

## Estudio teórico-experimental de la transferencia de calor en el tubo receptor de un colector solar de canal parabólico

### Theoretical-experimental study of the heat transfer in the receiver tube of a Parabolic-trough solar collector

VALENCIA-VEGA, Gustavo A. <sup>1</sup> †, MONTIEL-GONZÁLEZ, Moisés<sup>1</sup>, ROMERO-DOMÍNGUEZ, Rosenberg J. <sup>1</sup> y ALVARADO-JUÁREZ, Roberto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Morelos/ Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Avenida Universidad 1001, C.P. 62209, Colonia Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México.

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Av. Universidad No. 350. Carretera Federal Cuitláhuac - La Tinaja Localidad Dos Caminos, Cuitláhuac, Ver. CP. 94910

ID 1<sup>er</sup> Autor: Gustavo A., Valencia-Vega / ORC ID; 0000-0002-7786-374X; Researcher ID Thomson: G-2874-2019

ID 1<sup>er</sup> Coautor: Moisés, Montiel-González / ORC ID; 0000-0001-6726-9344; Researcher ID Thomson: T-7690-2018, CVU CONACYT ID: 230353

ID 2<sup>do</sup> Coautor: Rosenberg J, Romero-Domínguez / ORC ID; 0000-0003-2625-7464; Researcher ID Thomson: J-1220-2012, CVU CONACYT ID: 25457

ID 3<sup>er</sup> Coautor: Roberto, Alvarado-Juárez / ORC ID; 0000-0002-4153-3626; Researcher ID Thomson: E-5222-2013 CVU CONACYT ID: 438170

DOI: 10.35429/JID.2019.9.3.16.22

Recibido 13 Octubre, 2019; Aceptado 05 de Diciembre, 2019

#### Resumen

La captación de energía solar mediante colectores de canal parabólico es una aplicación tecnológica para el aprovechamiento de energías limpias, esto permite reducir el uso de combustibles fósiles y disminuir la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Por ello, en este artículo se presenta un estudio teórico-experimental de la transferencia de calor en el tubo receptor de un colector de canal parabólico a través del cual fluye el fluido de trabajo. El tubo receptor es de cobre con diámetro nominal de 1" y está cubierto por un tubo de cristal borosilicato con diámetro exterior de 2 1/2" x 2.5 m de largo, para disminuir las pérdidas convectivas. El estudio teórico se realiza en coordenadas cartesianas bidimensionales (2D) y condición de frontera axi-simétrica para modelar y simular la dinámica de fluidos y analizar el comportamiento de la transferencia de calor convectiva entre el aire del espacio anular y el fluido de trabajo. Las temperaturas del fluido simuladas fueron de 80 a 180 °C, este intervalo incluye diversas aplicaciones industriales donde se requiere calor de proceso. Los valores de radiación directa simulados fueron de 600 a 1100 W/m<sup>2</sup>. La diferencia entre los resultados teóricos con experimentales fue menor a 8 %.

**Colectores de canal parabólico, Transferencia de calor convectiva, Dinámica de fluidos**

#### Abstract

The capture of solar energy through parabolic trough collectors is a technological application for the use of clean energy, this allows reducing the use of fossil fuels and reducing the generation of greenhouse gases (GHG). Therefore, this article presents a theoretical-experimental study of the heat transfer in the receiver tube of a parabolic channel collector through which the working fluid flows. The receiver tube is made of copper with a nominal diameter of 1" and is covered by a borosilicate glass tube with an outer diameter of 2 1/2" x 2.5 m long, to reduce convective losses. The theoretical study is carried out in two-dimensional (2D) Cartesian coordinates and axi-symmetric boundary condition to model and simulate fluid dynamics and analyze the behavior of convective heat transfer between the air of the annular space and the working fluid. The simulated fluid temperatures were from 80 to 180 °C, this range includes various industrial applications where process heat is required. The simulated direct radiation values were from 600 to 1100 W / m<sup>2</sup>. The difference between the theoretical and experimental results was less than 8%.

