



ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR PARA UNA ALBERCA SEMI-OLÍMPICA EN LA CIUDAD DE DURANGO, MEDIANTE SIMULACIÓN DINÁMICA EN TRNSYS

***Escobedo-Bretado, J.A.; Nájera-Trejo, M.; Martín-Domínguez, I.R.**

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. - Unidad Durango (CIMAV-Dgo)
Victoria 147 Norte. Zona Centro Histórico. 34000 Durango, Dgo.

*jorge.escobedo@cimav.edu.mx

RESUMEN

Se presentan resultados del diseño, simulación y optimización del sistema solar para el calentamiento de agua de una alberca semi-olímpica en la ciudad de Durango.

El sistema analizado consta de la alberca, campo de colectores de tubos evacuados y un calentador auxiliar a gas, y se encuentra ya instalado y funcionando en una institución de educación superior local. En este trabajo se simula y analiza el estado actual del sistema, y se procede a realizar la optimización termo-económica del mismo, para determinar si se puede tener un mejor arreglo que el que actualmente se tiene.

El sistema se simula en la plataforma computacional TRNSYS (Transient System Simulation Program), se utilizan las condiciones climáticas de la ciudad de Durango y se analiza el funcionamiento continuo del sistema durante un año típico de operación. Se considera que la alberca está sombreada mediante una estructura metálica, pero no aislada del viento.

Se simulan y comparan tres posibles escenarios: 1) Con calentamiento de agua mediante el sistema convencional a gas LP, 2) Calentamiento con el sistema actual solar, 3) Calentamiento solar con respaldo de caldera a gas, optimizado para mayor economía anual.

El proceso de optimización se realiza mediante un análisis paramétrico del sistema, en el cual se varía el número de colectores utilizados y el consumo de gas requeridos para mantener la temperatura del agua en el valor deseado. Se consideran los periodos de utilización de la alberca ligados a la actividad docente de la institución. Se toman las características del equipo ya existente y la vida útil del sistema solar para determinar la rentabilidad actual y la optimizada.

ABSTRACT

This work presents the design, simulation and optimization of a solar water heating system for the conditioning of a semi-Olympic pool in the city of Durango.

The analysis considers the pool, a field of evacuated tube collectors and an auxiliary gas heater. The physical system has been already setup and tested in a local higher education institution. These conditions are simulated in TRNSYS (Transient System Simulation Program) and analyzed using the typical meteorological year of Durango in order to perform a thermal-economic optimization. It is considered that the pool is shaded by a metal structure, but not wind isolated.

Three possible scenarios are simulated and compared: 1) Conventional LPG water heating system 2) Current solar heating system, 3) Solar heating with auxiliary LPG backup optimized for highest annual economy.

The optimization process is accomplished by a parametric analysis system in which the number of collectors and gas consumption is variable to maintain the water temperature at the desired value. Periods of the swimming pool usage are also considered in the simulation depending on the teaching activity of the institution. The characteristics of the existing equipment and lifespan of the solar system are considered to determine the current profitability.

Palabras claves:

Simulación, Optimización, Calentamiento Solar, Alberca Semi-Olímpica, TRNSYS.

INTRODUCCIÓN

La energía solar térmica es una alternativa técnica y económicamente factible para el calentamiento de agua para albercas cuando se diseña de manera adecuada. Actualmente existen casos de fracaso porque su necesidad energética no fue suplida con la tecnología adecuada (Vijayaraghavan y Goswami, 2004) y resultaron no rentables. Para determinar una adecuada configuración de tecnología de aprovechamiento de energía solar debe determinarse el comportamiento de cada componente que constituye el sistema solar. Entender el comportamiento térmico de colectores solares permite desarrollar un diseño confiable dentro de un análisis por simulación (Bunea, et al., 2012). Determinar el diseño integral del sistema óptimo de ésta tecnología resulta complicado debido a la variación intrínseca de las variables ambientales como temperatura, humedad, radiación solar entre otras, además del perfil de carga en la demanda energética (Soulotis M. et al., 2009), debido a ello se hace necesario el uso de simulación. El software TRNSYS 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).

Objetivo

Crear un modelo de simulación de un arreglo de colectores solares ya instalado para el calentamiento solar con respaldo auxiliar de una alberca donde se analice el comportamiento térmico y económico.

