Querétaro. In this study, a need for hot water at 60 °C is taken into account. To calculate the necessary energy, a routine will be used in a computer software called TRNSYS (Transient System Simulation Tool). This research is oriented to one of the most basic needs of Santiago de Querétaro, which is to be able to access sanitary hot water because the climates in summer and winter tend to be cold to very cold respectively. For this system the use of a solar collector of evacuated tubes (CSTE) was considered. The variables taken into account in the model were: ambient temperature, wind speed, direct solar radiation and diffuse radiation. With the data obtained from the simulation we can see that the months of December and January are those that need more energy to help the CSTE system.

**Solar energy, Evacuated tubes, heater, TRNSYS**

**Citación:** SERNA-AGUIRRE, Jonathan, RAMIREZ-LOPEZ, Raúl, RANGEL-MIRANDA, Domingo, SERRANO-ARELLANO, Juan. Análisis de un sistema solar de tubos evacuados para calentamientos de agua con clima de Querétaro. Revista de Arquitectura y Diseño. 2018, 2-5: 11-17

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jserrano@iteshu.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La población mundial se ha triplicado en un corto periodo de tiempo, según ONU se espera un incremento a 9.2 billones para 2050. Por lo cual, la demanda de energía está creciendo rápidamente. Hoy en día, la demanda de energía mundial es de alrededor de 15TW. (Mehrddad & Hussein M.K., 2016)

Las proyecciones de consumo de energía mundial indican que esta crecerá en un 32% entre 2015 y 2035. (Mehrddad & Hussein M.K., 2016)

El uso de energía térmica solar para el calentamiento de agua es una opción asequible y sostenible, que permite contribuir positivamente a la disminución de la dependencia de combustibles fósiles y con ello disminuir la emisión de gases ( $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $CO_x$ ) dañinos para el medio ambiente.

En México en el sector residencial, el calentamiento de agua a bajas temperaturas se usa para la higiene personal, para el lavado de ropa, utensilios relacionados con la preparación y consumo de alimentos, además de que, en los sectores de altos ingresos, se utiliza para calentar el agua de albercas. En el sector de los servicios, las aplicaciones son similares (higiene, lavado de ropa y utensilios), pero los volúmenes son significativamente mayores. (Juantorea Ugás, Godínez Mena, Hernández Galvez, & Rivera Martínez, 2017)

La localización geográfica de México es ideal para la explotación de recursos solares. El promedio diario de irradiación se encuentra en  $5.5 \text{ kWh/m}^2$ , Lo que significa que en un metro cuadrado y con un equipo solar de eficiencia del 50%, se reciba diariamente el equivalente a la energía contenida en un metro cubico de gas natural, o bien, la de 1.3 litros de gas L.P. (International Renewable Energy Agency , 2015)

La energía solar utilizada a través de calentadores solares de agua de tubos evacuados (CSTE), para la obtención de agua caliente, es una tecnología que contribuye significativamente a disminuir la utilización de combustibles fósiles y con ello una de las principales estrategias de mitigación del cambio climático a nivel mundial. (REN 21 STEERING COMMITTEE, 2015)

(I., G.L., & M., 2003) Desarrolló un modelo de simulación para modelar el rendimiento de un calentador solar de agua de tubo de agua. Aquí se describe el procedimiento de modelado de cada componente del calentador de agua solar, para la eficiencia del colector, el coeficiente de pérdida de calor del tanque y el caudal de circulación natural a través de los tubos. Se muestra que, como precalentador de un sistema de tanques convencional de 135 l, este calentador de agua solar proporciona un 45% de ahorro anual en Sydney.

Un CSTE es altamente recomendado para aplicaciones de temperaturas más altas, ya que pueden ganar temperaturas más altas fácilmente y pueden conservar el calor incluso cuando el clima exterior es frío. Para los países con buen sol, un CSTE muestra una eficiencia sobresaliente y los países con clima frío, los CSTE son muy rentables con una eficiencia excelente debido a sus características de protección contra la congelación. (M.A., R., Saad, & Omid, 2015).

La pérdida de calor de un colector solar de tubo de vidrio evacuado es mucho menor que la de un colector solar de placa plana. La investigación sobre los colectores solares de tubos de vidrio al vacío se ha centrado en la mejora del rendimiento del colector solar. El rendimiento de un colector solar depende del rendimiento de cada componente individual y de la disposición óptima de estos componentes. (Yong & Taebeom, 2006).

