

## ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA SOLAR PARA UN COMEDOR INDUSTRIAL, MEDIANTE SIMULACIÓN EN TRNSYS

Jorge A. Escobedo-Bretado, Ignacio R. Martín-Domínguez\* y Maria T. Alarcón-Herrera

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV)

Departamento de Medio Ambiente y Energía

Miguel de Cervantes 120. Complejo Industrial Chihuahua. 31109 Chihuahua, Chih. México.

\* (614) 439-1148 [ignacio.martin@cimav.edu.mx](mailto:ignacio.martin@cimav.edu.mx)

### RESUMEN

Se presenta un análisis del funcionamiento térmico de un sistema de calentamiento de agua, consistente en varios colectores solares planos, interconectados entre si, un termo tanque vertical, bomba, calentador auxiliar y controlador de flujo.

El sistema se simula utilizando el paquete TRNSYS (Transient System Simulation Program), se utilizan las condiciones climáticas de la ciudad de Chihuahua y se analiza el funcionamiento continuo del sistema durante un año típico de operación.

Se realizan simulaciones variando:

- El número de colectores (4, 6 y 8)
- El consumo de agua caliente en la cocina (1000, 2000 y 3000 L/día @ 45°C)

En todos los casos se simula el suministro de calor auxiliar como infinito, para garantizar que el agua se suministre a la temperatura especificada de 45°C y poder así determinar el consumo de calor auxiliar requerido para satisfacer la demanda.

Se presenta el análisis paramétrico de lo anterior, y se discute la influencia de las variables analizadas sobre el consumo específico de calor auxiliar, y consecuentemente sobre la rentabilidad del sistema.

### ABSTRACT

An analysis of the thermal behavior of a water heating system is presented. The system consist of several solar flat collectors, interconnected to each other, a vertical thermo tank, a pump, an auxiliary heater and a flow controller.

The system is simulated using the TRNSYS package (Transient System Simulation Program), the climatic conditions of Chihuahua City are used and the continuous operation of the system is analyzed during a typical operation year.

Simulations were run varying:

- The number of collectors (4, 6 and 8)
- The hot water consumption (1000, 2000 and 3000 L/day)

The auxiliary heater is simulated of infinite capacity in all cases, to guarantee that the water is provided at the specified temperature of 45°C and to be able to determine the auxiliary heat consumption that is required to satisfy the demand.

The parametric analysis of the system is presented, and the influence of the variables analyzed on the specific consumption of auxiliary heat, and consequently on the yield of the system is discussed.

### Palabras clave

Calentamiento de agua solar, simulación en TRNSYS, diseño de sistemas térmicos, calor solar para proceso

### INTRODUCCIÓN

#### Antecedentes

En los comedores tipo industrial es necesario calentar el agua que se utiliza en la preparación de alimentos y en el lavado de la vajilla y los utensilios de cocina. La fuente energética comúnmente utilizada para calentar el agua es gas natural o L.P. La utilización de energía solar en sustitución de los combustibles fósiles es una opción que es técnicamente factible, pero que requiere de un dimensionamiento correcto para lograr un sistema que también sea factible económicamente.

Estudios muestran que, en sistemas solares industriales, se puede ahorrar hasta el 78% del consumo anual de energía convencional, y que este comportamiento se puede lograr con sistemas solares con una eficiencia de recolección de energía que puede llegar a ser de 56% (Nagaraju et al., 1999).

Por otra parte, se han estudiado arreglos para obtener no solo agua caliente con energía solar para algunas construcciones, sino para tratar de cubrir todos los servicios en lo que a energía se refiere (Bijou y Bernier, 2006).

### OBJETIVO DEL TRABAJO

En este trabajo se muestra la primera parte de un análisis técnico-económico del funcionamiento de un sistema solar para calentamiento de agua, tipo industrial.

El sistema analizado deberá proveer agua caliente a 45°C a un comedor industrial, en un horario de 7 a.m. a 17 p.m. diariamente durante todo el año.

El dimensionamiento básico del sistema fue obtenido utilizando el paquete F-Chart, para las condiciones climáticas de la ciudad de Chihuahua, y en el se determinó que se requería utilizar 6 colectores solares para cumplir con servicio de 2,000 L diarios de agua a 45°C. En este trabajo se analiza el diseño básico mediante una simulación del sistema utilizando el paquete TRNSYS, con el propósito de corroborar las predicciones de F-Chart y para realizar un análisis paramétrico del sistema que permita conocer la sensibilidad del diseño a variaciones en el diseño original.

