

Análisis dinámico de la inclinación de colectores solares de placa plana y tubos evacuados para determinar el potencial energético-económico en las ciudades de Chihuahua y Durango

ESCOBEDO-BRETADO, Jorge†*, RÍOS-OROZCO, Carlos', NAJERA-TREJO, Mario y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. - Departamento de Ingeniería sustentable. CIMAV 110. Ejido Arroyo Seco 34147 Durango, Dgo. México.

'Instituto Tecnológico de Durango, Departamento de Metal-Mecánica. Felipe Pescador 1830, Nueva Vizcaya, 34080, Durango, Dgo. México.

Recibido 7 de Abril, 2017; Aceptado 5 de Junio, 2017

Resumen

El objetivo es determinar el ángulo óptimo de inclinación de colectores solares para la máxima captación de energía solar térmica mensual y anual en las ciudades de Chihuahua y Durango. A través de simulación dinámica en TRNSYS, se analiza el calentamiento de agua con colectores solares disponibles comercialmente de placa plana y tubos evacuados variando su inclinación de 0 a 90°. Se obtiene la energía acumulada mensual y anual y se presentan los ángulos óptimos de mayor generación de energía útil. Se obtiene el costo de la energía térmica ganada por los colectores comparada con haber sido obtenida con gas LP y electricidad. Uno de los resultados obtenidos fue el ángulo óptimo anual de inclinación de colectores de tubos evacuados para Durango que es de 6°, con un calor útil acumulado de 9,850 MJ, lo cual equivale a un costo estimado durante la vida útil del colector (20 años) de \$ 96,004. Se presenta un análisis económico para determinar el retorno de la inversión de la instalación de cada tipo de colector. El trabajo contribuye al conocimiento del potencial energético-económico basado en los ángulos óptimos anual y mensuales para aplicaciones y perfiles de carga específicos a lo largo del año.

Colectores solares, inclinación óptima, simulación dinámica, análisis económico

Abstract

The objective is to determine the optimal angle of inclination of solar collectors for the maximum monthly and annual solar thermal energy capture in the cities of Chihuahua and Durango. Through dynamic simulation in TRNSYS, water heating is analyzed with commercially available flat plate and evacuated tubes solar collectors varying their inclination from 0 to 90°. Monthly and annual accumulated energy is obtained and the optimal angles of higher useful energy generation are presented. We obtain the cost of the thermal energy gained by the collectors compared to having been obtained with LP gas and electricity. One of the results obtained was the optimum annual angle of inclination of evacuated tube collectors for Durango which is 6°, with accumulated useful heat of 9,850 MJ, which is equivalent to an estimated cost during the life of the collector (20 years) of \$ 96,004. An economic analysis is presented to determine the return on investment of the installation of each type of solar collector. The work contributes to the knowledge of the energy-economic potential based on the optimum annual and monthly angles for specific applications and load profiles throughout the year.

Solar collectors, optimum tilt, dynamic simulation, economic analysis

Citación: ESCOBEDO-BRETADO, Jorge, RÍOS-OROZCO, Carlos, NAJERA-TREJO, Mario y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio. Análisis dinámico de la inclinación de colectores solares de placa plana y tubos evacuados para determinar el potencial energético-económico en las ciudades de Chihuahua y Durango. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-2:24-33