METODOLOGÍA

Se desarrolló un modelo del sistema para calentamiento de agua solar de una alberca semi olímpica, utilizando el paquete de simulación de sistemas térmicos TRNSYS 17. Los componentes principales del sistema son:

- Arreglo de colectores solares de tubos evacuados con tubos de calor conectados en paralelo
- Alberca techada con un volumen de 680 m³ y un área superficial 400 m²
- Bomba para circular el agua entre la alberca y los colectores solares
- Sistema de control para el encendido y apagado de la bomba de recirculación, en base a la intensidad de radiación solar.
- Calentador de agua auxiliar, que utiliza gas L.P., para garantizar que el agua en la alberca se mantenga en 26°C mínimo.
- Una estructura para dar sombra a la alberca

En la figura 1 se muestra un esquema simplificado del sistema simulado.

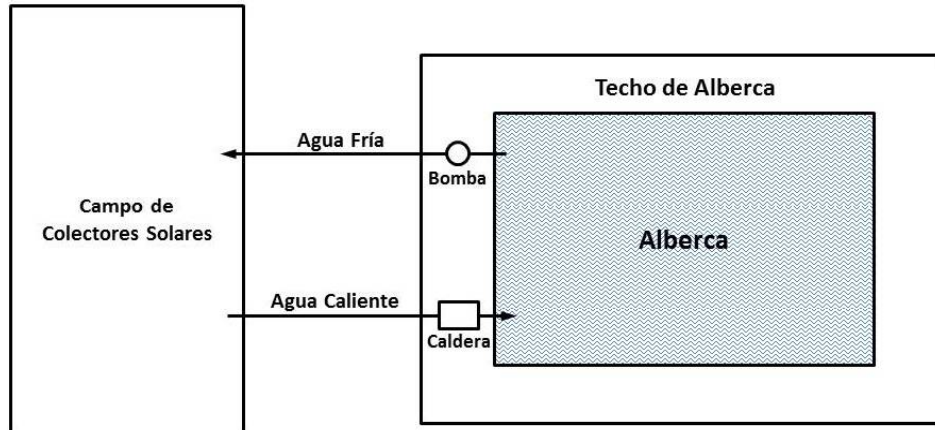


Figura 1. Esquema del calentamiento solar de agua con respaldo auxiliar para la alberca

Se realizaron corridas para sistemas compuestos desde 10 a 250 colectores con un intervalo de 10. La simulación se desarrolló para periodos de un año de operación del sistema, realizándose cálculos cada 15 minutos. Los flujos térmicos se integraron en el tiempo, para obtener valores diarios y anuales.

Los resultados obtenidos a través de un análisis son mostrados en forma de gráficas.

MODELOS TRNSYS UTILIZADOS

Alberca

La alberca se modela como un cuerpo de agua idealmente mezclado de modo que la primera ley de termodinámica se puede expresar como:

$$\frac{dH}{dt} = \sum (\dot{Q}_{Entrada} - \dot{Q}_{Salida}) \quad (1)$$

Dónde: dH / dt es el cambio de entalpía en el agua de la alberca en el tiempo, $Q_{Entrada}$ es el flujo de calor hacia el agua de la alberca y Q_{Salida} es el flujo de calor desde el agua de la alberca.

También puede suponerse que el líquido es incompresible y que la densidad y conductividad térmica son constantes. La ecuación 1 puede entonces expresarse como:

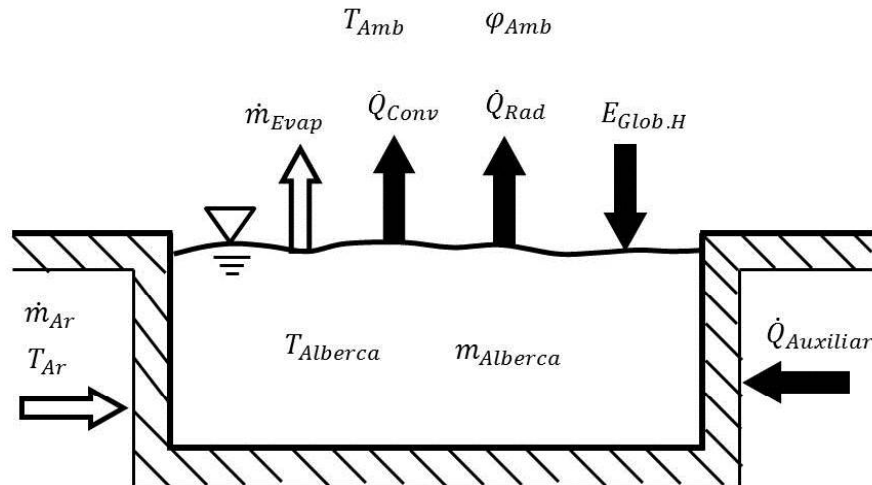
$$\rho_{Agua} \cdot C_{Pagua} \cdot V_{Alberca} \cdot \frac{dT}{dt} = \sum (\dot{Q}_{Entrada} - \dot{Q}_{Salida}) \quad (2)$$

