

Tema A4 Termofluidos: Energía

“Determinación de la radiación incidente anual en colectores solares de tubos evacuados mediante la aplicación del método *Ray-Tracing*”

Rossio Delgado Carreño^a, Fernando Fong López^a, Héctor García-Lara^{a,*}, Miguel García Yera^a, Arturo Morales Fuentes^a, Joel González Marroquín^a

^aUniversidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), Laboratory for Research and Innovation in Energy Technology (LIITE), Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66455, México.

*Autor contacto. Dirección de correo electrónico: hector.garcialra@uanl.edu.mx

RESUMEN

Se presenta la aplicación de un método de simulación que permite la determinación de la radiación incidente en colectores solares de tubos evacuados tipo “Heat Pipe”. Los colectores solares tienen la finalidad de captar la radiación solar, transformarla en calor y transferirlo a un fluido de trabajo; dicho calor recuperado depende de la radiación incidente en la superficie de los colectores solares, lo que hace que sea un parámetro importante en la evaluación de su eficiencia. Se realiza una simulación anual con el método Ray-Tracing usando el software comercial TracePro en conjunto con MATLAB, aplicado a la planta Termosolar de la FIME, UANL. Se logró estimar la radiación incidente en un colector durante el año bajo las condiciones actuales de instalación, al ser comparada con la radiación incidente estimada teóricamente, esta última es significativamente más grande, por lo tanto, las evaluaciones futuras de parámetros de instalación usando el presente método estarán soportadas por datos más cercanos a la realidad y con resultados anuales.

Palabras Clave: Ray-tracing Colectores solares, TracePro, Simulación anual.

ABSTRACT

The application of a simulation method for the determination of incident radiation in Heat Pipe evacuated tube solar collectors is presented. The solar collectors have the purpose of harvest the solar radiation, convert into thermal energy and transfer it to a working fluid; this recovered heat depends on the incident radiation on the surface of the solar collectors, which makes it an important parameter in the evaluation of its efficiency. A yearly simulation is performed with Ray-Tracing method using the commercial software TracePro in conjunction with MATLAB, applied to the termosolar plant of the FIME, UANL. Was achieved estimate the incident radiation in a collector during a year under the current installation conditions, when it is compared with the theoretical incident radiation, it turns out to be significantly lower, thus, future evaluations of installation parameters using the present method will be supported by data closer to reality for annual results.

Keywords: Ray-tracing, Solar collectors, TracePro, Yearly simulation

1. Introducción

El aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento de agua de uso doméstico es una de las aplicaciones más populares y prometedoras con miras a disminuir las emisiones de gases contaminantes provocadas por el uso de hidrocarburos para la generación de energía. Este tipo de instalaciones constan básicamente de tres componentes: tanques de almacenamiento térmico, sistemas hidráulicos y los colectores solares, considerado este último como el elemento más importante.

Cuando estos sistemas se encuentran en operación, suplen una fracción de la demanda energética, la cual depende en gran medida de la eficiencia de los colectores solares, que a su vez está en función de la radiación incidente sobre la superficie de los colectores, sin embargo, obtener

datos sobre este parámetro resulta complejo, por lo tanto se considera necesario realizar algunas simplificaciones para permitir cálculos menos complejos, en función de datos que pueden ser obtenidos experimentalmente.

Diversos autores han propuesto técnicas para el cálculo de la eficiencia de los colectores teniendo en cuenta la complejidad antes mencionada. En [1] se introduce un nuevo concepto sobre colección de calor solar efectivo, desarrollando un modelo matemático de optimización para determinar el ángulo de inclinación y orientación de los colectores en función de este parámetro, aplicado a una instalación en Lhasa, China, reportando resultados para una estación del año (4 meses en total). Sin embargo, la mayoría de trabajos relacionados con la determinación del rendimiento de colectores solares se basan en mediciones experimentales, como en el trabajo presentado en [2], donde determinan experimentalmente la curva de eficiencia de un

colector por medio de un simulador solar en tres casos de radiación: baja (574 W/m^2), media (787 W/m^2) y alta (916 W/m^2). Al basar el cálculo en datos experimentales, el estudio se limita a épocas o días específicos, lo que no representa por completo el comportamiento del colector, que se ve afectado por las variaciones del recurso solar durante el año debido a los cambios de radiación y posición solar aparente. Por ejemplo, en [3] usan la lógica difusa para hacer una predicción de la eficiencia de un sistema de calentamiento de agua con colector solar de placa plana, realizando experimentos durante verano en Nicosia, Chipre, Reino Unido. En [4] realizan un estudio experimental con el fin de comparar la eficiencia de un colector de placa plana con y sin reflectores, que tienen como función aumentar la radiación incidente en el colector, obteniendo 10% de aumento en la eficiencia de los colectores con el uso de los reflectores, sin embargo, su estudio se limita a dos días del mes de enero de 2015, en Bangladesh.