Los colectores solares de tubos evacuados (CSTE) muestran una mayor eficiencia incluso cuando la radiación solar y la tasa de temperatura ambiente son bajas. Los tubos son evacuados del aire y tienen pequeñas pérdidas de calor. (Brunold, Frey, & Ulrich, 1994)

Los calentadores solares de agua que utilizan colectores de placa plana son más comunes en las regiones de clima cálido, mientras que los colectores de tubos evacuados se han adoptado donde funcionan mejor que los colectores de placa plana debido a la menor pérdida de calor en las operaciones de mayor temperatura en climas fríos (Budihardjo, 2005)

El rendimiento del colector de tubos de vidrio al vacío depende de las condiciones de funcionamiento, tales como las temperaturas de entrada y salida y el caudal del fluido de trabajo. Además, debe considerarse la interferencia de la radiación solar debido a los tubos adyacentes. Aunque el tubo absorbente individual puede absorber efectivamente la irradiación solar, puede bloquear la transferencia de la irradiación solar al siguiente tubo absorbente y, por lo tanto, el rendimiento del sistema colector que utiliza estos tubos absorbentes puede degradarse en un cierto rango del ángulo de incidencia. (Shah & Furbo, 2003)

Se han llevado a cabo estudios de validación de modelos para determinar el grado en que el programa TRNSYS sirve como un programa de simulación válido para un sistema físico. Se ha demostrado mediante el análisis de los resultados de estos estudios de validación que el programa TRNSYS proporciona resultados con un error medio entre los resultados de la simulación y los resultados medidos en sistemas operativos reales por debajo del 10%. (Kalogirou, 2004)

Los paralelos entre los experimentos numéricos (simulaciones) y los experimentos físicos son fuertes. En principio, es posible calcular lo que es posible medir. En la práctica, puede ser más fácil de calcular que medir algunas variables (por ejemplo, temperaturas en partes de un sistema que son inaccesibles para la colocación de sensores de temperatura). Las simulaciones se pueden organizar para someter los sistemas a condiciones meteorológicas extremas, cargas u otras fuerzas externas.

Un año es la base de tiempo de la mayoría de los estudios económicos, pero la información puede ser necesaria para otros períodos, desde días hasta períodos de muchos años. (A. Duffie & A. Beckman, 2013)

Se puede establecer una eficiencia instantánea de un colector en condiciones de estado estacionario midiendo la tasa de flujo másico del fluido de transferencia de calor, su aumento de temperatura en el colector ( $T_{f,out} - T_{f,in}$ ) y la intensidad de radiación solar incidente ( $I_c$ ). (Goswami, 2015)

El comportamiento físico de los componentes podría expresarse en ecuaciones algebraicas y diferenciales. La simulación de SWH incluye parámetros transitorios y dinámicos. La simulación de SWH depende de factores como la ubicación geográfica, el clima, las condiciones de operación; Consistencia y coherencia de los datos, errores humanos, etc., y muchos de ellos están fuera de control.

La calidad de los resultados depende del grado de precisión y los detalles considerados durante el modelado. (Shrivastava, Kumar, & Untawale, 2016)

La pérdida de calor de un colector solar de tubo de vidrio evacuado es mucho menor que la de un colector solar de placa plana. La investigación sobre los colectores solares de tubos de vidrio al vacío se ha centrado en la mejora del rendimiento del colector solar. El rendimiento de un colector solar depende del rendimiento de cada componente individual y de la disposición óptima de estos componentes. (Yong & Taebeom, 2006).

El presente estudio tiene como objetivo determinar la energía auxiliar necesaria en Santiago de Querétaro, Querétaro, México, utilizando un colector de tubos evacuados para la producción de agua caliente, evaluando la energía ganada por el sistema, temperatura de salida del colector y la energía extra requerida por el sistema para suplir las necesidades de agua caliente a 60°C en una vivienda.

## Metodología

Se desarrolló un modelo de sistema de calefacción de agua solar en TRNSYS, el cual se contempló el uso de un colector solar de tubos evacuados por su mayor eficiencia y dado que de acuerdo a las referencias revisadas, es el que mayor adaptación a este tipo de climas. Los parámetros que se consideraron en este sistema se muestran en la tabla 1.