Dónde: ρ_{Agua} es la densidad del agua, C_{Pagua} es el calor específico de agua, $V_{Alberca}$ es el volumen de la alberca.

En el modelo se considera que la alberca tiene una cantidad constante de agua. En la figura 2 se muestra un esquema indicando los flujos de calor y masa de la alberca.

El Análisis para el intercambio de calor entre la alberca y el entorno considera lo siguiente:

- Flujo de calor por evaporación
- Flujo de calor por convección
- Flujo de calor por radiación de onda corta
- Flujo de calor por radiación de onda larga
- Pérdida de calor por suministro de agua de reposición
- Flujo de calor auxiliar
- Flujo de calor por conducción térmica al suelo



- | | |
|--|--|
| $E_{Glob.H}$ = Radiación solar global horizontal | Q_{Rad} = Flujo de calor por radiación |
| $m_{Alberca}$ = Masa de agua de la alberca | $T_{Alberca}$ = Temperatura del agua de la alberca |
| m_{Ar} = Flujo másico de agua de reposición | T_{Amb} = Temperatura del aire ambiente |
| m_{Evap} = Flujo másico de agua evaporada | T_{Ar} = Temperatura del agua de reposición |
| $Q_{Auxiliar}$ = Flujo de calor auxiliar | ϕ = Humedad relativa del aire ambiente |
| Q_{Conv} = Flujo de calor por convección | |

Figura 2. Intercambio de calor y masa entre la alberca y el ambiente del modelo TRNSYS utilizado.

Bomba de Agua

La bomba arranca cuando la radiación solar es igual o mayor a 80 W/m^2 .

Colectores Solares

Se utilizó el modelo con curva de eficiencia térmica cuadrática. Los colectores solares planos a utilizarse corresponden a un modelo disponible comercialmente en México pero con fabricación y prueba en Estados Unidos. Los colectores están dotados de un área total de 4.397 m^2 cada uno. La tasa de flujo de prueba de cada colector fue de 5.28 L / min . La ecuación 3 describe el comportamiento de la eficiencia térmica del colector.

$$\eta = 0.437 - 0.9585 \left(\frac{T_i - T_{Amb}}{I} \right) - 0.0073 \left(\frac{(T_i - T_{Amb})^2}{I} \right) \quad (3)$$

Donde η es la eficiencia térmica del colector, T_i es la temperatura de agua de entrada al colector, T_{Amb} es la temperatura ambiente e I es la radiación solar incidente sobre el colector solar. Los datos se tomaron de la ficha técnica expedida por la Solar Rating & Certification Corporation (SRCC, 2015).

Calentador Auxiliar

El calentador auxiliar considerado en la simulación tiene una capacidad de calentamiento infinita, con el fin de determinar los consumos de energía requeridos en las diferentes condiciones analizadas en el trabajo. Se simula el calentamiento de la alberca sólo con el calentador auxiliar para mantener la temperatura del agua a 26°C y se compara con el consumo que se tiene cuando se incrementa el número de colectores solares.

Generador de Clima

Los datos climáticos correspondientes a la ciudad de Durango son generados por el modelo de Generador de Clima de TRNSYS. Este modelo tiene la capacidad de leer datos en intervalos regulares de tiempo a partir de un archivo de datos climáticos externo (TMY, año típico meteorológico). Este modelo interpola los datos (incluyendo la radiación solar para superficies inclinadas) y los pone a disposición para otros componentes de TRNSYS con un paso de simulación menor a una hora si así se desea.

