

Diseño de un concentrador ptc con generación directa de vapor para la ciudad de México utilizando una herramienta computacional

Design of a ptc concentrator with direct steam generation for Mexico City using a computational tool

DOI: 10.46932/sfjdv3n2-025

Received in: February 15th, 2022

Accepted in: March 1st, 2022

Ernesto Enciso Contreras

Doctor

Profesor perteneciente al Programa de Maestría

Institución: Mecatrónica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Estado de México

Dirección: MÉXICO, Av. Tecnológico S/N, 55210 Ecatepec de Morelos, Méx., México

Correo electrónico: eencisoc@hotmail.com

Jesús de la Cruz Alejo

Doctor

Profesor perteneciente al Programa de Maestría

Institución: Mecatrónica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Estado de México

Dirección: MÉXICO, Av. Tecnológico S/N, 55210 Ecatepec de Morelos, Méx., México

Correo electrónico: jesus_ch517@hotmail.com

Juan Gabriel Barbosa Saldaña

Doctor

Profesor e investigador

Institución: LABINTHAP del Instituto Politécnico Nacional

Dirección: 07300, Av Instituto Politécnico Nacional 1939, Lindavista, Gustavo A. Madero, Ciudad de

México, CDMX, México

Correo electrónico: jbarbosas@ipn.mx

Irving Cardel Alcocer Guillermo

Doctor

Profesor perteneciente a la división de Ingeniería

Institución: Sistemas Computacionales del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Estado de México

Dirección: MÉXICO, Av. Tecnológico S/N, 55210 Ecatepec de Morelos, Méx., México

Correo electrónico: ialcocer@tese.edu.mx

Jorge Díaz Salgado

Doctor

Profesor perteneciente al Programa de Maestría

Institución: Mecatrónica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Estado de México

Dirección: MÉXICO, Av. Tecnológico S/N, 55210 Ecatepec de Morelos, Méx., México

Correo electrónico: JorgeSalgado@tese.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta la aplicabilidad de una herramienta computacional para diseño de concentradores solares de canal parabólico con sistema de generación directa de vapor. El diseño se aplica para la Ciudad de México, evaluando 12 valores de irradiancia solar (W/m^2), obtenidos de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Metropolitana, Xochimilco. El diseño del concentrador se basa en el diámetro externo del tubo absorbedor, para obtener los datos geométricos: apertura de la parábola (m), longitud focal (m), longitud total (m) y los diámetros interno y externo del tubo transparente (m). El flujo másico (kg/s) es el principal parámetro para obtener las características térmicas, el software muestra como resultados en forma de tablas el flujo de calor útil (W), flujo de calor perdido (W), eficiencia térmica (%) y las temperaturas de los tubos absorbedor y transparente ($^{\circ}C$) respectivamente. El tubo absorbedor del concentrador completo, se divide en tres secciones, precalentamiento, donde el agua ingresa a la temperatura inicial (cercana o igual a la temperatura ambiente) y llega al estado de líquido saturado, en la siguiente sección se lleva a cabo la evaporación, todo el fluido de trabajo cambia de fase, desde el estado de líquido saturado hasta llegar al estado de vapor saturado, manteniendo la temperatura constante y, por último, el proceso de sobrecalentamiento, iniciando en el estado de vapor saturado, hasta llegar a la temperatura final deseada, impuesta por el usuario.

Palabras clave: generación directa de vapor, concentrador de canal parabólico, software.

ABSTRACT

This work shows the applicability of a computational tool for parabolic trough solar collectors (PTC) designing with direct steam generation system. The design is applied for Mexico City, evaluating 12 solar irradiance values (W/m^2), this data were obtained from the meteorological station at the Universidad Autónoma Metropolitana (Autonomous Metropolitan University), campus Xochimilco in Mexico. The PTC designing is based on the absorber tube external diameter, in order to obtain the geometrical parameters, such as: parabola aperture (m), focal length (m), total length (m) and the coating tube external and internal diameters (m), respectively. The mass flow (kg/s) is the main parameter considered to obtain the thermal characteristics, the software shows in form of tables the heat gained (W), heat losses (W), thermal efficiency (W) and the absorber and coating tubes temperatures ($^{\circ}C$), respectively. The entire absorber tube is divided into three sections; preheating, where the water enters at the initial temperature (equal or close to the environmental temperature) and becomes the saturated liquid state, next section is the evaporation, all the fluid undergoes a phase change, from the saturated liquid state to the saturated steam state, maintaining constant the temperature, and finally, the overheating process, starting from the saturated steam state and reaching the final temperature imposed by the user.