Por otro lado, el método *Ray-Tracing* es una herramienta novedosa aplicada para la evaluación de sistemas de concentración, basado en la propagación de un gran número de rayos, cada uno posee una intensidad asociada en relación a la radiación solar, estos rayos interactúan con los sólidos involucrados en la simulación, y dependiendo de las propiedades de los materiales pueden estar sometidos a diferentes fenómenos ópticos. Los programas especializados en el desarrollo de simulaciones con *Ray-Tracing* hacen un seguimiento de cada rayo, que puede ser propagado por diferentes recorridos a través del sistema simulado, con el fin de determinar la intensidad y distribución con la que los rayos inciden en cierta superficie de interés. A pesar de que el presente no es un caso de aplicación de concentración, la versatilidad del método permite su aplicación en la determinación de la radiación incidente en colectores solares.

El presente método de simulación se basa en esta metodología, usando el software comercial diseñado para tal fin, TracePro; la simulación es controlada desde el software Matlab, dichos programas son vinculados mediante el protocolo de Intercambio Dinámico de Datos (DDE), el cual permite emitir órdenes y leer resultados de cada instante de simulación. Dentro de las novedades del método propuesto se encuentran:

- Permite una simulación anual con lapsos de tiempo definidos.
- Incorpora datos de radiación, lo que hace posible su aplicación a cualquier ubicación; también está en función de los ángulos solares, que son estimados con respecto a la latitud.
- Los elementos del sistema son incorporados como dibujos CAD, lo que permite la integración de elementos externos que pueden afectar el desempeño de la instalación, como edificaciones, sin tener que desarrollar modelos complejos para cada elemento.
- La evaluación de parámetros de instalación como ángulos de inclinación, orientación, distribución de los tubos y colectores, entre otros.

- Permite el desarrollo de evaluaciones dinámicas en función de datos de radiación locales con el fin de obtener el comportamiento de la captación para diferentes horarios durante el día.

2. Metodología

2.1. Caracterización del movimiento solar aparente

Dentro de los parámetros de entrada para el desarrollo del método se encuentran los ángulos que caracterizan la posición del sol en el momento específico de simulación, a partir de estos se obtiene un vector de rayos incidentes. Estos ángulos son calculados en función del ángulo de latitud ϕ correspondiente a la ubicación considerada, en este caso la aplicación se da en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México (Latitud: $25^{\circ}43'37.1''\text{N}$, Longitud: $100^{\circ}18'48.4''\text{W}$). El ángulo de altitud solar es obtenido a partir de la ec. (1) [5], donde α corresponde a dicho ángulo y δ representa al ángulo de declinación solar, dado por la ec. (2) [5], en dicha ecuación, n representa el número de día en estudio de manera secuencial (1 corresponde al primero de enero).

$$\text{Sen}\alpha = \text{Cos}\phi * \text{Cos}\delta * \text{Cos}\omega + \text{Sen}\phi * \text{Sen}\delta \quad (1)$$

$$\delta = 23.45 * \text{Sen}\left(\frac{360}{365} * (284 + n)\right) \quad (2)$$

En la ec. (1), el ángulo de hora solar representado por ω , describe la rotación del sol sobre su propio eje, y está dado por la ec. (3) [5], donde h es la hora solar correspondiente al instante de simulación:

$$\omega = 15(h - 12) \quad (3)$$

Por otro lado, el ángulo azimutal solar (γ) en grados se obtiene a partir de la ec. (4) [6].

$$\text{Sen}\gamma = \frac{\text{Cos}\delta * \text{Sen}\omega}{\text{Cos}\beta} \quad (4)$$

2.2. Identificación de las características de interés de la instalación

En el desarrollo de la simulación se incorpora un colector, ya que se consideran reproducibles sus resultados para los demás que conforman la instalación. Los colectores instalados en la planta de energía solar térmica de los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la UANL son de la marca SunPower,

modelo SPA-58/1800-20, estos colectores están conformados por tubos evacuados tipo *heat pipe*.

Los colectores solares de tubos evacuados poseen un sistema supresor de pérdidas de calor, el cual consiste de dos tubos de vidrio concéntricos hechos de boro-silicato con un espacio “vacío” entre ellos, la combinación de estas tres capas en total, cumple la función de dirigir la radiación incidente dentro del tubo.

Para el presente proceso de simulación, se tendrá en cuenta este sistema supresor de pérdidas y se obtendrán datos de la cantidad de energía que es concentrada en el interior del tubo, teniendo en cuenta las características reportadas en la certificación del colector, emitida por la SRCC (Solar Rating & Certification Corporation). La Tabla 1 presenta los datos más relevantes sobre los dos tubos de cristal del tubo evacuado, los cuales se tienen en cuenta para la simulación.

Tabla 1 - Características de los tubos evacuados

Acristalamiento	Capa externa	Capa interna
Material	Vidrio	
Espesor	1.6 mm	
Diámetro	58 mm	47 mm
Transmisividad	≥ 90%	< 87%

Cada colector de la instalación de estudio tiene una inclinación de 40° orientados hacia el sur, constan de 20 tubos espaciados 2 cm entre ellos. De acuerdo con la certificación SRCC, el área bruta o total del colector es de 3.188 m² y el área de apertura, definida como el área del colector que está expuesta a la radiación, es de 1.896 m².