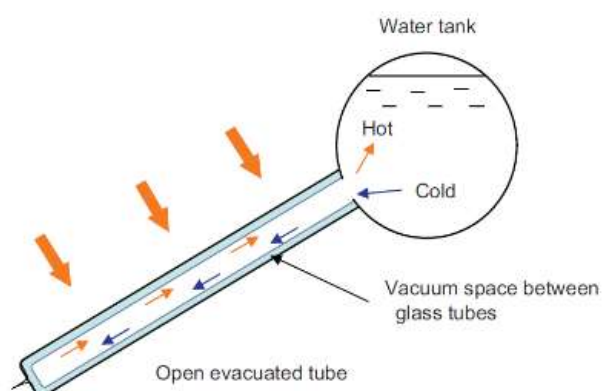
Colector	Datos técnicos
Numero de tubos	10
Orientación	Norte-Sur.
Angulo de inclinación	30°
Longitud del tubo	1760 mm.
Diámetro interior y exterior evacuado.	43 mm.
Diámetro exterior del tubo evacuado	58 mm.
Área del colector	2.3775 m <sup>2</sup>

**Tabla 1** Datos técnicos

El colector solar de tubos evacuados consiste en un conjunto de tubos de vidrio, conectados a un tanque de almacenamiento, cada tubo está rodeado por un segundo tubo de vidrio de mayor diámetro y el espacio anular entre los tubos se evacúa para minimizar las pérdidas de calor.

El agua es el fluido de trabajo y los flujos desde el tanque de almacenamiento a los tubos, el calor es captado y devuelto al tanque de almacenamiento por mecanismo de circulación natural (Juantorea Ugás, Godínez Mena, Hernández Galvez, & Rivera Martínez, 2017).

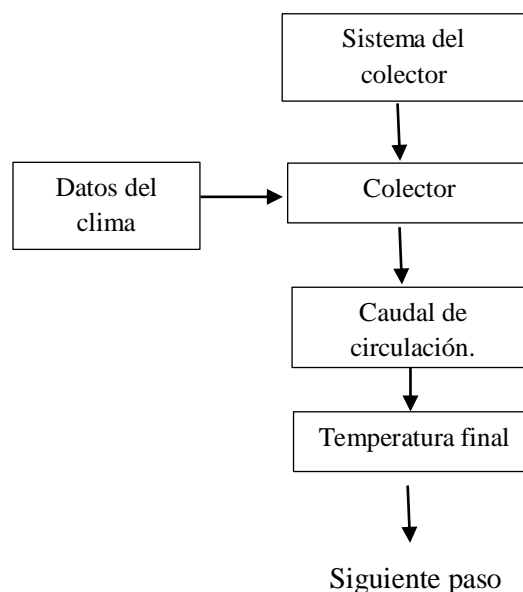
En la Figura 1 se muestra un diagrama general del colector de tubos evacuados, conectados directamente al tanque de agua y esta configuración es la más que más se puede encontrar en la actualidad.



**Figura 1** Esquema general de calentador de tubos evacuados

Fuente: (Tin-Tai, Zhaoting, Lok-Shun, Kwong-Fai, & Yu, 2011)

TRNSYS es una herramienta confeccionada para simular diseños transitorios de sistemas de energía térmica, originalmente desarrollado para el estudio de sistemas con energía solar, en la actualidad es una potente herramienta que permite la resolución transitoria de cualquier tipo de sistema. (Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2014)



**Figura 2** Diagrama de flujo computacional del colector

La simulación del sistema de calefacción de tubos evacuados se realizó para la comunidad de Santiago de Querétaro, Querétaro, México, ubicada geográficamente en la zona sur del bajío con una Latitud: 20°35'17" N, Longitud: 100°23'17" O y Altitud sobre el nivel del mar: 1826 m.

Se evaluó el comportamiento teórico del colector y se seleccionó una temperatura set point de 60 °C a suministrar, así como se generó una base de datos de las condiciones climáticas de Querétaro, dicha base de datos conto con un histórico por hora de diferentes variables, dicha base de datos fue creada con la ayuda de un software específico llamado Meteonorm.