Keywords: direct steam generation, parabolic trough solar collector, software.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, numerosas investigaciones se están desarrollando para combatir el cambio climático cuyo efecto puede provocar cambios irreparables en la fauna y flora alrededor del mundo. Como solución, el auge de las energías renovables se encuentra en crecimiento, desarrollándose sistemas y tecnologías cada vez más eficientes y baratas, de tal manera que su uso se propague para disminuir la cantidad de gases de efecto invernadero que el ser humano está dejando como huella en su actividad doméstica e industrial.

Considerando las energías renovables disponibles, la energía solar se presenta como una de las más útiles y eficientes para ser utilizada como fuente de energía, con distintos fines como son: calor de proceso en industrias, calentamiento de agua para uso doméstico y generación eléctrica a pequeña y gran escala. Cuenta con la ventaja de ser virtualmente inagotable, ya que la cantidad que llega al planeta es suficiente para satisfacer la demanda mundial, también cuenta con la desventaja de ser intermitente, sin embargo, se han desarrollado sistemas de almacenamiento para hacer uso de la energía captada por más tiempo del que dura su incidencia sobre la superficie del planeta.

Existe variedad de dispositivos para aprovechamiento de la energía solar fototérmica, se clasifican de acuerdo a la temperatura a la que puede llegar el fluido de trabajo, estos son: colectores planos (30-80 °C), colectores de tubos evacuados (50-200 °C), concentradores parabólicos compuestos (60-300 °C), reflectores lineales Fresnel (60-250 °C), concentradores solares de canal parabólico (60-400 °C), concentradores de disco parabólico (100-1500 °C), campos de heliostatos (150-2000 °C) (Kalogirou, 2009).

Dentro de las tecnologías anteriormente mencionadas, los concentradores solares de canal parabólico son la tecnología termosolar más desarrollada y madura para llegar a temperaturas relativamente altas, cuya energía puede ser aprovechada para calor de proceso en industrias, hospitales y hoteles o para generación de energía eléctrica, generando vapor para alimentar una turbina. Este tipo de concentradores pueden clasificarse de acuerdo al fluido de trabajo que se maneje en el tubo absorbedor, ya que pueden operar sin cambio de fase, es decir, el fluido de trabajo se mantiene en estado líquido o llevar a cabo generación directa de vapor (Eck et al, 2003).

La generación directa de vapor se puede llevar a cabo de distintas formas, existen 3 configuraciones principales para llevar a cabo este propósito. La primera configuración es en Modo Directo, donde la cantidad de agua que ingresa al concentrador, es precalentada, evaporada y sobrecalentada en una misma línea, en el Modo de Recirculación se coloca un separador de agua entre las zonas de evaporación y la zona de sobrecalentamiento, el agua que es separada vuelve a ser inyectada a la parte inicial del concentrador solar, por lo que el flujo másico que se inyecta es distinto al flujo másico de vapor que sale del concentrador. Por último, se tiene el modo de inyección, en el cual se coloca un inyector cada determinada distancia para que en un trayecto equidistante se genere una cantidad de vapor y al final se sume, de acuerdo al número de secciones en las que se dividió el concentrador solar (Eck and Steinmann, 2001).

Se han desarrollado diversos proyectos relacionados a el uso de concentradores solares de canal parabólico, se enfocan en diversos aspectos como son el análisis del cambio de fase en el tubo absorbedor, considerando los patrones de flujo que se formarían bajo distintas condiciones y cómo afectaría al

coeficiente convectivo de transferencia de calor (Odeh, et al, 1998). De igual manera se han considerado el uso de distintos fluidos de trabajo, como lo son: Agua presurizada, aceite térmico Therminol VP-1, sal fundida, sodio líquido, aire, dióxido de carbono y helio (Bellos et al, 2017). Otras investigaciones muestran distintas formas en la geometría del tubo absorbedor y agregándole accesorios como son finas aletas para incrementar el área de transferencia de calor, aunado a análisis numéricos con el método de volúmenes finitos (Xiangtao, 2017).