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jorge.escobedo@cimav.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Captar la mayor cantidad posible de energía solar a través de colectores solares de placa plana y de tubos evacuados se logra cuando la superficie de estas tecnologías es perpendicular a la radiación solar. Lograr que la perpendicularidad permanezca durante la trayectoria aparente del sol en el cielo puede lograrse mediante un sistema de seguimiento solar cuyo costo, en general, es relativamente alto. La mayoría de los colectores solares disponibles en México, actualmente no cuentan con sistemas de seguimiento, limitándose a tener un solo ángulo durante toda su vida útil. Estos colectores solares son utilizados por la mayoría de los usuarios domésticos e industriales a nivel nacional. Se utilizan para sustituir combustibles convencionales como Gas LP, gas natural y electricidad, principalmente para producir energía térmica. Sin embargo, los perfiles de consumo de los usuarios son variados a lo largo del año. Existen usuarios que su necesidad energética térmica más elevada puede ser en los meses de invierno como el calentamiento de agua sanitaria para hoteles, hospitales y albergues, o como fluidos de trabajo para calentar espacios como invernaderos o naves industriales. Por otra parte, existen usuarios cuya necesidad de energía térmica más elevada puede ser en verano, como en sistemas de refrigeración por absorción. Y existen usuarios que utilizan un perfil de carga térmica constante a lo largo del año. Para cada caso particular se debe diseñar un campo de colectores solares con la inclinación óptima. Actualmente la única medida que se toma para determinar el ángulo de inclinación de un colector solar es dotándolo del mismo ángulo que la latitud de lugar por ejemplo $\approx 24^\circ$ para el caso de la ciudad capital del estado de Durango y de $\approx 28^\circ$ para el caso de la ciudad capital del estado de Chihuahua.

El estudio para analizar el comportamiento de la captación de energía térmica solar por medio de colectores solares para diferentes ángulos de inclinación se basa en la plataforma computacional del software TRNSYS. Este software puede mostrar diferentes escenarios para poder comparar el comportamiento de las diferentes configuraciones y dimensiones de tecnología para aprovechamiento de energía solar con un error menor del 5% (Almeida P, et al., 2014).

El trabajo contribuye al conocimiento del potencial energético-económico basado en los ángulos óptimos anual y mensuales para aplicaciones y perfiles de carga específicos a lo largo del año.

Geometría solar

Para el análisis de inclinaciones de superficies sobre el planeta, se deben tomar en cuenta los ángulos de incidencia de la luz solar sobre la superficie terrestre. La Figura 1 muestra la inclinación del eje polar con respecto a la normal al plano elíptico (23.45°), conocido como "ángulo de declinación δ " (Kalogirou, 2009).

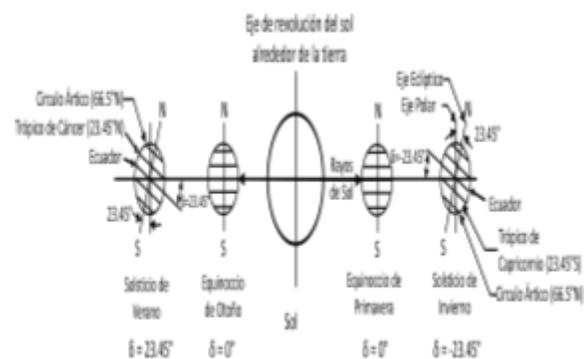


Figura 9 Ángulos de declinación por estaciones de año (Kalogirou, 2009)

Además, se debe tener en cuenta la posición relativa del sol respecto a un punto de referencia en la tierra para saber la posición en la que se debe colocar un colector solar. La Figura 2 muestra los ángulos astronómicos, altitud solar (α), acimut (z) y cenit (ϕ), que pueden describir completamente la posición del sol en cualquier instante sobre ese punto de referencia.

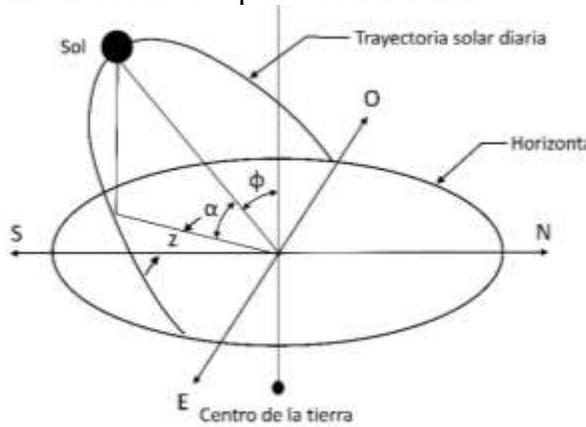


Figura 10 Trayectoria solar aparente a través del cielo desde el amanecer hasta el atardecer (Kalogirou, 2009).