Domo

El domo es la estructura que se utiliza para proporcionar sombra a la alberca y en la simulación es diseñada tal y como está construida en la institución educativa. El domo se modela con un programa complementario de TRNSYS llamado TRNBuild, el cual es capaz de generar edificaciones de cualquier forma, tamaño y material y muestra su comportamiento térmico.

SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Se simuló la operación del sistema durante periodos de un año, realizando cálculos cada 15 minutos (paso). Las condiciones climáticas son idénticas para cada corrida y corresponden a un año típico en la ciudad de Durango, Dgo.

Los resultados generados por TRNSYS se muestran gráficamente en pantalla con resolución de 15 minutos. Los diversos flujos térmicos calculados fueron integrados en periodos de un día y un año, para obtener resultados diarios y anuales.

RESULTADOS

Los resultados se presentan en graficas de temperaturas obtenidas del simulador y en graficas con datos procesados basados en un análisis paramétrico.

Comportamiento general a lo largo del año

La gráfica de la figura 3, muestra la temperatura de la alberca a lo largo del año para diferentes condiciones de estudio. El eje horizontal esta dado en meses comenzando el primero de enero y terminando el 31 de diciembre.

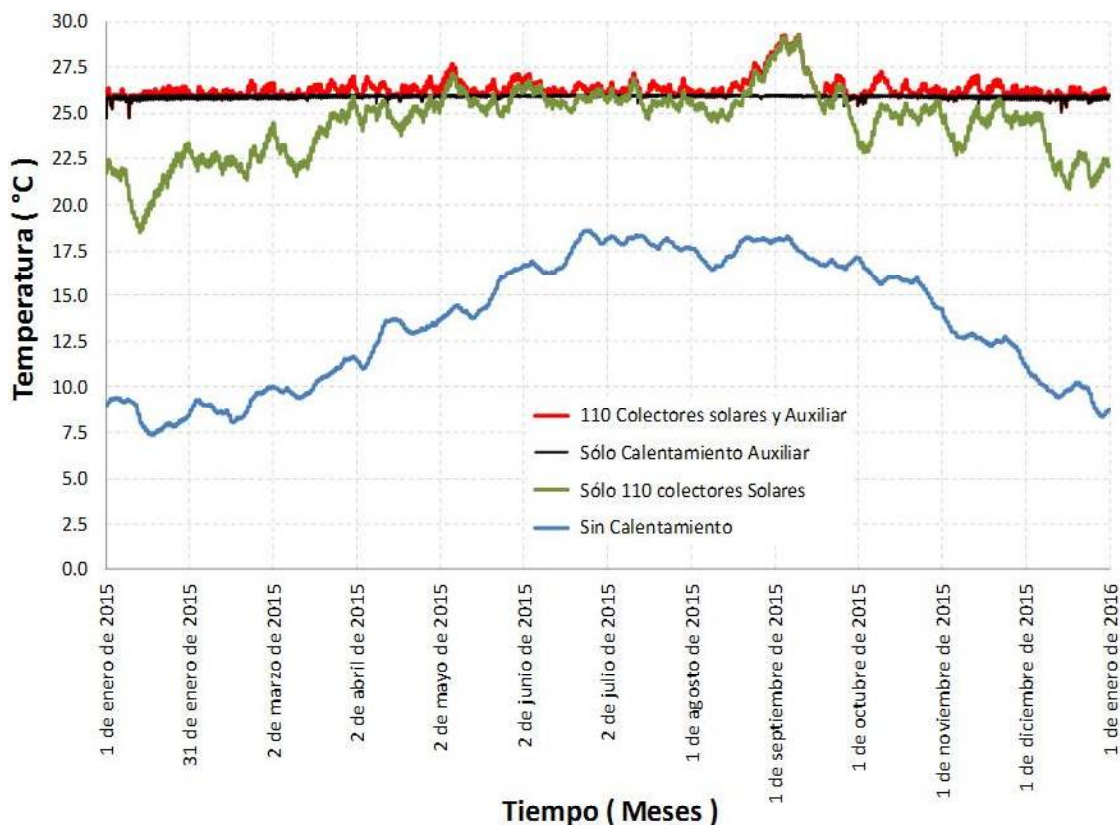


Figura 3. Comportamiento de la temperatura del agua de la alberca a lo largo del año con y sin calentamiento externo

La figura 3 se muestra cuatro escenarios:

La temperatura de la alberca sin calentamiento externo de cualquier tipo

Se observa que si no que se le agregue energía térmica de alguna fuente a la alberca, en invierno, se tiene una temperatura relativamente baja de alrededor de 7.5 °C y en verano se tiene una temperaturas relativamente alta, de alrededor de 18 °C.