2.3. Datos de radiación

Los valores de radiación usados para la simulación son obtenidos de la base de datos Meteonorm, el formato obtenido es TMY2 (*Typical Metereological Year*), este formato de datos contiene información de radiación horaria obtenida a partir de un lapso de tiempo, seleccionando de ahí 12 meses que mejor representen las condiciones típicas climáticas, la base de datos considera un periodo de tiempo entre 1991 y 2010. Para la presente aplicación, se tiene en cuenta la información de radiación solar directa normal promedio horaria en W/m² para Monterrey, Nuevo León, México.

En la planta de energía solar térmica del LIITE se cuenta con una estación meteorológica que mide la radiación global sobre la horizontal, datos recaudados durante los últimos siete meses, de los cuales se han considerado los datos de dos meses no consecutivos para compararlos con la información proporcionada por Meteonorm. Las Figuras 1 y 2 muestran el comportamiento de los datos de radiación de la base de datos comparado con el de la estación meteorológica para los meses de julio y diciembre, respectivamente, en ambos casos se observa una discrepancia entre los datos, mostrada en forma de

porcentaje con la línea verde en las Figuras 1 y 2, que llega a alcanzar valores de miles, lo que representa una causa de incertidumbre en los resultados que se esperan, debido a la sobre estimación de los datos de radiación usados en la simulación.

El presente método de simulación integra datos de radiación con el fin de obtener resultados cercanos a la realidad teniendo cuenta las condiciones climatológicas de la zona de estudio, estos datos impactan de cierta manera en los resultados y la fuente de información de éstos debe ser debidamente seleccionada para evitar la obtención de resultados que no representan el comportamiento real del sistema funcionando bajo las condiciones ambientales reales.

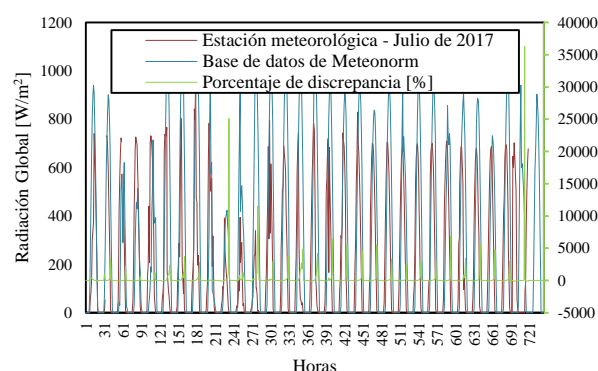


Figura 1 - Comparación de datos de radiación para el mes de julio

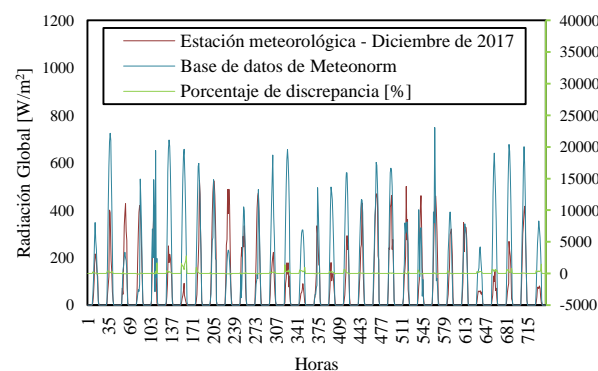


Figura 2 - Comparación de datos de radiación para el mes de diciembre

2.4. Desarrollo de simulaciones

En el presente método de evaluación, el proceso consiste en una etapa de inicialización seguida de un ciclo de simulación interactiva y una fase final de evaluación. La metodología del proceso de se resume en la Figura 3.

El proceso parte de la caracterización de la instalación, etapa en la que se deben desarrollar los archivos CAD de los elementos que conforman la instalación, en este caso, del colector solar con las características mencionadas en la Tabla 1. La Figura 4 muestra el diseño introducido en la simulación, que como se mencionó anteriormente, únicamente tiene en cuenta los dos tubos de vidrio que

conforman el sistema supresor de pérdidas.