En el hemisferio norte, los colectores solares se colocan orientados al sur con un ángulo azimutal de 0° , $z_s = 0^\circ$

En el presente trabajo se analiza el comportamiento de la energía anual captada cuando cambia la inclinación β del colector (Figura 3).

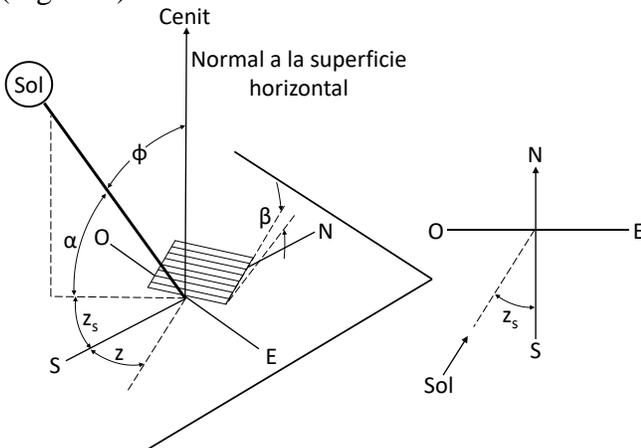


Figura 11 Descripción de ángulos con respecto a una superficie inclinada (Duffie y Beckman 1991)

Inclinación de colectores

Normalmente la posición de los colectores solares tiene una orientación hacia el sur, con un grado de inclinación β similar al de la latitud del lugar de instalación. En ese caso $\beta = \delta$.

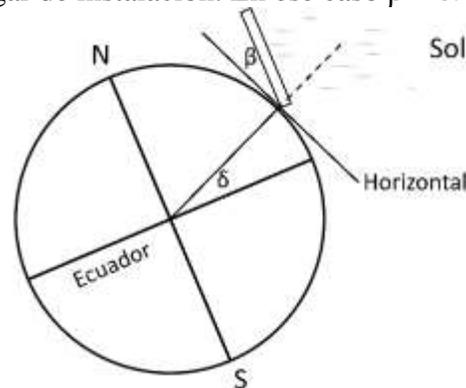


Figura 12 Relación geométrica entre un plano con cualquier orientación particular relativa a la Tierra (Paz, 2006).

Para el análisis de la captación de energía solar, cuando cambia el grado de inclinación, se utiliza la tecnología de colectores solares de placa plana y de tubos evacuados.

Colector solar de placa plana

El colector solar de placa plana que se utiliza corresponde a un modelo disponible comercialmente en México, pero con fabricación y prueba en Estados Unidos (Figura 5). Alcanza temperaturas de entre 30°C y 90°C dependiendo del modo de uso y de la localización geográfica del país en donde se instale.

Los componentes principales son los siguientes:

- Absorbedor de cobre con superficie selectiva BLACK, BLUE o de aluminio con superficie selectiva color negro
- Vidrio templado solar prismático

- Aislamiento de poliuretano y lana mineral

Este colector tiene la certificación europea UNE-12975, Solar Keymark y la certificación estadounidense Solar Rating & Certification Corporation (SRCC, por sus siglas en Inglés).



Figura 13 Colector solar de placa plana MS 2.4

El colector cuenta con un área total de 2.506 m². La tasa de flujo de prueba del colector fue de 0.0215 kg/s·m². La curva de eficiencia térmica se representa por la siguiente ecuación:

$$\eta = 0.697 - 3.14480 \frac{P}{G} - 0.01650 \frac{P^2}{G} \quad (1)$$

Donde η es la eficiencia térmica del colector, P es la diferencia entre la temperatura del agua de entrada (T_i) y la temperatura del aire ambiente (T_a) y G es la radiación solar incidente sobre el colector solar. Los coeficientes numéricos fueron obtenidos por medio de experimentación.