**Parabolic trough collectors, Convective heat transfer, Fluid dynamics**

**Citación:** VALENCIA-VEGA, Gustavo A., MONTIEL-GONZÁLEZ, Moisés, ROMERO-DOMÍNGUEZ, Rosenberg y ALVARADO-JUÁREZ, Roberto. Estudio teórico-experimental de la transferencia de calor en el tubo receptor de un colector solar de canal parabólico. Revista del Diseño Innovativo. 2019 3-9: 16-22

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La energía solar es uno de los recursos energéticos renovables más importantes con que contamos en México. Gracias al avance de la ciencia aplicada, innovación y desarrollo tecnológico, en la actualidad se cuenta con diferentes dispositivos para aprovechar el recurso solar. Ya que los altos niveles de irradiación que se reciben en el país y en el mundo hacen factible el uso de sistemas de concentración solar para diversas aplicaciones, entre ellas, el calor de proceso [ (A. Fernández-García, 2010), (Kalogirou, 2003)].

Los concentradores solares son dispositivos que aprovechan la energía proveniente del sol en un área de captación expuesta a la radiación directa y transfieren la energía concentrada a un fluido de trabajo para elevar su temperatura hasta el nivel requerido. Los concentradores de canal parabólico (CCP) son la tecnología más madura y más estudiada desde el siglo pasado. Algunos estudios se enfocan en analizar diferentes parámetros tales como: el diseño óptico, las condiciones óptimas de funcionamiento, la transferencia de calor en tubos y el uso de diferentes fluidos de trabajo en los CCP para una reducción global de gases contaminantes. Gran cantidad de autores han estudiado en forma teórica y/o experimental el comportamiento térmico de los CCP [ (A. Fernández-García, 2010), (Kalogirou, 2003), (Marnay López Martínez), (Martínez, 2018)].

Algunos autores se enfocan en mejorar la transferencia de calor entre el tubo absorbedor y el fluido de trabajo de un CCP. Estos estudios se centran en cambiar las estructuras mecánicas de los colectores solares, mejorar la capacidad de absorción de los recubrimientos o reducir las pérdidas de calor en el colector [ (Adel. Kh. Alfozan, 2015), (J.Subramania, 2017), (Ricardo Vasquez Padilla, 2011)]. Los colectores solares operan satisfactoriamente y eficientemente operan con fluidos de trabajo con puntos de ebullición elevados cuando la temperatura supera el punto de ebullición del agua, siempre y cuando se encuentre en estado líquido y no alcance la temperatura de cambio de fase [ (Kalogirou, 2003), (J.Subramania, 2017), (Ricardo Vasquez Padilla, 2011), (Forristall, 2003), (M. Eswaramoorthy, 2010) ].

El agua como fluido de trabajo tiene un fundamental uso en la industria.

En este sentido, Ashish y Sharmaa (2017) realizaron una revisión bibliográfica exhaustiva, con más de 200 referencias, donde reportan el uso de tecnologías de concentración solar para aplicaciones industriales de calor de proceso a nivel mundial. Debido a la necesidad de caracterizar fluidos de trabajo más eficientes, resulta interesante proponer modelos así como desarrollar metodologías para experimentar con nuevos fluidos de trabajo. [ (P.Selvakumar, 2014)]. La eficiencia de los ciclos de calentamiento de aire para uso doméstico e industrial, en la mayoría utiliza combustibles fósiles que son agentes contaminantes del medio ambiente, por lo que es necesario la implementación de nuevas tecnologías [ (Kalogirou, 2003), (Marnay López Martínez), (Forristall, 2003), (Ahmet Lokurlu, 2005), (C. Chang, 2014), (Mohammed Hasan Abbood, 2018), (C. Ramos, 2014), (N. Galanis, 2009)].