Calentamiento de la alberca con 110 colectores solares (número de colectores para el mínimo tiempo de retorno de inversión)

Cuando se utilizan los 110 colectores solares, se observa que la temperatura de la alberca en enero, febrero y marzo no llega a la temperatura deseada de 26 °C, sin embargo, se mantiene a una temperatura de alrededor de 23 °C y presenta una disminución de temperatura a mediados de enero, llegando a 18.5°C. En los meses de abril a septiembre la temperatura es cercana a los 26°C, llegando, en ocasiones, a superar esa temperatura. Los meses de octubre y noviembre, en general, se mantienen a una temperatura de 25°C. La temperatura de la alberca en el mes de diciembre se mantiene 22.5°C.

Calentamiento de la alberca solamente con equipo auxiliar

Cuando la alberca es calentada por medio de un equipo auxiliar, la temperatura se mantiene en los 26°C todo el tiempo.

Calentamiento de la alberca con 110 colectores solares y equipo auxiliar

Cuando se utilizan los 110 colectores solares y el equipo auxiliar, la temperatura mínima de la alberca es de 26°C

Análisis económico

Consideraciones económicas

Las consideraciones que se tomaron para el análisis económico fueron las siguientes:

Los colector solar de tubos evacuados son marca Apricus AP-30 y su precio es de \$ 15,000

Incremento Costo = 10%

Número de Periodos = 20

Tasa de Interés = 5%

La figura 4 muestra el comportamiento del consumo de energía en el calentador auxiliar cuando no se utilizan colectores solares y cuando se pone y aumenta el número de colectores solares. Se observa que cuando no se utilizan colectores solares, el consumo de gas es total y en la gráfica se representa con una línea recta horizontal. Cuando se utilizan colectores solares se observa una clara tendencia a la reducción del uso de energía por el calentador auxiliar, de tal forma que cuando se utilizan 175 colectores o más, el comportamiento se vuelve asintótico a cero para el consumo energía por parte del calentador auxiliar.

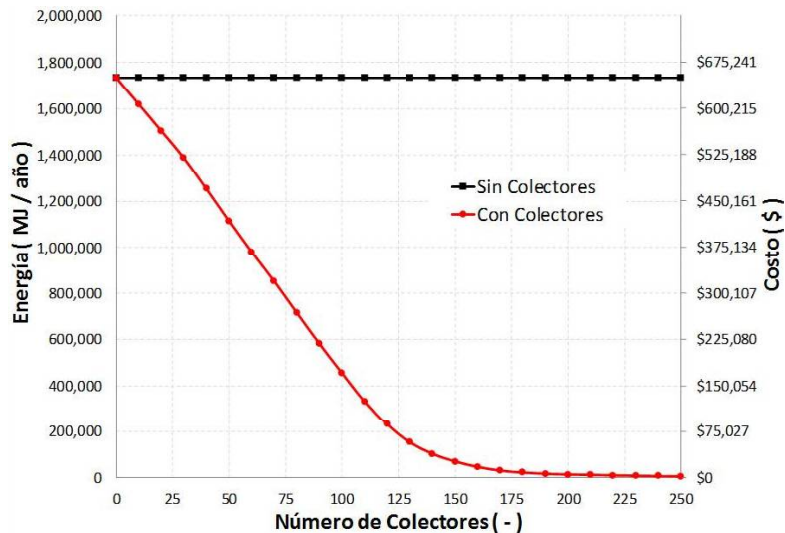


Figura 4. Comportamiento anual del consumo de energía cuando aumenta el número de colectores.

La figura 5 muestra el comportamiento de la fracción solar cuando aumenta el número de colectores utilizados. Se observa una tendencia lineal al utilizar de 1 a 120 colectores solares. A partir de 120 colectores se muestra una disminución en la velocidad de cambio hacia el aumento en la fracción solar. Y a partir de 175 colectores, se muestra una tendencia asintótica al 100% de la fracción solar.