Colector solar de tubos evacuados

En el caso del colector de tubos evacuados, se utiliza el modelo AP 30 (Figura 6), el cual cuenta con un área de 4.158 m². La tasa de flujo de prueba del colector fue de 0.02 kg/s·m².



Figura 14 Colector solar de tubos evacuados AP30

La curva de eficiencia térmica se representa por la siguiente ecuación:

$$\eta = 0.456 - 1.35090 \frac{P}{G} - 0.00380 \frac{P^2}{G} \quad (2)$$

Ciudades de estudio

Se han elegido las ciudades capitales de Chihuahua y Durango debido a la alta velocidad de la instalación de tecnología de colectores solares de placa plana y de tubos evacuados. También se eligieron por su alta incidencia de radiación solar, llegando a tener valores superiores a los 1,100 W/m² durante algunos minutos (Estación meteorológica propia). Finalmente se eligieron por tener como prioridad utilizar energías renovables, como la solar, en sus planes estatales de desarrollo para aplicaciones domésticas e industriales.

Los datos climáticos utilizados en la simulación para la ciudad de Chihuahua se obtuvieron de bases de datos de un año típico meteorológico (TMY por sus siglas en Inglés), desarrollada por la National Renewable Energy Laboratory y que viene incluidas en la librería del software de simulación.

Los datos climáticos correspondientes a la ciudad de Durango, son tomados de un TMY desarrollado por el software Meteonorm, a partir de 7,000 estaciones meteorológicas disponibles alrededor del mundo y de métodos matemáticos de interpolación (Meteonorm V7.1)(Ruslan Botpaev, et al., 2008).

El software de simulación es capaz de leer archivos TMY en intervalos regulares de tiempo y los pone a disposición para otros componentes con un paso de simulación menor a una hora si así se desea.

Objetivo

El objetivo es determinar el ángulo óptimo de inclinación de colectores solares para la máxima captación de energía solar térmica mensual y anual en las ciudades de Chihuahua y Durango.

Metodología

Se desarrolló un modelo de un sistema solar térmico para analizar el comportamiento de la inclinación de colectores solares de placa plana y tubos evacuados en las ciudades capitales de Chihuahua y Durango.

La simulación se desarrolla con las variables ambientales representativas de ambas ciudades y se hacen cálculos cada 15 minutos (paso).

Se colocan los colectores solares orientados al sur y se hace una simulación por cada grado de inclinación desde 0° a 90° en intervalos de uno, obteniendo la energía total integrada en kJ cuando el colector opera durante un año.

Se obtienen resultados anuales y mensuales y se obtienen los ángulos óptimos correspondientes.

Simulación propuesta

Se utiliza el software de simulación TRNSYS, que provee un ambiente de simulación por medio de módulos (Types) que representan a los colectores solares, una bomba y el generador de clima principalmente. También cuenta con módulos periféricos que ayudan al desarrollo de la simulación como controladores, calculadoras, integradoras, graficadores e impresoras (Figura 7).

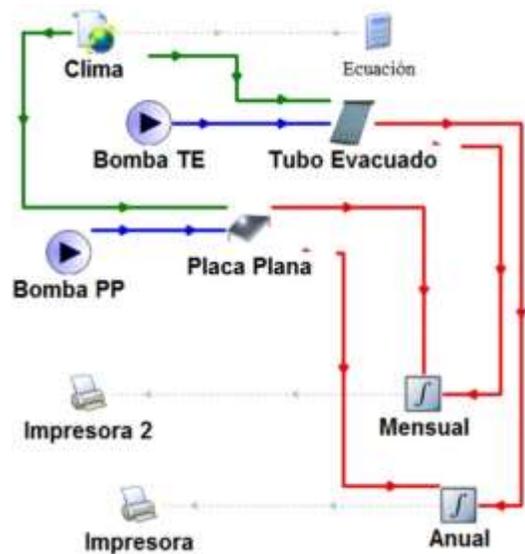


Figura 15 Modelo de simulación en TRNSYS de colectores solares

Análisis paramétrico

La simulación contiene las variables ciudades y ángulos que se describen en la Tabla 1:

Variable	Cantidad	Descripción
Ciudades	2	Chihuahua y Durango
Ángulos	91	0,1,2,3,...90

Tabla 1 Variables de la simulación

Se obtendrán 182 resultados anuales y 2,184 resultados mensuales

Resultados

En esta sección se muestran los resultados del análisis de la captación de energía solar térmica integrada anual y mensualmente, por los colectores solares de placa plana y de tubos evacuados, cuando cambia su inclinación. Se divide el análisis de los resultados por ciudades.

Comportamiento de colectores en Chihuahua

La Gráfica 1, muestra el comportamiento de la energía captada, durante un año, por el colector solar de placa plana cuando se incrementa el grado de inclinación. Se muestra que, sin inclinación, es decir, cero grados, se obtiene un valor mayor a los 11,000 MJ. Se observa una tendencia de aumento de captación de energía conforme aumenta el grado de inclinación hasta un máximo de 13,000 MJ con un grado de inclinación de 29°. Cuando aumenta el grado de inclinación, la energía captada por el colector decrece hasta valores cercanos a los 6,500 MJ con un ángulo de 90°.

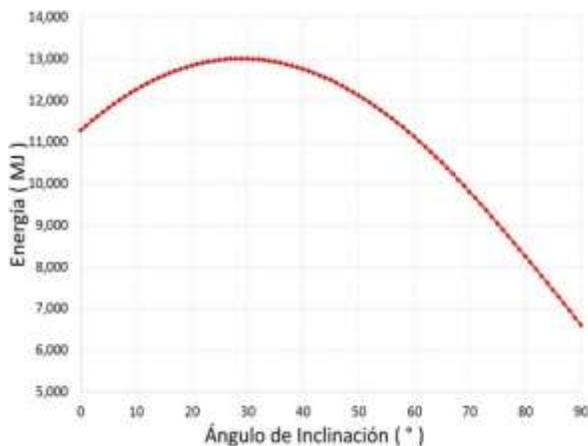


Gráfico 2 Energía anual acumulada para cada grado de inclinación del colector de placa plana para Chihuahua.

Si la energía térmica de la Gráfica 1 fuese obtenida por combustibles convencionales como gas licuado de petróleo (LP) o mediante electricidad, se obtiene el comportamiento mostrado en la Gráfica 2

Para obtener la energía térmica por medio de Gas LP, se sabe que: La eficiencia promedio de una caldera es del orden del 80 %, la capacidad calorífica es de 47.07 MJ/kg, y que el precio del kilogramo de Gas LP es de \$ 16.43.

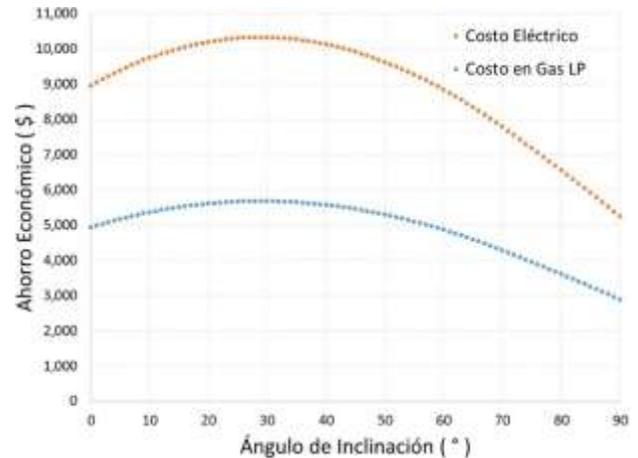


Gráfico 3 Costo de la energía obtenida por el colector de placa plana para Chihuahua

Para obtener la energía térmica por medios eléctricos, se considera un sistema de calentamiento a través de resistencias eléctricas con una eficiencia del 100 % y el precio del kWh es de \$ 2.859, la cual es una tarifa industrial (CFE, 2016).