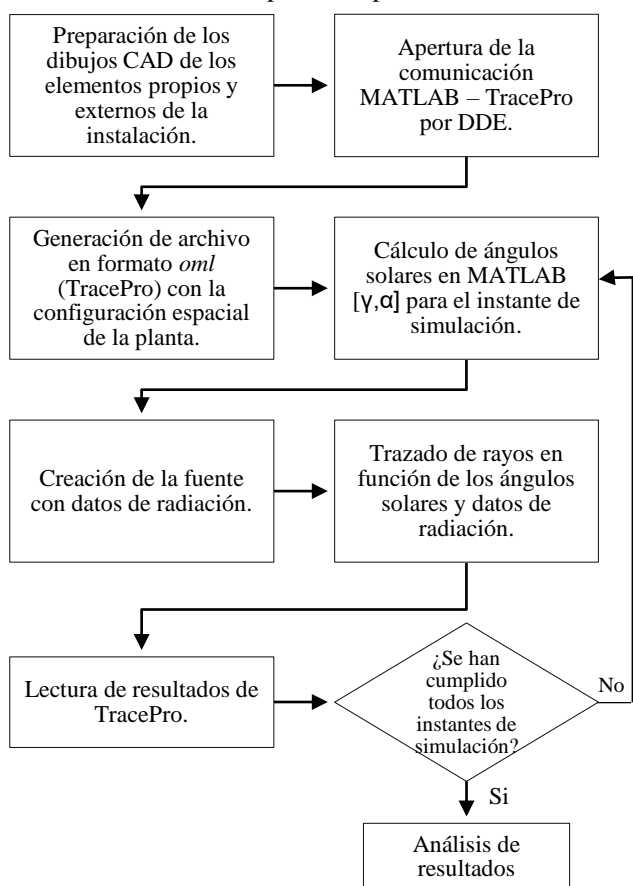


Figura 3 - Metodología de simulación para la obtención de la radiación anual incidente

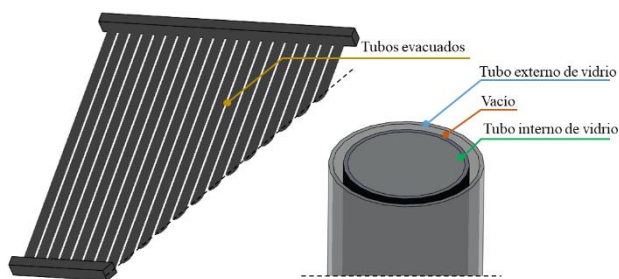


Figura 4 - Diseño de los colectores

TracePro es un software de trazado de rayos para el análisis óptico de modelos sólidos. El trazado de rayos del software usa “Generalized Ray Tracing”, esta técnica permite realizar el trazado de rayos en un modelo sin hacer suposiciones sobre el orden en el cual los objetos y superficies son intersectadas. En cada intersección un rayo individual puede estar sujeto a absorción, reflexión, refracción, difracción y dispersión. Debido a que los rayos se propagan por diferentes caminos a través del modelo sólido, TracePro realiza un seguimiento de la intensidad óptica asociada a cada rayo. En el modelado de trazado de

rayos, TracePro usa el método de Monte Carlo para simular la dispersión y difracción de la luz, y para generar la distribución de los rayos generados desde una fuente de luz. En simulaciones que no presentan dispersión y difracción, el recorrido de la luz en direcciones discretas puede ser exactamente modelado con ray tracing [7].

TracePro puede ser controlado por otra aplicación usando el protocolo de comunicación de Intercambio Dinámico de Datos (DDE, por sus siglas en inglés), el cual comparte información entre programas diferentes. DDE usa un ítem para identificar el dato particular o comando requerido por el programa que establece la conversación. La aplicación que inicia la conversación es llamado cliente (MATLAB) y la aplicación que responde es llamada el servidor (TracePro), durante la conversación DDE, el cliente y el servidor intercambian datos relacionados con el ítem, el cual puede cambiar durante la conversación. El protocolo DDE ejecuta comandos definidos de acuerdo a la funcionalidad Macro con la que cuenta TracePro.

Para el desarrollo de las simulaciones, las aplicaciones conectadas por DDE son Matlab y TracePro, Matlab realiza los cálculos de inicialización referentes a encontrar los ángulos solares y lee los datos de radiación con su día y hora respectiva, abre la comunicación DDE con el comando correspondiente y a partir de ese momento emite órdenes a TracePRO por medio de comandos que representan Macros que pueden ser interpretadas y ejecutadas por el software. El primer paso para la simulación es la generación de un archivo *.oml* (TracePro) que contiene el diseño CAD con las propiedades ópticas correspondientes para cada superficie.

Una vez creado dicho archivo base, se inicia un proceso interactivo e iterativo que en cada ciclo simula un instante correspondiente a un día y una hora en específico. A partir de estos dos parámetros, para cada ciclo, Matlab calcula los ángulos solares, importa los datos de radiación directa usados para la simulación y da órdenes a TracePro para el trazado de rayos basado en estos dos parámetros, para esto, TracePro genera una fuente de radiación, se usa una fuente tipo *Grid* definida como una ventana virtual a cierta distancia que emite rayos de manera perpendicular a cierto plano, que es orientado de acuerdo a los ángulos solares correspondientes al instante de simulación y emite la cantidad de watts por metro cuadrado que corresponde a la radiación, distribuida en 100 rayos emitidos de manera *Regular* por cada metro cuadrado a partir de una fuente tipo *Rectangular* de 60m de lado. Este se define como un proceso interactivo porque en este paso el protocolo de comunicación permite el intercambio de datos, específicamente los resultados sobre la radiación incidente en la superficie de interés.