El bombeo se programó para para las 8 a.m. y 6 p.m. para el uso de agua caliente a 60 °C, y la temperatura inicial del agua sea de 18.7°C, ya que, es la temperatura media ambiente por año en Querétaro y se supuso esa misma temperatura como la temperatura inicial en la tubería.

La energía útil que es la energía que es el porcentaje de energía que se puede aprovechar de una fuente de calor, este caso el sol y ser captada por el colector y transferida al fluido de trabajo (en este caso agua) viene dada mediante la ecuación 1.

$$Q_{coll} = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

Donde  $\dot{m}$  es el flujo másico y  $C_p$  es el calor específico del agua. Para calcular la eficiencia del colector se puede determinar mediante la ecuación 2.

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})}{AI_T} \quad (2)$$

Siendo  $A$  el área del colector y  $I_T$  la radiación global incidente sobre el colector solar (superficie inclinada).

El calor auxiliar se puede determinar mediante la ecuación 3.

$$Q_{Aux} = \frac{\dot{m}C_p(T_{set} - T_i) + UA(\bar{T} - T_{amb})}{\eta_{htr}} \quad (3)$$

Donde  $T_{set}$  es la temperatura deseada,  $UA$  es coeficiente global de pérdida entre el calentador y sus alrededores durante la operación,  $\eta_{htr}$  eficiencia del calentador auxiliar y  $\bar{T}$  viene dado por la ecuación 4.

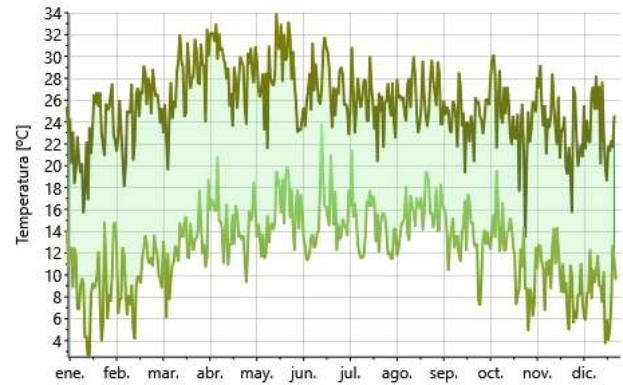
$$\bar{T} = \frac{(T_{set} + T_{in})}{2} \quad (4)$$

## Resultados y discusiones

La evaluación se realizó para un año completo en el cual se evaluó el modelo propuesto, en dicho modelo se consideraron las variables promedio en todo un año en Querétaro, dichas variables tienen relación directa con la eficiencia con la cual el colector trabajara.

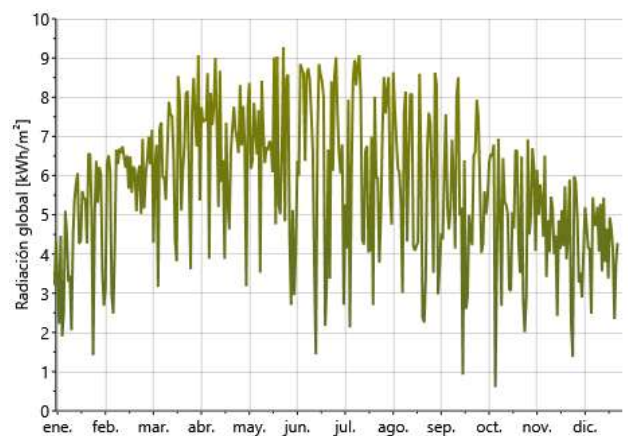
Dichas variables fueron obtenidas mediante el software y base de datos de meteonorm, las zonas de interpolación para brindarnos mayor exactitud en sus cálculos fueron, para la radiación fueron presa de allende (54 km), Huimilpan (25 km), Atlacomulco (104 km) y Angamacutiro (148 km). Para la parte de la temperatura los sitios interpolados fueron Morelia (106 km), León (122 km) y Guanajuato (101 km).

En la gráfica 1 se puede observar los datos de temperatura ambiente máxima la cual ronda los 34°C y se presentan en los meses de mayo y mínima la cual ronda los 0°C y se presenta en el mes de enero, en un año en el municipio de Querétaro anual.