Para el ángulo óptimo de 29° con 13,000 MJ colectados, con gas LP se ahorraría \$5,680 y con electricidad se ahorraría \$10,325.

El comportamiento del colector de tubos evacuados es similar que el de placa plana.

En la Gráfica 3, se presentan los ángulos óptimos de los colectores de placa plana y tubos evacuados para cada mes para la ciudad de Chihuahua. Es decir, es el ángulo donde se obtiene la mayor energía durante ese periodo.

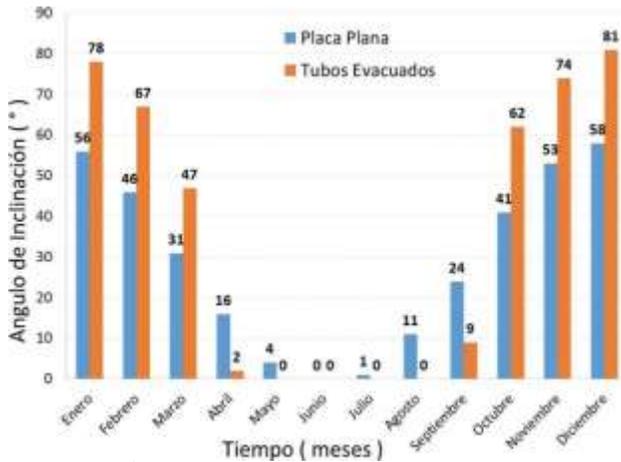


Gráfico 4 Ángulos óptimos para cada mes en la ciudad de Chihuahua

Comportamiento de colectores en Durango

La Gráfica 4, muestra el comportamiento de la energía captada, durante un año, por el colector solar de placa plana cuando se incrementa el grado de inclinación.

Se muestra que, sin inclinación, es decir, cero grados, se obtiene un valor alrededor de 10,000 MJ. Se observa una tendencia de aumento de captación de energía conforme aumenta el grado de inclinación hasta un máximo de 11,163 MJ con un grado de inclinación de 25°.

Cuando aumenta el grado de inclinación, la energía captada por el colector decrece hasta valores cercanos a los 5,500 MJ con un ángulo de 90°.

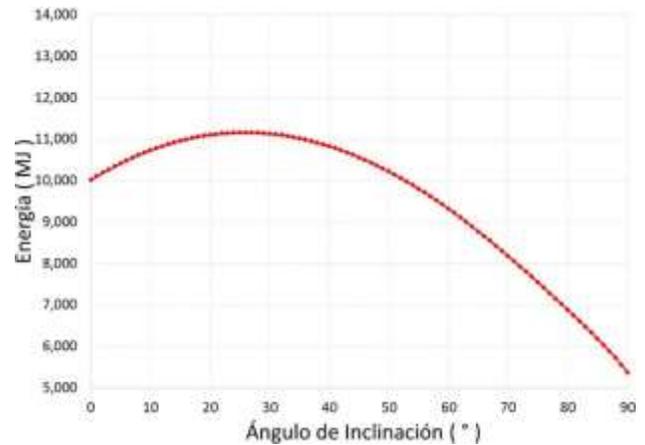


Gráfico 5 Energía anual acumulada para cada grado de inclinación del colector de placa plana para Durango

Si la energía térmica de la Gráfica 4 fuese obtenida por los combustibles convencionales antes mencionados, se obtiene el comportamiento mostrado en la Gráfica 5.