Al generar la fuente de radiación en cada instante, TracePro ejecuta el trazado de rayos con todas las especificaciones antes mencionadas, estos rayos emitidos interactúan con los cuerpos integrados en la simulación, en este caso con el colector solar. La Figura 5 muestra el modelo simulado tras el trazado de rayos para un instante específico de simulación (Día 180 a las 13:00 horas), en la Figura 5(a) se muestra el colector indicando su

correspondiente ángulo de inclinación. La imagen muestra los rayos incidentes en la superficie exterior de uno de los tubos evacuados. El eje x positivo en la figura corresponde

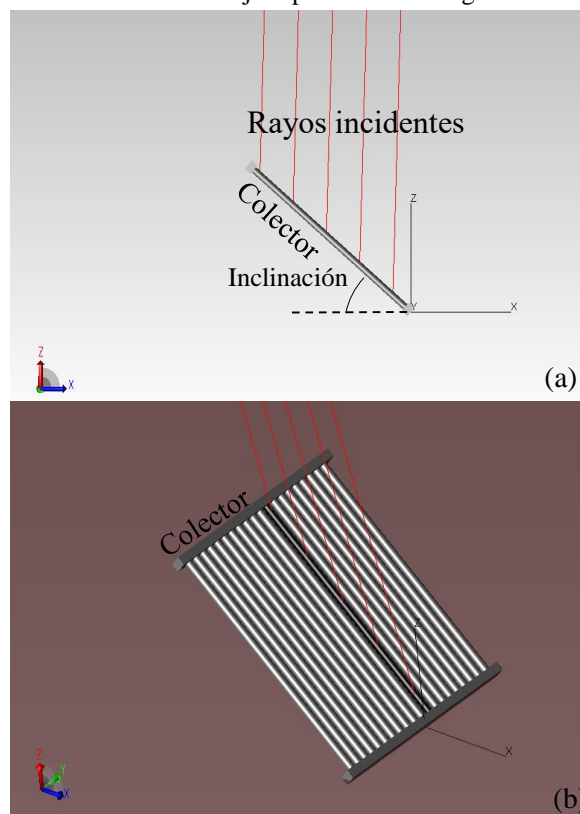


Figura 5 - Visualización del modelo de colector simulado en TracePro

al sur.

Al realizar el trazado de rayos, TracePro cuantifica la cantidad de rayos incidentes en cada superficie de interés, cada rayo tiene una intensidad asociada, de esta manera es posible cuantificar la cantidad de radiación incidente en el interior de los tubos evacuados del colector, estos resultados obtenidos tras cada instante de simulación son leídos y almacenados desde Matlab, al completar los instantes correspondientes a un año, se cierra la comunicación y Matlab procesa los resultados obtenidos.

3. Resultados y discusión

3.1. Desarrollo de simulación anual

Basado en los datos de radiación proporcionados por la base de datos de Meteonorm y por medio del método de RayTracing, se obtienen datos de la cantidad de energía incidente en el interior de los tubos evacuados de los colectores solares, tras atravesar el sistema el acristalamiento completo. Se realiza una simulación anual

con lapsos de tiempo de una hora durante el rango de tiempo por día en el cual hay radiación solar.

La radiación representa la cantidad de energía disponible para ser convertida en energía térmica por los colectores y ser aprovechada con un fluido de trabajo, agua en este caso; por lo tanto, este parámetro impacta en gran medida los resultados de energía que dispone el colector para cumplir su función de transformarla en energía térmica y aumentar la temperatura del agua. De acuerdo con los datos usados para la simulación y para la zona de estudio, como se muestra en la Figura 6, en promedio los valores más altos de radiación se dan entre los meses de junio y agosto con valores promedio de cerca de 600 W/m^2 y un rango de horas de radiación de 13 horas, por el contrario, en enero y diciembre son típicos valores más bajos de radiación, en promedio valores alrededor de los 300 W/m^2 , además, la cantidad de horas con radiación se reduce a 9 horas; este comportamiento de la radiación impacta en gran medida la energía captada.

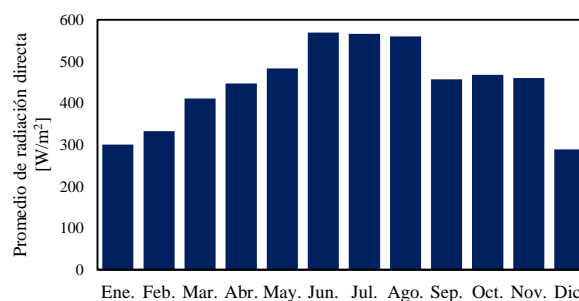


Figura 6 - Datos promedio de radiación de acuerdo a Meteonorm

El resultado anual de la simulación se muestra en la Figura 7, donde los resultados se comparan con el cálculo teórico de la radiación incidente, el cual está dado por la ec. (5) [5], esta relación calcula teóricamente la radiación incidente sobre los colectores solares y es usada típicamente para cuantificar el rendimiento térmico de los colectores, ya que este es el recurso energético con el que cuenta el colector para transferir el calor al fluido de trabajo