## METODOLOGÍA

Se desarrolló un modelo del sistema para calentamiento de agua solar, utilizando el paquete de simulación de sistemas térmicos TRNSYS 16. Los componentes principales del sistema son:

- Arreglo de colectores solares planos en paralelo
- Termotanque vertical de 1000 L
- Bomba para circular el agua entre el termotanque y los colectores solares
- Sistema de control para el encendido y apagado de la bomba de recirculación, en base a la diferencia de temperaturas entre el tanque y los colectores.
- Calentador de agua auxiliar, que utiliza gas L.P., para garantizar que el agua que llega a la cocina tiene 45°C mínimo.

En la figura 1 se muestra un esquema del sistema simulado, y en la figura 2 se muestra su implementación en TRNSYS.

Se realizaron corridas para sistemas compuestos de 4, 6 y 8 colectores y para consumos de agua de 1000, 2000 y 3000 L/día.

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.

## MODELOS TRNSYS UTILIZADOS

Para la simulación del sistema de calentamiento solar se seleccionaron modelos matemáticos genéricos, disponibles en la librería de TRNSYS, adecuándolos a las características exactas de los equipos utilizados mediante la asignación de valores a los parámetros de diseño. Los dispositivos simulados fueron:

### *Tanque de almacenamiento térmico*

El termo tanque se simula utilizando el modelo de Tanque Estratificado de TRNSYS. El volumen total del tanque es 1 m<sup>3</sup>. Cuenta con dos entradas y dos salidas de agua. La entrada del agua fría de la red es por la parte inferior del tanque. El flujo proveniente de los colectores solares ingresa al termo tanque por su parte superior. La salida del agua caliente hacia el calentador auxiliar y la cocina ocurre por la parte superior. La salida hacia los colectores solares es por la parte inferior del tanque.

### *Bomba de Agua*

La bomba arranca cuando el sistema de control le indica que la temperatura del agua en los colectores solares alcanzó un valor pre-determinado de 10°C por arriba de la temperatura de la salida del termotanque. Cuando dicha diferencia se reduce a solo 2°C el controlador apaga la bomba.

### *Colectores Solares*

Se utilizó el modelo con curva de eficiencia térmica lineal. Los colectores solares planos a utilizarse corresponden a un modelo disponible comercialmente en México, dotados de un área de captación de 1.86 m<sup>2</sup> cada uno. La curva de eficiencia térmica proveída por el fabricante señala una ordenada al origen de 0.72 y una pendiente de -6.8 kJ/(h m<sup>2</sup> K). La tasa de flujo de prueba de los colectores fue de 2 L / min.

### *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 simulan dos calentadores auxiliares,

uno trabajando en serie con el termotanque, que provee solo el calor requerido para garantizar que la temperatura del agua sea de 45°C mínimo, y el segundo para calcular el consumo de energía requerido para calentar la totalidad del agua consumida. Esto con el fin de establecer la base de comparación de los ahorros producidos por el sistema solar.

### *Generador de Clima*

Los datos climáticos correspondientes a la ciudad de Chihuahua son generados por el modelo de Generador de Clima de TRNSYS, basándose en datos experimentales promedio de temperatura, irradiación solar, humedad relativa y altitud, y mediante modelos matemáticos. La obtención de la información climática requerida por el modelo de TRNSYS se analiza en otro trabajo (Martín-Domínguez y Hernández-Álvarez, 2002), en el cual se presentan los datos de cuatro ciudades del estado de Chihuahua.

### *Procesador de radiación*

Este modelo toma el dato de radiación total horizontal horaria producido por el Generador de Clima, y lo procesa para suministrarle a los colectores valores a cualquier fracción de tiempo, y para las superficies inclinadas de los colectores.

### *Carga*

Se considera que la carga o consumo de agua es constante desde las 7 a.m hasta las 5 p.m., y se simula mediante un modelo de "Función Forzada" de TRNSYS.

## 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 Chihuahua, Chih.

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.