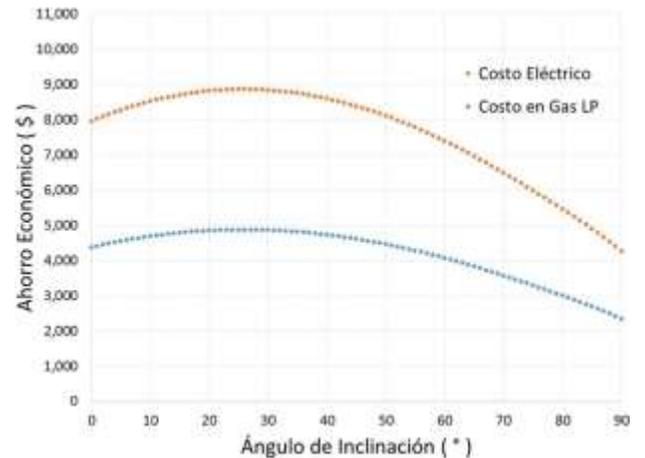


Gráfico 6 Costo de la energía obtenida por el colector de placa plana para Durango

Para el ángulo óptimo de 25° con 11,163 MJ colectados, con gas LP se ahorraría \$4,878 y con electricidad se ahorraría \$8,866.

El comportamiento del colector de tubos evacuados en la ciudad de Durango, es semejante al de placa plana en el mismo lugar.

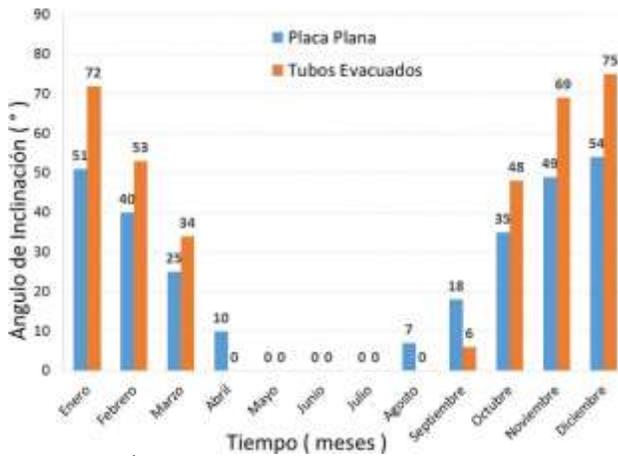


Gráfico 7 Ángulos óptimos para cada mes en la ciudad de Durango

Finalmente, en la Gráfica 6, se presentan los ángulos óptimos de los colectores de placa plana y tubos evacuados para cada mes para la ciudad de Durango.

Se muestra que, para ambos colectores solares, durante los meses de mayo a julio, el ángulo óptimo es de 0°.

Análisis económico

Este trabajo se basa en el potencial de aprovechamiento de la energía solar térmica para posibles aplicaciones industriales. Actualmente no se tiene un perfil de consumo definido y al análisis económico se da un enfoque hacia un posible ahorro.

Dentro de este análisis económico se toma en cuenta el ahorro de un proyecto donde se utiliza un colector solar durante su vida útil. Este estudio se realiza obteniendo el ahorro llevado al valor presente.

Se toma en cuenta la tasa de interés (*i*) del 5%, en aumento anual de los combustibles (*G*) del 10%, el ahorro de la energía del primer año (*PC*), y la vida útil de los equipos (*n*) de 20 años, por medio de la siguiente expresión matemática.

$$GPWF = PC \cdot \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right] + PC \cdot G \cdot \frac{1}{i} \cdot \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} - \frac{n}{(1+i)^n} \right] \quad (3)$$

En la Tabla 2 se muestran los resultados más importantes de los posibles ahorros cuando se utilizan dos tipos de colectores solares, dos ciudades, y dos tipos de combustibles.

Características	Ahorro del proyecto @ 20 años
Chihuahua - Gas – Placa Plana	126,727
Chihuahua - Eléctrico – Placa Plana	230,362
Durango - Gas - Placa Plana	108,833
Durango - Eléctrico - Placa Plana	197,810
Chihuahua - Gas - TE	109,391
Chihuahua - Eléctrico - TE	198,814
Durango - Gas - TE	96,004
Durango - Eléctrico - TE	174,495

Tabla 2 Ahorros acumulados en la vida útil del proyecto

Conclusiones

Se determinó el ángulo óptimo de inclinación de colectores solares para la máxima captación de energía solar térmica mensual y anual en las ciudades de Chihuahua y Durango.