$$E = G * A_c \quad (5)$$

En dicha ecuación G representa la radiación solar global en W/m^2 y A_c el área del colector, en la que diferentes autores usan el área total del colector mientras que otros usan el área de apertura, para este caso de estudio se usó el área de apertura del colector (1.896 m^2). Sin embargo, esta estimación no siempre corresponde a un comportamiento cercano a la realidad, como se muestra en la Figura 7, pues los resultados de la simulación muestran que la energía incidente en un colector es inferior en gran medida a la teórica, lo que puede conllevar a subestimar el rendimiento de un colector, ya que, el rendimiento relaciona la energía que es transferida al fluido de trabajo con la energía con la que disponer el colector para tal fin, como lo muestra la ec. (6) [5], donde se observa que la eficiencia del colector es inversamente proporcional al recurso disponible para el

colector representado en la ecuación por el producto $A_c * G_T$.

es de 1.896m², se esperaría que la radiación incidente sea cerca del doble de la radiación directa, ya que ésta está dada

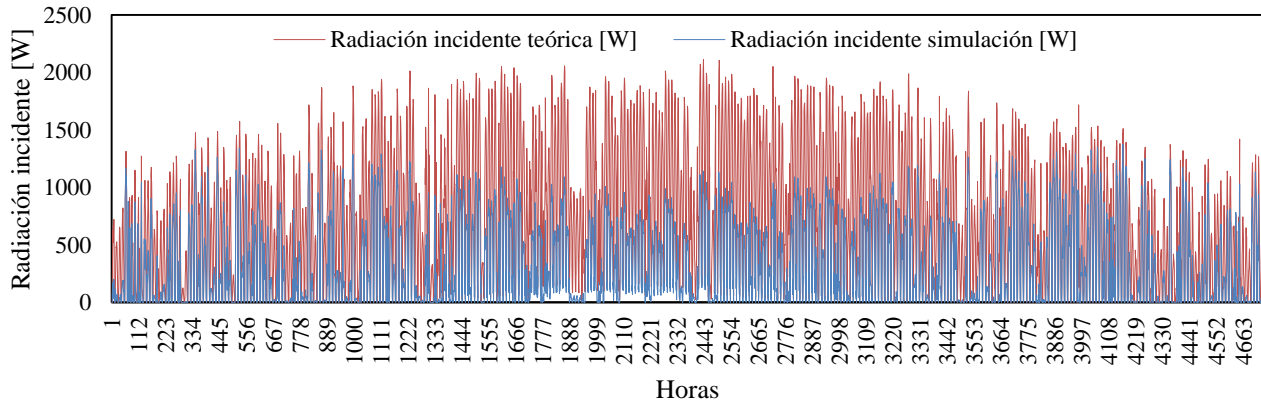


Figura 7 - Resultados de radiación incidente anual

$$\eta = \frac{\dot{m} * C_p (T_o - T_i)}{A_c * G_T} \quad (6)$$

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos de la simulación en promedio para cada mes, su comportamiento se ve altamente influenciado por los datos de radiación correspondientes a cada instante de simulación. Se puede observar, que de acuerdo a valores promedio, el mes más favorable es agosto, con un valor de radiación incidente promedio de 411.8 W por colector, mientras que, el comportamiento menos favorable en cuanto a radiación incidente es diciembre, donde la energía en promedio se reduce a la mitad de la que incide durante los meses de verano. Agosto y diciembre se consideran como los meses en los que la radiación incidente actúa de manera más favorable y desfavorable, respectivamente, en promedio, por tal motivo se muestran a detalle los resultados de estos meses en las Figura 9 y 10; en el mes de agosto se observa el comportamiento de la energía incidente y la radiación solar con rangos amplios de horas de radiación, en contraste, los resultados para el mes de diciembre muestran que los lapsos de radiación baja son más amplios y frecuentes, lo que genera el comportamiento desfavorable visto en promedio. Es importante notar que, a pesar de que en la mayoría de los instantes de simulación la radiación incidente supera la radiación solar directa, no es tan considerable, a pesar de que el área de apertura del colector

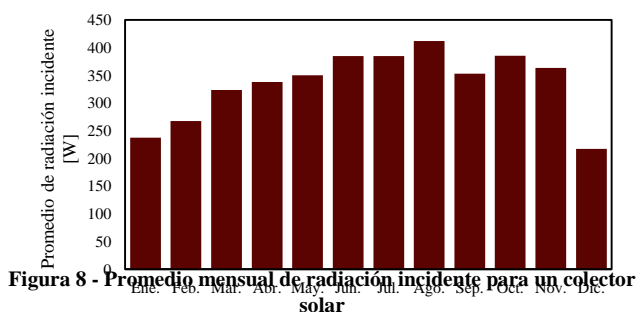


Figura 8 - Promedio mensual de radiación incidente para un colector solar

por unidad de área.