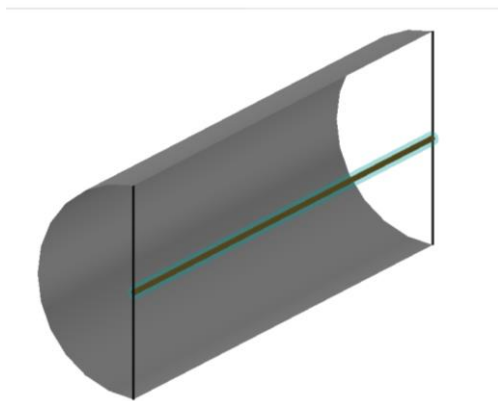
Con la ayuda del presente estudio, se verifica y valida el uso de un CCP en el cual se tienen todas las condiciones y consideraciones para realizar un estudio teórico, en dicho estudio se modelan y simulan ciertos parámetros y condiciones experimentales que permiten reducir el error entre ambos estudios (teórico-experimental) [ (Xiaoping Yang, 2012), (Z.D Cheng, 2010)]. En este trabajo se desarrolló un código computacional para realizar simulaciones que permite el uso de diferentes fluidos de trabajo, así como realizar un análisis paramétrico, considerando las propiedades termo físicas de cada fluido de trabajo. Sin embargo, la validación se realiza sólo con 2 experimentos que cumplieron con las condiciones apropiadas.

## Desarrollo

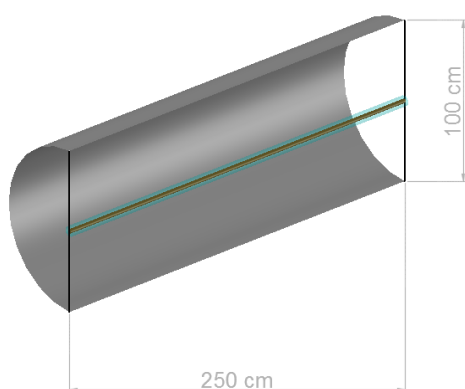
En la Tabla 1 se presentan los parámetros teóricos y dimensiones del CCP.

Dimensión concentrador	Magnitud	Unidad
Temperatura ambiente	25-35	°C
Temperatura de entrada	20 - 35	°C
Temperatura de salida	80 - 95	°C
Radiación directa	600 - 1100	W/m <sup>2</sup>
Longitud del tubo	4.88	m
Area del colector	5.18	m <sup>2</sup>
Diametro tubo de cobre	0.0254	m
Diametro tubo de vidrio	0.0635	m
Area tubo de cobre	0.000506707	m <sup>2</sup>
Area tubo de vidrio	0.003166922	m <sup>2</sup>
Apertura del ccp	1.063	m
Ángulo de borde	90	°
Distancia focal	0.266	m

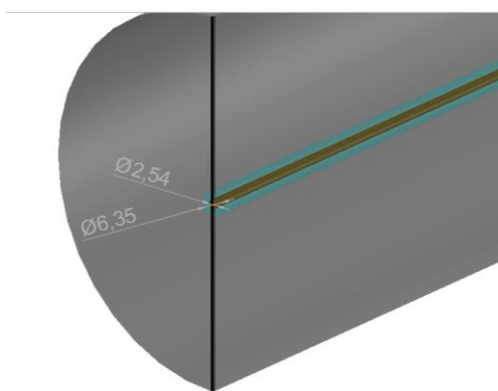
**Tabla 1** Parámetros y dimensiones del CCP



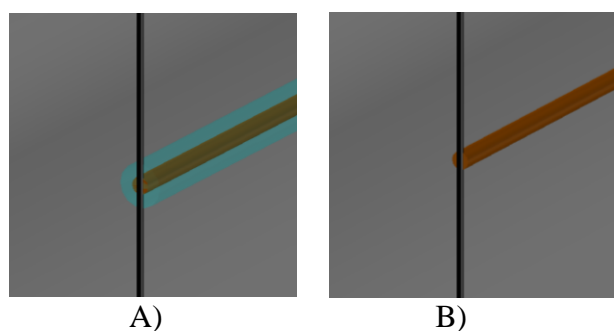
**Figura 1** Modelo físico del CCP. Programa CAD (AutoCAD) 2015- Estudiantil