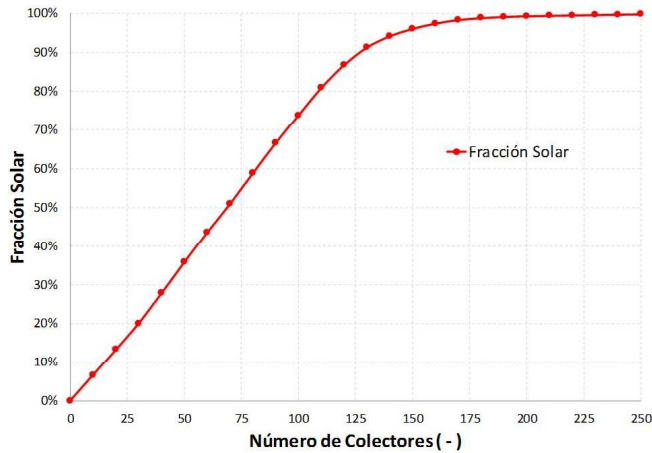


Figura 5. Fracción solar con respecto a número de colectores.

En la figura 6 se muestra el comportamiento del costo del proyecto a 20 años llevado a tiempo presente. El análisis incluye el costo de los colectores solares sumado al costo de operación. Se observa que en el punto mínimo o de menor costo del proyecto es cuando se utilizan 160 colectores con un costo del proyecto de \$ 2,793,733.

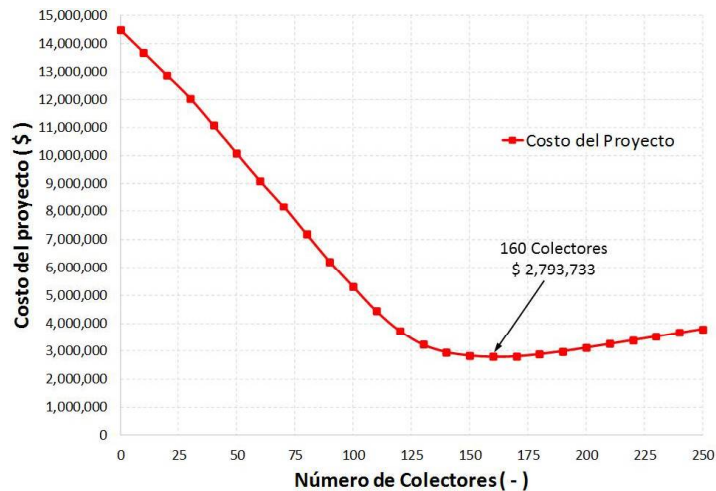


Figura 6. Costo del proyecto a 20 años a valor presente (Colectores Solares + Gastos de Operación).

Finalmente la figura 7 muestra el comportamiento del retorno de la inversión del proyecto cuando aumenta el número de colectores solares. Se muestra que el menor tiempo de retorno de la inversión es de 4.42 años correspondiente al uso de 110 colectores solares.

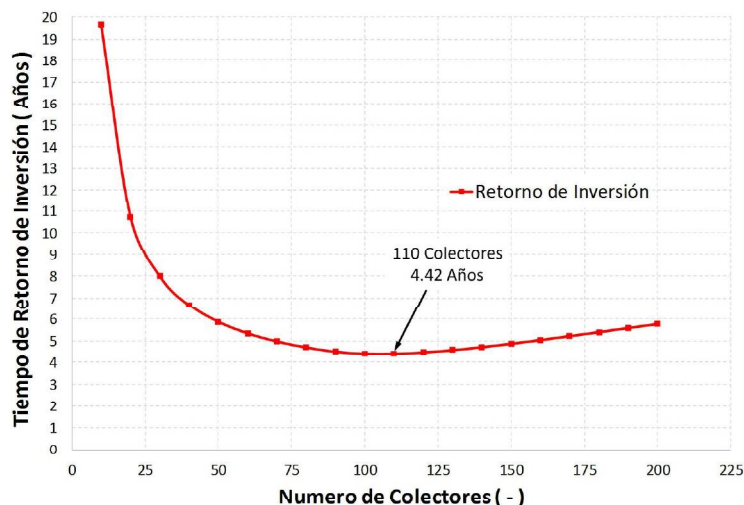


Figura 7. Comportamiento del retorno de la inversión para la instalación de colectores.

CONCLUSIONES

Se creó un modelo de simulación capaz de mostrar el comportamiento del calentamiento de agua de una alberca con un sistema de colectores solares y respaldo auxiliar a gas.