La representación gráfica de los resultados horarios solo puede apreciarse si se restringe a cubrir unos cuantos días. Las figuras 3 y 4 muestran resultados horarios correspondientes a dos días de operación. Debido a la variabilidad climática diaria, aún los resultados integrados sobre un día de operación resultan complicados para su presentación y comparación si se utiliza como escala el año completo de operación, como se muestra en la curva oscilante de la figura 5. Por ello se procedió a ajustar una curva suave (polinomio de orden 4) a los resultados diarios, que representa el comportamiento promedio diario (curva suave en la figura 5), y que permite visualizar con mayor facilidad las diferencias entre varios conjuntos de resultados simultáneamente. Los resultados presentados en las figuras 6-11 son curvas ajustadas con polinomios de orden 4, y representan los promedios del comportamiento diario.

## RESULTADOS

### *Comportamiento horario*

En las figuras 3 y 4 se muestra el comportamiento del sistema solar durante dos días de operación, invierno en la figura 3 y verano en la figura 4. Puede observarse la variación de las condiciones climáticas en la temperatura ambiente (Tambiente) y la irradiación solar disponible. La temperatura del agua en los

colectores solares (ToCol) se iguala a la temperatura ambiente durante la noche, aumenta con la radiación solar y se reduce al iniciar la operación de la bomba. La temperatura del agua de suministro a la cafetería es mantenida a un mínimo de 45°C por el calentador auxiliar durante el periodo del día en que hay consumo de agua.

#### Efecto del número de colectores instalados

En las figuras 6, 7 y 8 se pueden observar las cantidades de calor que pueden colectarse en sistemas dotados de 4, 6 y 8 colectores solares, para consumos de agua de 1,000 L/día, 2,000 L/día y 3,000 L/día, respectivamente. Igualmente se muestran las cantidades diarias de calor auxiliar que se requiere suministrar para mantener la temperatura de suministro a un mínimo de 45°C.

Como puede observarse, aún en el caso de la mínima carga (1,000 L/día) y mayor número de colectores instalados (8) en la figura 6, se requiere suministrar calor auxiliar en el periodo invernal.

Debido a la variabilidad diaria de las condiciones climáticas y al hecho que si el agua del termotanque se calienta a temperaturas superiores a los 45°C en días con captación solar abundante, el exceso de temperatura constituye energía colectada y suministrada a la cafetería, pero no “descuenta” de la energía auxiliar suministrada en otros días con menor captación solar. Por ello el exceso de energía captado en verano no evita el consumo de calor auxiliar necesario en invierno.

#### Análisis económico

Para cuantificar el valor económico de los flujos de calor obtenidos se consideró que la capacidad calorífica del gas LP es 47.07 MJ/kg, su costo es de 9.03 \$/kg, y la eficiencia de operación del calentador auxiliar es 80%. El valor económico de los flujos de calor se muestra en los ejes situados en los márgenes derechos de las figuras 5 – 8, y en la Tabla 1 se muestran las cantidades resultantes anualizadas.

#### Resultados anuales

De los resultados mostrados en la Tabla 1 se puede observar que utilizando gas L.P., el costo de calentar 1,000 L de agua a 45°C resulta de \$25.12. Dependiendo del consumo diario de agua y del número de colectores instalados, para los casos aquí analizados el costo del calentamiento auxiliar puede variar entre \$0.81 y \$16.95, lo que representa ahorros de entre 96.8% a 32.5%, respectivamente. Esto se muestra en forma gráfica en las figuras 9 y 10. En la figura 9 se puede observar la fuerte dependencia de los ahorros logrados en consumo de combustible contra la demanda de agua que se le imponga al sistema. Es por ello evidente que se requieren conocer bien las condiciones de servicio a que va a estar sometido el sistema para que el diseño sea económicamente factible. La figura 10 muestra la misma información, pero graficada a demanda constante, para observar el comportamiento del ahorro contra el número de colectores instalado.

#### Caso base

Para el caso base analizado, que requiere un suministro de 2000 L/día de agua, se observa que un sistema dotado de 4 colectores origina un ahorro en costo de combustibles del 47.1%, con 6 colectores se llega a 68.3%, y con 8 colectores se llega a 80.9%. Esto representa un incremento de 21.2% al pasar de 4 a 6 colectores, y de 12.6% al pasar de 6 a 8 colectores.

## CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en este trabajo se muestra que para diseñar un sistema solar para calentamiento de agua se requiere contar con información detallada de:

- Clima del lugar
- Características técnicas del equipo a utilizar (colectores, tanques)
- Requerimientos precisos del servicio esperado (temperatura del agua, consumo, horarios de uso)
- Porcentaje del servicio que se desea cubrir con energía solar

Adicionalmente, la variabilidad natural de los parámetros que influyen en el comportamiento del sistema solar, tales como son la temperatura ambiente y la irradiación solar disponible, hacen necesaria la utilización de herramientas de cómputo especializadas para simular el comportamiento térmico de los sistemas sobre periodos extendidos de tiempo.