Para colectores solares de placa plana en Chihuahua, el ángulo óptimo es de 29°

Para colectores solares de tubos evacuados en Chihuahua, el ángulo óptimo es de 11°

Para colectores solares de placa plana en Durango, el ángulo óptimo es de 25°

Para colectores solares de tubos evacuados en Durango, el ángulo óptimo es de 6°

Los ángulos óptimos para cada mes pueden tener variaciones hasta de 81° , como es el caso del colector solar de tubos evacuados cuando opera en Chihuahua.

En general, los colectores solares pueden ser pagados, con los ahorros, en un periodo de alrededor de 2 años.

Recomendaciones

Se recomienda profundizar en el análisis de colectores de tubos evacuados debido a que son los más utilizados en la industria.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del:

Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), A través del Proyecto:

P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora”

Pertenciente a la Convocatoria 2013-02, del:

Fondo SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA.

Para el desarrollo y presentación de éste trabajo.

Referencias

Almeida P., Carvalho M.J., Amorim R., Mendes J.F., Lopes V. (2014). Dynamic testing of systems – Use of TRNSYS as an approach for parameter identification. *Solar Energy*, 104, 60-70.

Carrillo-Rivas J. Y. (2016). Determinación de la Rentabilidad Anual de Colectores Solares de Tubos Evacuados en la Ciudad de Durango. Tesis de Licenciatura, 68.

Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2016). Consulta. 2016, Sitio web: <http://www.cfe.gob.mx/paginas/home.aspx>

Gobierno del estado de Chihuahua. (2017). Plan estatal de desarrollo 2017-2021. 30/07/2017, de Gobierno del estado de Chihuahua Sitio web: <http://congresochihuahua.gob.mx/biblioteca/iniciativas/archivosIniciativas/6266.pdf>

Gobierno del estado de Durango. (2016). Plan estatal de desarrollo 2016-2022. Gobierno del estado de Durango, 212.

Duffie J.A, Beckman W.A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York.: Wiley

Escobedo-Bretado, Jorge. A., Martín-Domínguez, Ignacio R. (2016). Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema Termosolar-Gas L.P. requerido para su suministro óptimo. *Aplicaciones de la Ingeniería*, 3, 9.

Hernández-Flores, L. M. (2016). Simulación dinámica en TRNSYS de colectores solares de Placa Plana para determinar la inclinación óptima de mayor rentabilidad para la Ciudad de Durango. Tesis de Licenciatura, 67.

Kalogirou, S. A. (2009). *Solar energy engineering: processes and systems*. 1st Ed. Annual motion of the earth about the sun.

Módulo Solar. (2016). Catálogo de colectores solares. 30/07/2017, de Módulo solar Sitio web: <http://www.modulosolar.com.mx/MAXOL/InformacionTecnica.php>

Paz Gutiérrez J.C. (2006). Colectores solares planos tratamiento teórico. Tesis doctoral, 116.

Ruslan Botpaev, Alaibek Obozov, Janybek Orozaliev, Christian Budig, Klaus Vajen. (2008). Comparison of meteorological data from different sources for Bishkek city, Kyrgyzstan. Proc. EuroSun 2008, Lisbon (PT), 7. - 10.10.2008, 7.

Solar Rating and Certification Corporation. (2016). Ficha técnica. 2016, de SRCC Sitio web: <https://secure.solar-rating.org/Certification/Ratings/RatingsSummaryPage.aspx?type=1>

Solar Rating and Certification Corporation. (2016). Ficha técnica. 2016, de SRCC Sitio web: <https://secure.solar-rating.org/Certification/Ratings/RatingsReport.aspx?device=1230&units=METRICS>

Transient System Simulation Program (TRNSYS). (2005). Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison. 1500 Engineering Drive, 1303 Engineering Research Building. Madison, WI 53706 – U.S.A.