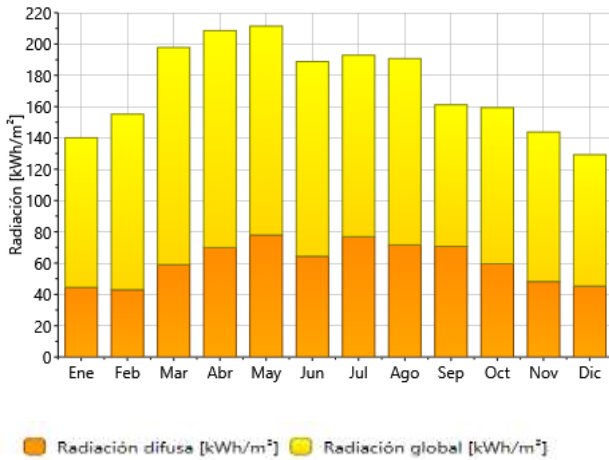
**Gráfica 1** Temperatura ambiente máxima y mínima mensual

Los datos de radiación solar obtenidos de nuestra base de datos se puede observar la distribución de la radiación solar, siendo los meses de diciembre y enero los de menor potencia radiada como se puede observar en la gráfica 2, aun así, con buenos valores promedio, los cuales oscilan entre los 2.3 a 5.25 kWh/m<sup>2</sup> y 1.5 a 6.5 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente para cada mes. Los valores atípicos de radiación muy baja se presentan en los meses de septiembre y octubre 0.5 a 1 kWh/m<sup>2</sup> debido a que en estos meses se presentan los días con más lluvia en la región y por ende los índices de nubosidad son mayores a los del resto del año. Por otro lado, los valores más altos se presentan los meses de mayo y junio con valores que oscilan 2.8 a 9.2 kWh/m<sup>2</sup> y 1.5 a 9 kWh/m<sup>2</sup>.



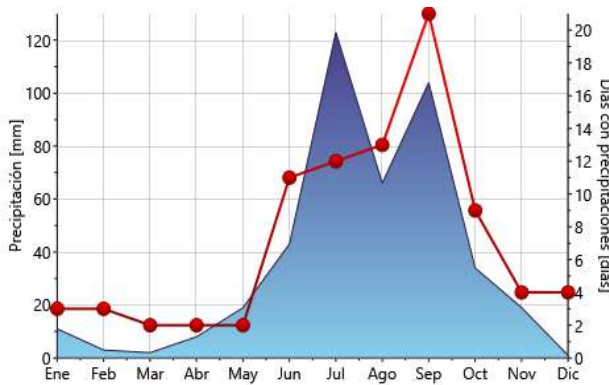
**Gráfica 2** Radiación global

Otro dato importante es el porcentaje de radiación difusa que puede obtener nuestro colector, ya que, este tipo de tecnología aprovecha también el porcentaje de radiación difusa que incide sobre él, en la gráfica 3 podemos ver un promedio por mes del total de radiación difusa en comparación con el porcentaje de radiación global que incidirá sobre el colector.



Gráfica 3 Cantidad de radiación difusa vs. radiación global

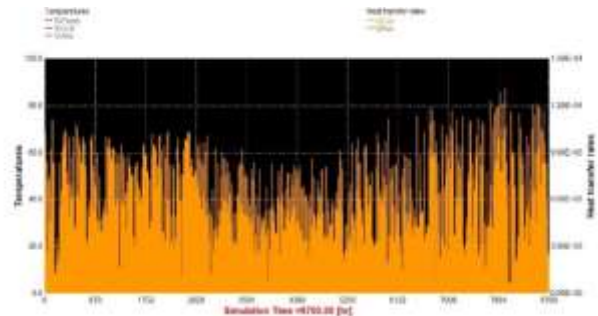
Para los días de precipitación se puede observar en la gráfica 4 que la máxima cantidad que tenemos son alrededor de 122 mm, siendo los meses de junio y septiembre los de mayor cantidad de lluvias y el mes de septiembre el que presenta mayor cantidad de días con precipitaciones, esto es muy importante a considerar ya que en estos meses se presentan los valores atípicos en que la radiación llega a valores muy bajos de aproximadamente 0.5 kwh/m<sup>2</sup> como se puede observar en la gráfica 2.



Gráfica 4 Precipitación

Se llevó a cabo la simulación en TRNSYS, los resultados los resultados mostraron que los meses donde se requiere mayor uso de energía auxiliar son en los meses de diciembre y enero como se puede observar en la gráfica, esto se podía prever debido a que como se puede observar en la gráfica 3, son los meses en los cuales la menor cantidad de radiación global y difusa se hacen presentes en el sitio, así como, las temperaturas más bajas en la zona.

La menor cantidad de energía colectada fue de alrededor de 0.9 kj/hr en el mes de diciembre y de 1.5 kj/hr en el mes de enero, lo cuales fueron los meses más críticos de colección de energía para el sistema.



Gráfica 5 Energía transferida

Conclusiones

Se realizó la evaluación numérica del sistema de calentador solar propuesto y en los datos obtenidos se puede ver que los meses de diciembre y enero son los más críticos para el calentador auxiliar, ya que, durante estos meses se presentan los picos de mayor requisición de energía para proveer el agua a la temperatura setpoint, esto debido a que son los meses con menor radiación global y difusa y también se presentan las temperaturas más frías durante este periodo. Es aquí donde se podría presentar el mayor gasto de energía auxiliara a través del uso de sistemas eléctricos o de gas natural.

Nomenclatura

Simbolo	Descripción
CSTE	Colector Solar de Tubos Evacuados.
$T_{set}$	Temperatura setpoint.(°C).
$T_{in}$	Temperatura inicial del fluido en elcolector (°C).
$T_{amb}$	Temperatura ambiente (°C).
$T_{out}$	Temperatura final del fluido en el colector (°C).
$\dot{m}$	Flujo masico (kg/s).
$C_p$	Calor especifico del fluido de trabajo (KJ/kg.K).
$I_T$	Radiación global incidente sobre el colector (KJ/h.m <sup>2</sup> ).
$\eta$	Eficiencia (Adimensional).
$\eta_{hr}$	Eficiencia del calentador auxiliar (Adimensional).
UA	coeficiente global de pérdida entre el calentador y sus alrededores durante la operación

## Referencias

- A. Duffie, J., & A. Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wisconsin: Wiley.
- Brunold, S., Frey, R., & Ulrich, F. (1994). Comparison of three different collectors for process heat applications. *Solarenergie Profund Forschungsstelle Ingenieurschule ITR.*, 107-118.
- Budihardjo, I. (2005). *EVACUATED TUBULAR SOLAR WATER HEATERS*. New South Wales : Ph.D. Dissertation.
- Goswami, D. Y. (2015). *Principles of solar engineering*. Boca Raton, FL.: CRC Press.
- I., B., G.L., M., & M., B. (2003). Development of TRNSYS Models for Predicting the Performance of Water-in-Glass Evacuated Tube Solar Water Heaters in Australia. *ANZSES Annual Conference* (págs. 1-10). Melbourne: Renewables.
- International Renewable Energy Agency . (2015). *Renewable Energy Prospects: Mexico*. IRENA .
- Juantorea Ugás, A., Godínez Mena, A., Hernández Galvez, G., & Rivera Martínez, M. (2017). Evaluación experimental de un calentador solar de agua de tubos evacuados. 3(8).
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 231-295.
- M.A., S., R., S., Saad, M., & Omid, M. (2015). Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy*, 1038-1054.
- Mehrdad, E., & Hussein M.K., A.-M. (2016). Engineering and socio-economic aspects of sustainable energy. *IEEE*, 1.
- Shah, L., & Furbo, S. (2003). Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions. *Applied Energy*, 371-395.
- Shrivastava, R., Kumar, V., & Untawale, S. (2016). Modeling and simulation of solar water heater: ATRNSYS perspective. *Renewable and Sustainable Energy*, 126-143.
- Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. (2014). *TRNSYS 17*. Wisconsin: TRNSYS.
- Tin-Tai, C., Zhaoting, D., Lok-Shun, C., Kwong-Fai, F., & Yu , B. (2011). Performance evaluation of evacuated tube solar domestic hot water systems in Performance evaluation of evacuated tube solar domestic hot water systems in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 3467–3474.
- Yong, K., & Taebeom, S. (2006). Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube. *Renewable Energy*, 772-795.