**Figura 2** Modelo físico del CCP vista isométrica



**Figura 3** Modelo físico del concentrador vista isométrica tubo colector y recubrimiento



**Figura 4** Vista isométrica tubo colector a) con recubrimiento de vidrio, b) sin recubrimiento

Las propiedades de los fluidos de trabajo se tomaron a temperatura promedio y presión atmosférica.

Propiedades Agua	Magnitud	Unidad
Viscosidad (85 °C)	3.33E-04	kg/m s
Densidad (85 °C)	968.1	kg/m <sup>3</sup>
Cp (85 °C)	4201	J/kg K
Conductividad (85 °C)	0.673	W/m K
Pr (85 °C)	2.08	

**Tabla 2** Propiedades del agua “Transferencia de calor y masa”

Propiedades Aire	Magnitud	Unidad
Viscosidad (85 °C)	2.10E-05	kg/m s
Densidad (85 °C)	0.9994	kg/m <sup>3</sup>
Cp (85 °C)	1008	J/kg K
Conductividad (85 °C)	0.02953	W/m K
Pr (85 °C)	0.7154	

**Tabla 3** Propiedades del aire “Transferencia de calor y masa”

Propiedades Cobre	Magnitud	Unidad
Conductividad(300 k)	401	W/m K
Diametro interior tubo	0.026787	m
Diametro exterior tubo	0.028575	m

**Tabla 4** Propiedades del cobre comercial “Transferencia de calor y masa”

Propiedades Vidrio Pyrex	Magnitud	Unidad
Conductividad(300 k)	1.2	W/m K
Cp (300 K)	835	J/kg K
Diametro interior tubo	0.0605	m
Diametro exterior tubo	0.0635	m

**Tabla 5** Propiedades de vidrio pyrex “Transferencia de calor y masa”

### Modelo Teórico

El modelo teórico requirió las propiedades básicas necesarias para el cálculo numérico computacional del coeficiente de transferencia de calor global, el factor de remoción, el calor útil y la eficiencia del CCP. Estos se calcularon con base en las ecuaciones de J. A. Duffie y W. A. Beckman (2013).

Con estas ecuaciones se desarrolló un código computacional para modelar y simular la dinámica de fluidos y la transferencia de calor en el tubo receptor.

VALENCIA-VEGA, Gustavo A., MONTIEL-GONZÁLEZ, Moisés, ROMERO-DOMÍNGUEZ, Rosenberg y ALVARADO-JUÁREZ, Roberto. Estudio teórico-experimental de la transferencia de calor en el tubo receptor de un colector solar de canal parabólico. Revista del Diseño Innovativo. 2019

## Metodología Experimental

Debido a que los colectores de canal parabólico (CCP) son de foco lineal, el tubo receptor es un elemento fundamental, ya que el rendimiento térmico depende en gran medida de la conductividad térmica y propiedades ópticas de la superficie del tubo receptor.

El tubo receptor interior es de cobre pintado de color negro mate, la cual posee una alta absorptividad y baja emisividad en el espectro infrarrojo, lo que se traduce en un elevado rendimiento térmico.