Por otro lado, el cálculo teórico de la radiación incidente

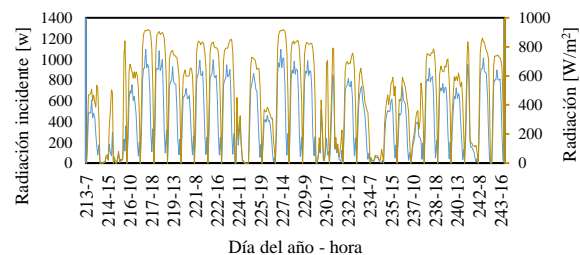


Figura 9 - Resultados de radiación incidente durante el mes de agosto para un colector

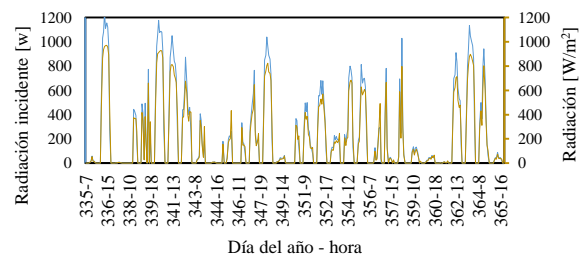


Figura 10 - Resultados de radiación incidente durante el mes de diciembre para un colector

no tiene en cuenta los parámetros de instalación del colector como ángulo de inclinación o espaciamiento de los tubos. Debido al movimiento aparente del sol, estos parámetros influyen en la radiación que incide en los colectores. La cantidad de energía solar recibida por un colector depende de la latitud, día del año, hora del día, ángulo de incidencia de la radiación y por último de los ángulos de orientación e inclinación de la superficie. De estos parámetros, solo pueden ser controlados los parámetros relacionados con la instalación, es decir, ángulo de inclinación y orientación de los colectores. En la literatura se encuentra una definición general y ampliamente usada en la instalación de colectores solares: para maximizar la disponibilidad de energía anual, el ángulo de inclinación óptimo es aquel igual a la latitud de

la zona de aplicación y orientado hacia el ecuador [8]. Como parte de las bondades del presente método de simulación, es que permite la modificación de dichos parámetros de instalación y determinar su efecto sobre la cantidad de energía que es recibida por los tubos evacuados de los colectores.

En las Figuras 11 y 12 se muestra el resultado de la simulación para dos meses en específico, agosto y diciembre respectivamente, incluyendo variaciones en el ángulo de inclinación; en los cuales puede observar que la radiación incidente en el colector si se ve influenciada por este parámetro de instalación, sin embargo el comportamiento es diferente entre los dos meses, para el caso del mes de agosto hay una diferencia significativa entre los diferentes ángulos de inclinación, contrario a lo que ocurre durante el mes de diciembre, esto se debe al ángulo de altitud solar, que en otras palabras es la altura del sol medida desde la horizontal, teniendo en cuenta que el escenario ideal en el que se aprovechará mejor el área de los colectores es en el que los rayos solares inciden perpendicularmente sobre su superficie. Se observa que durante el mes de agosto el ángulo de altitud solar es mayor que en el mes de diciembre, por lo tanto es conveniente un ángulo de inclinación bajo y teniendo en cuenta que la radiación incidente durante el mes de diciembre y en general en temporadas de altitud solar baja (invierno) no es tan sensible ante la variación del ángulo de inclinación, se puede considerar una instalación con un ángulo de inclinación bajo, para obtener una mayor incidencia de radiación durante todo el año, haciendo más eficiente el sistema.

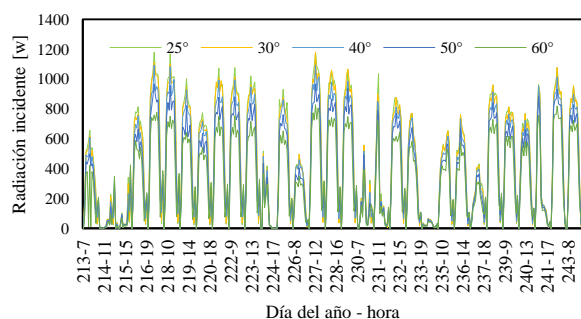


Figura 11 - Resultados con variación de inclinación para el mes de agosto

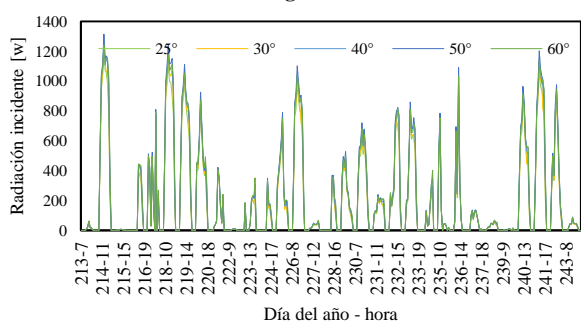


Figura 13 - Resultados con variación de inclinación para el mes de diciembre

A partir de los datos obtenidos de la simulación, se calcularon los promedios horarios para cada mes, como se muestran gráficamente en la Figura 13, el máximo de radiación incidente se da a las 12 del mediodía, con un promedio anual de 571.66 W. Por otro lado, en promedio anual, los valores más bajos se dan en las horas extremo del día, ya que el recurso solar en estas horas no es disponible en todas las épocas del año. El promedio anual de radiación incidente instantánea en cada colector es de 334.5 W, a partir de esto, se puede estimar que en la Planta Termosolar de la FIME se están captando 6.7 kW de energía solar, los cuales se están aprovechando para el calentamiento de agua suministrada al Polideportivo de la Facultad.