De igual manera, el diseño y viabilidad de los sistemas termosolares son de gran importancia, ya que se requiere de dispositivos de fácil acceso, fácil uso, bajo costo y de mantenimiento accesible, este tipo de concentradores se utilizan para el secado de alimentos, principalmente en lugares remotos, tal es el caso del diseño y análisis de viabilidad de un concentrador utilizado para el secado de tabaco en países en vías de desarrollo como Zimbabwe, teniendo como sistema complementario un banco de celdas fotovoltaicas para suplir las necesidades de energía eléctrica (Shati et al, 2021).

En el trabajo actual se determinan las mejores opciones de diseño para un concentrador solar, utilizando los datos ambientales y de irradiación solar para la Ciudad de México.

2 DISEÑO DEL CONCENTRADOR

La aplicabilidad de la herramienta computacional se presenta en esta sección, donde se realizará el diseño de un concentrador solar de canal parabólico con generación directa de vapor. Se utilizan los datos ambientales de la Ciudad de México para que sirvan como punto de partida a los cálculos que se realizan y de esta manera obtener los mejores parámetros de diseño para el concentrador. La tabla 1 muestra los datos ambientales necesarios para los cálculos primarios y la ubicación del lugar donde se pretende realizar la instalación termosolar.

Tabla 1. Datos ambientales de la Ciudad de México.

Latitud (°)	19.49
Longitud oeste (°)	99.12
Altitud sobre el nivel del mar (<i>m</i>)	2240
Temperatura ambiente anual promedio (°C)	22
Velocidad promedio del aire ambiente (<i>m/s</i>)	4.5

Para realizar los cálculos principales, es necesario contar con los valores promedio de irradiancia solar (W/m^2) mensual, para realizar el cálculo de los parámetros del concentrador solar a lo largo del año, es decir, se obtendrán doce valores para cada variable calculada. Lo anterior se debe a que la irradiación tiene valores que varían a lo largo del año, éste análisis permite conocer los valores máximos y mínimos, así como, determinar el tamaño óptimo del concentrador con el afán de poder satisfacer la cantidad de energía y temperatura de diseño que el usuario haya dictado, de acuerdo a la aplicación a la

que esté destinado el concentrador solar. La tabla 2 muestra los datos promedio mensuales de irradiación solar para la Ciudad de México.

Tabla 2. Datos de irradiancia solar promedio mensuales para la Ciudad de México (<http://energiasolar.smartbitt.com/radiacion-solar/>).

Mes	Irradiancia solar promedio (W/m^2)
Enero	509.8056
Febrero	588.5420
Marzo	671.2653
Abril	624.0348
Mayo	646.9869
Junio	650.0273
Julio	646.1216
Agosto	630.2887
Septiembre	585.9845
Octubre	611.2846
Noviembre	527.3150
Diciembre	485.3833

Los cálculos térmicos y de flujo principales están basados en el diámetro externo del tubo absorbedor, el cuál puede ser ingresado libremente por el usuario, otro parámetro importante es el material del tubo absorbedor, ya que los valores de temperatura y presión de trabajo provocan esfuerzos y gradientes térmicos que pueden tener valores considerables cuando se pretende obtener vapor directamente, para el análisis de éste diseño en particular, se recomienda utilizar cobre, ya que su alto valor de conductividad térmica permite que los esfuerzos térmicos disminuyan debido a su poca resistencia a la transferencia de calor, lo que lleva a que disminuyan los gradientes térmicos. La tabla 3 muestra los datos de operación del concentrador y los materiales considerados para la fabricación del concentrador solar.

Tabla 3. Datos iniciales necesarios para la ejecución del software SOLEEC.

Diámetro nominal del tubo absorbedor (pulgadas)	1
Temperatura inicial del fluido de trabajo ($^{\circ}C$)	20
Temperatura final del fluido de trabajo ($^{\circ}C$)	300
Presión de trabajo (interna del tubo absorbedor (bar))	10
Superficie reflectiva	Aluminio anodizado
Superficie selectiva	Cromo negro
Tubo absorbedor	Cobre
Tubo transparente	Borosilicato

Las instalaciones termosolares basadas en concentradores solares de canal parabólico generalmente van acompañados de un sistema de seguimiento de un solo eje, debido a que suelen tener longitudes considerables, se utilizan generalmente 3 sistemas de seguimiento, estos son: orientación Norte-Sur con movimiento Este-Oeste, orientación Este-Oeste con movimiento Norte-Sur y paralelo al eje terrestre con movimiento Este-Oeste (Duffie y Beckman, 2013). Para el caso que se está analizando

en este trabajo, se estima el ángulo de incidencia de irradiación solar promedio para un sistema de seguimiento con orientación Norte-Sur y movimiento Este-Oeste, el cual es calculado utilizando la misma herramienta computacional obteniendo un promedio anual de 17.4 °. Una vez que se cuenta con todos los datos de acceso, se procede a ingresar dichos valores al software para poder obtener los datos de diseño, de flujo y térmicos para el concentrador solar. Las tablas 4, 5, 6 y 7 muestran los resultados.

Tabla 4. Características geométricas del concentrador PTC.

Diámetro nominal del tubo absorbedor (pulgadas)	1
Apertura (m)	3.11
Longitud focal (m)	0.7796
Diámetro interno del tubo transparente (m)	0.0666
Espesor del tubo transparente (m)	0.0042

Tabla 5. Parámetros térmicos de la sección de precalentamiento.

	Longitud (m)	Flujo de calor útil (W)	Flujo de calor perdido (W)	Flujo másico (kg/s)	Eficiencia (%)	Temperatura externa del tubo absorbedor (°C)	Temperatura interna del tubo transparente (°C)
Enero	7.79	8917.7	3781.5	0.0133	70.22	217.17	23.30
Febrero	7.81	10336	4324.1	0.0154	70.51	217.77	23.30
Marzo	7.78	11755	4966.0	0.0175	70.30	218.37	23.30
Abril	7.80	10944	4600.2	0.0163	70.41	218.03	23.30
Mayo	7.80	11350	4766.6	0.0169	70.42	218.20	23.30
Junio	7.81	11417	4774.8	0.0170	70.51	218.23	23.30
Julio	7.81	11350	4745.0	0.0169	70.52	218.20	23.30
Agosto	7.77	11012	4688.4	0.0164	70.14	218.06	23.30
Septiembre	7.79	10269	4327.9	0.0153	70.35	217.75	23.30
Octubre	7.76	10674	4552.8	0.0159	70.10	217.92	23.30
Noviembre	7.81	9255.5	3879.9	0.0138	70.46	217.31	23.30
Diciembre	7.81	8512.3	3578.5	0.0127	70.40	216.99	23.30

Tabla 6. Parámetros térmicos de la sección de evaporación.

	Longitud (m)	Flujo de calor ganado (W)
Enero	23.23	26833
Febrero	23.30	31069
Marzo	23.22	35306
Abril	23.26	32885
Mayo	23.26	34096
Junio	23.29	34297
Julio	23.29	34096
Agosto	23.17	33087
Septiembre	23.25	30868
Octubre	23.16	32078
Noviembre	23.31	27841
Diciembre	23.30	25622

Tabla 7. Parámetros térmicos de la sección de sobrecalentamiento.

	Longitud (m)	Flujo de calor ganado (W)	Flujo de calor perdido (W)	Eficiencia (%)	Temperatura externa del tubo absorbedor (°C)
Enero	13.70	3627.6	18152	16.66	319.75
Febrero	14.10	4200.4	21677	16.23	319.76
Marzo	14.40	4773.2	25370	15.84	319.85
Abril	14.20	4445.9	23187	16.09	319.84
Mayo	14.30	4609.5	24241	15.98	319.85
Junio	14.40	4636.8	24552	15.89	319.73
Julio	14.30	4609.5	24203	16.00	319.85
Agosto	14.30	4473.2	23633	15.92	319.73
Septiembre	14.10	4173.1	21592	16.20	319.73
Octubre	14.20	4336.8	22732	16.02	319.74
Noviembre	13.80	3764.0	18928	16.59	319.75
Diciembre	13.60	3464.0	17121	16.83	319.71

La tabla 4 muestra las dimensiones geométricas del concentrador solar, donde el diámetro externo del tubo absorbedor representa el principal parámetro de diseño dado que todas las demás medidas se calculan en función de este valor, se puede observar que el valor de apertura es considerable, teniendo 3.11m, por lo que se intuye que se logrará una buena relación de concentración.

Para cada una de las secciones de calentamiento se muestra la longitud mínima calculada de acuerdo a cada valor de irradiancia solar promedio para cada mes del año. Así que para un análisis anual, la longitud máxima debe ser considerada como el parámetro de diseño, en este caso en particular es la longitud de 45.52 m, esta longitud incluye las tres secciones, precalentamiento, evaporación y sobrecalentamiento.

La tabla 5 muestra los parámetros térmicos que se calculan para la sección de precalentamiento, en el punto final de esta sección, el agua llega a la temperatura de saturación dependiendo de la presión de trabajo (para 10 bar, $T_{sat} = 179.9$ °C). El flujo másico (kg/s) es el parámetro de cálculo más importante, se calcula de forma iterativa dentro del código del software en la sección de precalentamiento, siendo un valor dependiente de la temperatura de saturación, la irradiancia solar y la longitud de la sección de precalentamiento. El flujo másico es considerado como constante a lo largo del concentrador, es decir, será el mismo valor para la sección de evaporación y sobrecalentamiento.

La longitud mínima para llegar a la temperatura de saturación se muestra para cada valor de irradiancia solar, teniendo como valor máximo 7.76m para el mes de octubre, de igual manera se calculan el flujo de calor útil (W), el flujo de calor perdido (W), la temperatura externa del tubo absorbedor (°C), la temperatura interna del tubo transparente (°C) y la eficiencia térmica (%).

Los resultados para la sección de evaporación son presentados en la tabla 6. Una vez que se alcanza la temperatura de saturación, el proceso de evaporación comienza a temperatura constante donde el líquido en estado de saturación llega al estado de vapor saturado. Esta sección representa la longitud más larga

del concentrador debido a que se necesita una cantidad de energía más grande para lograr el cambio de fase. Debido a la longitud de esta sección, el flujo de calor útil es más grande con un valor máximo de 35306 *W* en el mes de marzo. Los otros parámetros como el flujo de calor perdido, las temperaturas de los tubos absorbedor y transparente cambian conforme la calidad del vapor varía de 0 a 1.

Las características térmicas para la sección de sobrecalentamiento se muestran en la tabla 7, es la última sección donde el vapor en estado de saturación obtenido en la sección de evaporación, se convertirá en vapor sobrecalentado al final del concentrador solar, de acuerdo a la temperatura final que el usuario haya introducido como datos de entrada. La longitud de esta sección es casi la mitad en comparación con la sección de evaporación, sin embargo, la temperatura del tubo absorbedor es mayor en comparación con las otras dos secciones afectando directamente a la eficiencia térmica.

El mecanismo de transferencia de calor más significativo para cuantificar las pérdidas de calor es la radiación, por lo tanto, entre más grande sea el valor de la temperatura externa del tubo absorbedor, de igual manera el flujo de calor perdido será mayor, lo cual como consecuencia provocará una disminución en la eficiencia térmica.

Las tablas anteriormente mencionadas muestran los resultados térmicos y de flujo en función de la cantidad de energía solar que incide en promedio cada mes, el usuario puede realizar un análisis comparativo de los resultados mensuales para cada una de las tres secciones que componen la longitud total del concentrador solar para determinar la mejor opción de acuerdo a la aplicación para la cual será destinado el diseño.

3 CONCLUSIONES

Se presenta la aplicación de una herramienta computacional para diseñar concentradores solares de canal parabólico, el análisis que se describe comprende el diseño de un concentrador para ser instalado en la Ciudad de México. De acuerdo a las condiciones de irradiancia solar y datos de operación que el usuario ingresa al software, se obtienen tablas con resultados geométricos, de flujo y térmicos con las condiciones óptimas recomendadas para la fabricación e instalación del concentrador.

El usuario debe ingresar los datos promedio mensuales de irradiancia solar para realizar un análisis anual, de igual manera debe ingresar datos ambientales como son, la temperatura ambiente y la velocidad promedio del aire, por último debe ingresar los datos de operación bajo los cuáles trabajará el concentrador solar, estos son: el diámetro nominal del tubo absorbedor, la presión interna de trabajo en el tubo absorbedor, temperatura a la cual el agua ingresa al concentrador, el valor promedio del ángulo de incidencia de la irradiación de acuerdo al sistema de seguimiento que se pretenda implementar y por

último la temperatura del vapor sobrecalentado a la cual se pretende llegar de acuerdo a la aplicación del concentrador.

El software muestra en forma de tablas los datos geométricos mínimos que el concentrador debe tener para cumplir con los parámetros de operación que el usuario haya dictado, se muestra la apertura de la parábola, longitud focal y diámetro y espesor del tubo transparente. El concentrador solar se divide en tres secciones para lograr la generación directa de vapor, en la primera sección de precalentamiento se calculan datos importantes como el flujo másico y la longitud mínima de la sección, el flujo másico es uno de los parámetros más importantes, ya que otros valores dependen directamente de él, como lo es el flujo de calor útil, el flujo de calor perdido y la eficiencia térmica de la sección, una vez que el flujo másico se calcula, se considera constante a lo largo de todo el concentrador solar. En la segunda sección de evaporación, a temperatura constante se realiza el cambio de fase, llegando del estado de líquido saturado al estado de vapor saturado, en esta parte el software realiza el cálculo de la longitud mínima de la sección. El vapor saturado obtenido en la sección de evaporación se sobrecalienta en la tercera sección, considerando flujo másico constante, se calcula la longitud mínima para ésta sección, así como las características térmicas, con el objetivo de obtener la temperatura deseada que el usuario haya ingresado como dato inicial de operación.

REFERENCIAS

- Bellos, E., Tzivanidis, C., Antonopoulos K. A., “A detailed working fluid investigation for solar parabolic trough collectors” *Applied Thermal Energy*, Vol. 114, 2017.
- Eck, M., Zarza. E., Eickhoff, M., Rheinländer, J., Valenzuela, L., “Applied research concerning the direct steam generation in parabolic troughs”, *Solar Energy*, Vol. 74, 2003.
- Eck, M. y W. D. Steinmann. “Direct steam generation in parabolic troughs: First results of the DISS project,” *Proceeding of Solar Forum 2001: Solar Energy: The power of choose*, 21 al 25 de abril de 2001, Washington DC.4
- Kalogirou S. “Solar Energy Engineering Processes and Systems”, 1st edition, Ed. Elsevier Inc., New York, 2009.
- Duffie, J.A. y W.A. Beckman. “Solar Engineering of Thermal Processes”, 4th ed., John Wiley and Sons Inc., New Jersey, 2013.
- Odeh, S.D., Morrison, G.L. Behnia, M. “Modelling of parabolic through direct steam generation solar collectors” *Solar Energy*, Vol. 62, No 6, pp. 395-406, 1998.
- Shati, N., Madanhire, I. and Mashonjowa, E. “Selection criteria for a Tobacco curing solar thermal collector energy system in Zimbabwe”, *South Florida Journal of Development*, Vol. 2, No 3, pp. 3998-4013, 2021.
- Xiangtao, G., Fuqiang, W., Haiyan, W., Jianyu, T., Qingzhi, L., Huaizhi, H. “Heat transfer enhancements analysis of tube receiver for parabolic trough solar collector with pin fin arrays inserting”, *Solar Energy*, Vol. 144, 2017.