El análisis económico del costo del proyecto no es suficiente para la toma de decisiones para la instalación de colectores solares.

Es absolutamente necesario hacer un análisis de retorno de la inversión para la adecuada toma de decisiones en la implementación de sistemas de calentamiento solar para albercas

El menor tiempo de retorno de la inversión proporcionó una fracción solar de 82%.

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”

Perteneciente a la Convocatoria 2013-02, del:

Fondo SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA.

Para el desarrollo y presentación de éste trabajo.

Jorge Alberto Escobedo Bretado

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.

Souliotis M., Kalogirou S., Tripanagnostopoulos Y. (2009). Modelling of an ICS solar water heater using artificial neural networks and TRNSYS. *Renewable Energy* 34, 1333–1339

Solar Rating & Certification Corporation. (2015). Certified Solar Collector. Model AP-30 Certification # 2007033^a.

TRNSYS, A Transient System Simulation Program. (2015). Version 17.01.0028, Solar Energy Laboratory, Univ. Of Wisconsin-Madison.

Sanjay Vijayaraghavan and d. y. Goswami. (2004). *Solar Thermal Energy, Industrial Heat Applications*. University of Florida. Gainesville, Florida, United States. *Encyclopedia of Energy*, Volume 5.



Asociación Nacional de Energía Solar



UNACAR
Facultad de Ingeniería



XXXIX SEMANA NACIONAL DE ENERGIA SOLAR

A H K I M P E C H , C A P I T A L D E L S O L

“ENERGÍAS RENOVABLES PARA LA SUSTENTABILIDAD”

TE INVITAN A PARTICIPAR EN EL PROGRAMA CIENTÍFICO TÉCNICO CON EL TRILEMA:

“LA SEGURIDAD ENERGÉTICA, LA SEGURIDAD SOCIAL
Y LA MITIGACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL”

La Asociación Nacional de Energía Solar, invita a todos los interesados que trabajan temas relacionados con Energías Renovables, a participar en su programa técnico científico de la XXXIX Semana Nacional de Energía Solar, a celebrarse en:

CAMPECHE DEL 5 AL 9 DE OCTUBRE DE 2015

La forma de participar será con el envío de artículos referentes a trabajos de investigación y/o desarrollo tecnológico en temas de trascendencia para el fomento de las energías renovables.

BASES

El artículo deberá ser de actualidad e innovador relacionado con los siguientes temas:

- **Arquitectura Sostenible.**
 - Edificios Bioclimáticos.
 - Integración de Captadores.
 - Refrigeración Solar.
- **Tecnologías y Sistemas Térmicos Solares**
 - Captadores y Acumulación Térmica
 - Instalaciones Solares de Baja Temperatura
 - Solar Térmica de Alta Temperatura
 - Cocinas Solares, Secaderos, Destilación y Desinfección Solar.
- **Tecnología y Sistemas Fotovoltaicos**
 - Células y Módulos Fotovoltaicos
 - Sistemas Autónomos e Híbridos No-conectados a Red
 - Sistemas Conectados a Red
- **Recurso Solar**
- **Enseñanza de las Energías Renovables**
- **La Energía Solar en el Contexto Energético Global**

• Deberá ingresar a la página electrónica www.snes39anes.org registrarse y enviar su resumen de acuerdo a las características ahí mencionadas.

• De ser aceptado el trabajo, el autor y al menos un coautor deberán comprometerse a presentar el trabajo durante el congreso, así como cubrir la cuota respectiva antes del 11 de septiembre del 2015. De lo contrario serán excluidos del programa final.

• Toda la información sobre la forma en la que tiene que ser presentado el trabajo se encuentra en la página electrónica:

www.snes39anes.org

FECHAS IMPORTANTES

- Ene 28:** Publicación de convocatoria para la recepción de resúmenes.
- Feb 28:** Límite para recepción de resúmenes.
- Mar 15:** Notificación de aceptación o no aceptación de resúmenes recibidos.
- Jun 15:** Límite para recepción de trabajos en extenso.
- Jul 15:** Notificación de aceptación de trabajos en extenso
- Ago 15:** Fin de aceptación de trabajos en versión final
- Sep 11:** Límite para **registro y pago** a la XXXIX SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

CONFERENCIAS · CURSOS · EXPO SOLAR · CONCURSO DE PINTURA INFANTIL



Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste