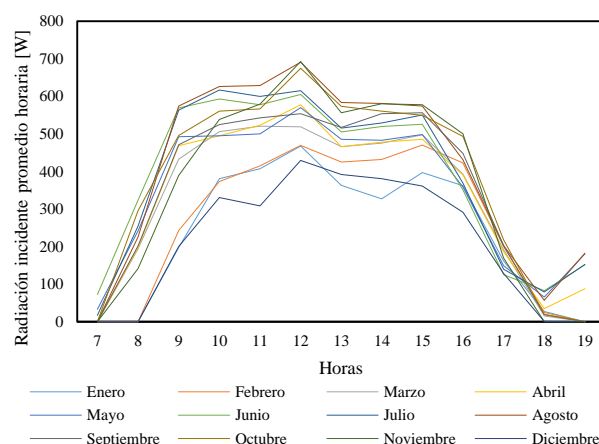


Figura 12 - Promedio horario de la radiación incidente en un colector para cada mes

4. Conclusiones

El cálculo teórico empleado por diferentes autores para estimar la radiación incidente en un colector solar de tubos evacuados no siempre representa los valores reales de la radiación que incide en los colectores, debido a que este se ve altamente influenciado por las variaciones de la radiación durante las diferentes épocas del año, además de la posición aparente del sol. El método de simulación presentado permite la evaluación de la radiación incidente en diferentes escenarios de instalación, configuración y obtener resultados para cualquier temporada del año o una simulación anual del comportamiento de la radiación incidente en un colector.

El método de Ray-Tracing es una buena herramienta para la evaluación de diferentes tecnologías de energía solar, es un método versátil que permite su aplicación a diferentes tipos de tecnologías por medio de la generación de un gran número de rayos que conservan una intensidad correspondiente en relación a la radiación directa, que es la tomada en cuenta en el presente trabajo. Además, el protocolo de comunicación DDE permite controlar y realizar simulaciones para tiempos prolongados hasta obtener resultados anuales de radiación incidente.

Al aplicar el método de simulación en el caso de estudio, se cumple que la radiación incidente obtenida, no corresponde a la definida teóricamente, que está en función del área del colector y la radiación global, esto porque el movimiento aparente del sol hace que la superficie de colección no sea perpendicular a los rayos solares en la gran mayoría de los casos, por lo tanto, la herramienta ofrece resultados más cercanos a la realidad para una evaluación teórica de rendimiento de colectores. La radiación incidente en realidad es menor a la que se define teóricamente, lo que conlleva a subestimar el rendimiento de un colector si se basa en un cálculo teórico.

En el caso de estudio, el promedio anual de radiación incidente instantánea en cada colector es de 334.5 W, es decir, en la Planta Termosolar de la FIME se están concentrando 6.7 kW. El mes más favorable en cuanto a radiación incidente es agosto, en contraste en diciembre se obtienen los valores más bajos de radiación incidente. Debido a que el método de simulación permite evaluaciones con diferentes condiciones de instalación, es posible concluir que un ángulo de inclinación de los colectores de alrededor de 25°, cercano a la latitud de la zona de estudio, es el más favorable para aumentar la cantidad de radiación que puede ser recibida en el área del colector.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAYT) del Gobierno de México por su apoyo en el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

-
- [1] Lv, Y., Si, P., Rong, X., Yan, J., Feng, Y., & Zhu, X. (2017). Determination of optimum tilt angle and orientation for solar collectors based on effective solar heat collection. *Applied Energy*, 11-19.
- [2] Setrak Sowmy, D., Schiavan Ara, P., & T.A. Prado, R. (2016). Uncertainties associated with solar collector efficiency test using an artificial solar simulator. *Renewable Energy*, 664-651.
- [3] Ebrahimi Vafai, L., & Sah, M. (2017). Predicting efficiency of flat-plate solar collector using fuzzy inference system. 9th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perception, ICSCCW, (págs. 221-228). Budapest.
- [4] Bhowmik, H., & Amin, R. (2017). Efficiency improvement of flat plate solar collector using reflector. *Energy Reports*, 119-123.
- [5] Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- [6] S. Soulayman. (2017). Comments on solar aimuth angle. Higher Institute for Applied Sciences and Technology, Damascus, Syria. Elsevier Ltd. 0960-1481.
- [7] Lambda Research Corporation. (2017) TracePro User's Manual. Edición 7.8.
- [8] Ekadewi A., H., & Gjatmiko Ichsani, P. (2013). The Optical tilt angle of a solar collector. *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application* (págs. 166 - 175). Energy Procedia.