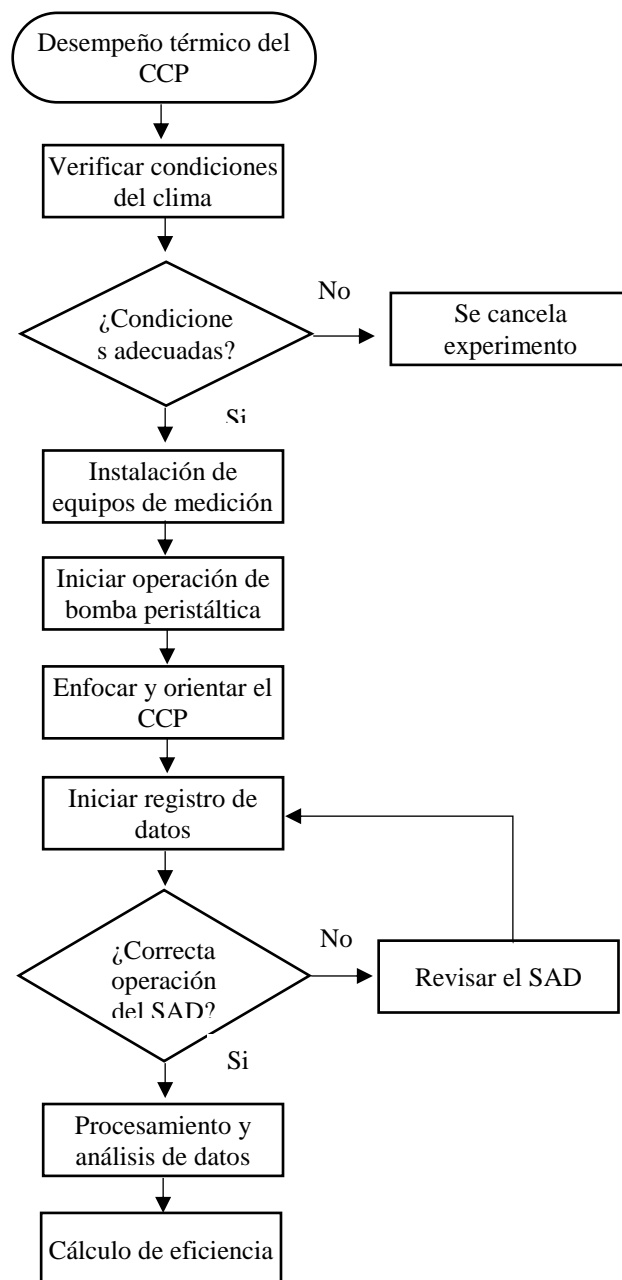
El tubo exterior es de vidrio borosilicato para reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo metálico, así como protegerlo.

Para mantener el tubo receptor en la línea focal de la parábola, se utilizaron 3 perfiles tubulares (PTR) de 1.1 m de longitud, uno en cada extremo y otro a la mitad del canal parabólico como se observa en la figura 4.

En la figura 5 se muestra un diagrama de flujo de la metodología que se siguió para realizar los experimentos y así determinar el desempeño térmico del CCP.



**Figura 4** Fotografía del tubo receptor del CCP



**Figura 5** Diagrama de flujo de la metodología experimental

Para llevar a cabo la evaluación del desempeño del CCP se utilizaron los criterios establecidos por el estándar ANSI-ASHRAE 93-2003:

- Irradiancia solar directa (mayor a  $790 \pm 32 \text{ W/m}^2$ )
- Velocidad del viento (2.2 – 4.5 m/s)
- Temperatura ambiente (15 – 30 °C)
- Temperatura del fluido a la entrada y salida del colector (variación  $\pm 1 \text{ °C}$ )
- Flujo másico ( $0.02 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2 \pm 2\%$ )

El equipo utilizado para el registro de temperaturas del fluido de trabajo, es un sistema de adquisición de datos (SAD) KEYSIGHT 34970A, cuenta con tres espacios para insertar tres tarjetas multiplexoras.

La tarjeta multiplexora es modelo 34901A y cuenta con 22 canales disponibles donde se conectan los termopares y los piranómetros que miden la radiación global y la difusa, respectivamente (Figura 6).



**Figura 6** Piranómetros utilizados

**Para el registro de temperaturas se utilizó el software Agilent Technologies versión 4.3 para transferir los datos registrados por el adquirente a una PC.**

La bomba peristáltica que se utilizó es marca MasterFlex de la serie I/P modelo 07591-22 con las siguientes características:

- Rango de operación de 6 – 650 rpm, por lo que alcanza un caudal máximo de 8 l/min.
- Precisión de  $\pm 0.25\%$
- Soporta una presión máxima del sistema de 2.7 bar.



**Figura 7** Bomba peristáltica y SAD

La medición de la temperatura se realizó con termopares tipo T (cobre/constantan) los cuales son ideales para trabajar a medianas temperaturas, con un límite máximo de temperatura de  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  y puede utilizarse en atmósferas oxidantes, reductoras o de gas inerte. No se oxidan en atmósferas húmedas (WIKA, 2014).

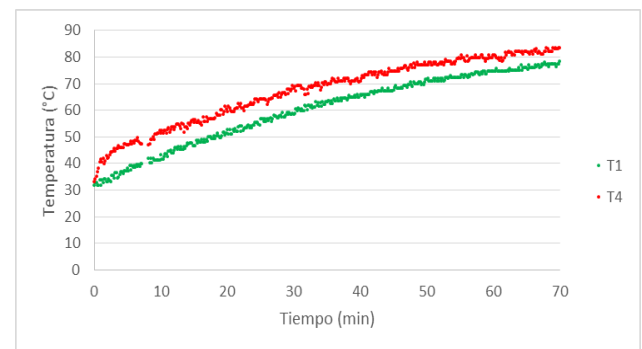
## Resultados

En la figura 8 se muestra la gráfica del comportamiento térmico de los colectores utilizando un flujo volumétrico de 4 litros por minuto y un volumen total de 40 litros al interior del termotanque.

Se muestra el incremento de la temperatura del agua contra el tiempo a la salida del tubo receptor cuando este se encuentra desnudo y cuando está cubierto por el tubo de vidrio.

Donde:

- T1 es la temperatura del agua a la salida del tubo receptor, cuando está desnudo, representado por los puntos verdes.
- T4 es la temperatura del agua a la salida del tubo receptor, cuando está cubierto por el tubo de vidrio, representado por los puntos rojos.

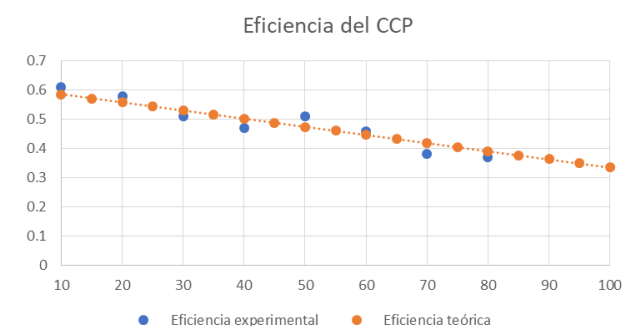


**Figura 8** Temperatura en el tubo receptor respecto al tiempo

La diferencia de temperatura promedio entre ambos casos fue de  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Con los coeficientes de transferencia de calor global se logró calcular las pérdidas convectivas.

En la figura 9 se muestran los resultados obtenidos para la eficiencia del CCP, la diferencia porcentual máxima entre los resultados del modelo teórico respecto a los experimentales fue de  $7.5\%$ .



**Figura 9** Eficiencia del CCP



La eficiencia teórica satisface la siguiente relación:  $\eta = 0.6128 - 2.324 \left(\frac{\Delta T}{G_B}\right)$

### Conclusiones

Se modeló y simuló un colector de canal parabólico (CCP) con los parámetros geométricos, mecánicos y térmicos necesarios para comparar un modelo teórico con resultados experimentales para el CCP. En general se concluye:

1. Se desarrolló un código computacional que permite el uso de diferentes fluidos de trabajo, parámetros y condiciones de operación del tubo receptor de un CCP.
2. La instrumentación, puesta en operación y experimentación del CCP, permitió validar los resultados teóricos con los experimentales.
3. Con los resultados experimentales se obtuvo la curva de eficiencia del CCP.
4. La diferencia entre los resultados teóricos con experimentales fue menor a 8%.

### Referencias

A. Fernández-García, E. Z. (2010). Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1695-1721.

Adel. Kh. Alfozan, S. N.-A. (2015). Experimental Study of Parameters Affecting the Temperature of an Absorption Tube of Parabolic Trough Collector. *Defect and Diffusion Forum*, 84-91.

Ahmet Lokurlu, F. R. (2005). High efficient utilisation of solar energy with newly developed parabolic trough collectors (SOLITEM PTC) for chilling and steam production in a hotel at the Mediterranean coast of Turkey. *Int. J. Energy Technology and Policy*, 137-146.

Ashish K. Sharma, C. S. (2017). Solar industrial process heating: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124-137.

C. Chang, X. L. (2014). Experimental and numerical study of the heat transfer characteristics in solar thermal absorber tubes with circumferentially non-uniform heat flux. *Energy Procedia* 49, 305-313.

C. Ramos, R. R. (2014). Potential assessment in Mexico for solar process heat applications in food and textile industries. *energy procedia* 49, 1879-1884.

Forristall, R. (2003). *Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver*. National Renewable Energy Laboratory.

J.Subramania, P. O. (2017). Efficiency and heat transfer improvements in a parabolic trough solar 1 collector using TiO<sub>2</sub> nanofluids under turbulent flow regime. *Renewable Energy*.

John A. Duffie, W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Hoboken.

Kalogirou, S. (2003). The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy* 76, 337-361.

M. Eswararmoorthy, S. S. (2010). Thermodynamic analysis of solar parabolic dish thermoelectric generator. *Int. J. Renewable Energy Technology*, 348-360.

Marnay López Martínez, J. L. (s.f.). ANÁLISIS DE TRAZADO DE RAYOS DE UN CONCENTRADOR DE CANAL PARABÓLICO (CCP) MEDIANTE EL SOFTWARE SOLTRACE. XLII semana nacional de energía solar (pág. 6). ciudad de mexico: international solar energy society.

Martínez, C. M. (2018). Diseño de un Concentrador de Canal Parabólico (CCP) para suministro de energía térmica. UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NAYARIT.

Mohammed Hasan Abbood, M. M. (2018). Experimental and Theoretical Investigation to Generate Steam by Parabolic Trough Solar Collector with Using Different Heat Transfer Fluids. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 11-22.

N. Galanis, E. C. (2009). Electricity Generation from Low Temperature Sources. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 55-67.

P.Selvakumar, P. . (2014). An Experimental Study on Evacuated Tube Solar Collector using Therminol D-12 as Heat Transfer Fluid Coupled with Parabolic Trough. *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 110-117.

VALENCIA-VEGA, Gustavo A., MONTIEL-GONZÁLEZ, Moisés, ROMERO-DOMÍNGUEZ, Rosenberg y ALVARADO-JUÁREZ, Roberto. Estudio teórico-experimental de la transferencia de calor en el tubo receptor de un colector solar de canal parabólico. *Revista del Diseño Innovativo*. 2019

Ricardo Vasquez Padilla, G. D. (2011). Heat transfer analysis of parabolic trough solar receiver. *Applied Energy*, 5097-5110.

Wu Yu-ting, L. B.-f. (2009). Convective heat transfer in the laminar-turbulent transition region with molten salt in a circular tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1128-1132.

Wu Yu-ting, L. B.-f. (2009). Convective heat transfer in the laminar-turbulent transition region with molten salt in a circular tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1128-1132.

Xiaoping Yang, X. Y. (2012). Numerical simulation study on the heat transfer characteristics of the tube receiver of the solar thermal power tower. *Applied Energy*, 142-147.

Z.D Cheng, Y. H. (2010). Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 782-787.