Con los resultados de las simulaciones aquí presentadas se muestra que el diseño básico del sistema solar, consistente en 6 colectores solares para suministrar 2,000 L/día de agua a 45°C alcanza un ahorro de combustible del 68.3%.

Se requiere continuar éste análisis para determinar cual es el diseño óptimo, en el cual el incremento en ahorro inducidos por la adición de más colectores llegue a ser igual o menor que el costo del colector adicional, por lo cual no se justifique su adición al sistema.

## REFERENCIAS

- Biaou, A.L. y Bernier, M.A. (2008). Achieving total domestic hot water production with renewable energy. Building and Environment. v.43, pp.651-660.
- Martín-Domínguez, I.R. y Hernández-Álvarez, R. (2002). Datos climáticos de cuatro ciudades del estado de Chihuahua, para la simulación de uso de energía en edificaciones utilizando el paquete TRNSYS. Memorias de la XXVI Semana Nacional de Energía Solar. ANES. ERE 01-49 pp.181-185. Nov. 11-15, 2002. Chetumal, Quintana Roo. México.
- Nagaraju, J.; Garud, S.S.; Ashok Kumar K. y Ramakrishna Rao, M. (1999). 1 MW<sub>th</sub> Industrial solar hot water system and its performance. Solar Energy. v.66, n.6, pp.491-497.

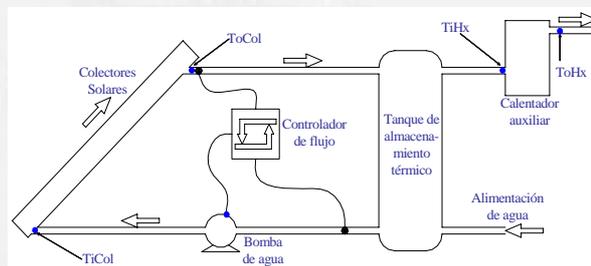


Figura 1. Esquema del sistema para calentamiento de agua

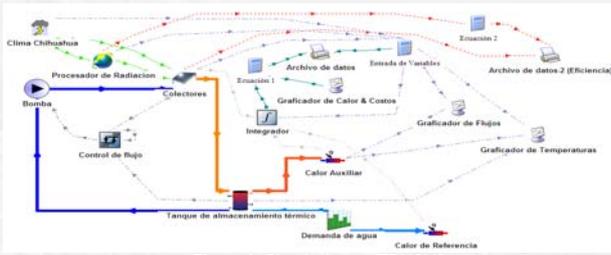


Figura 2. Simulación en TRNSYS

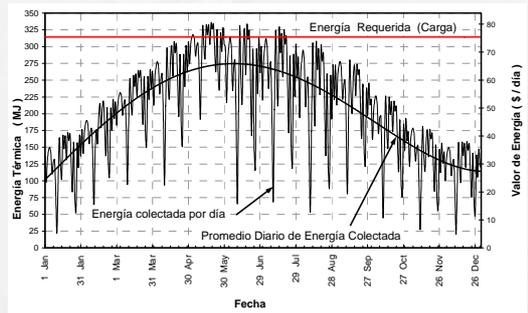


Fig. 5. Comportamiento diario real y curva de ajuste promedio diario

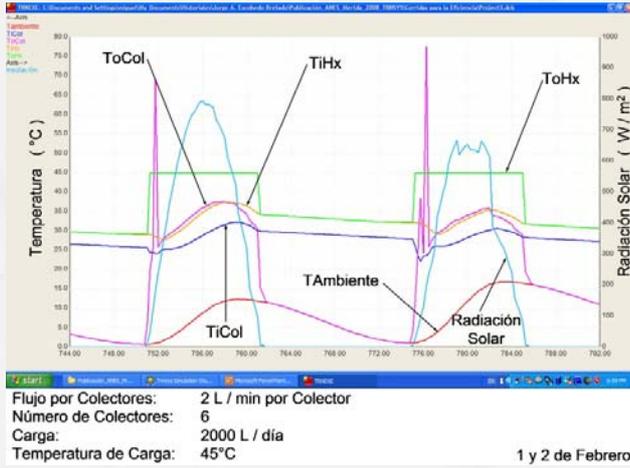


Figura 3. Simulación en invierno

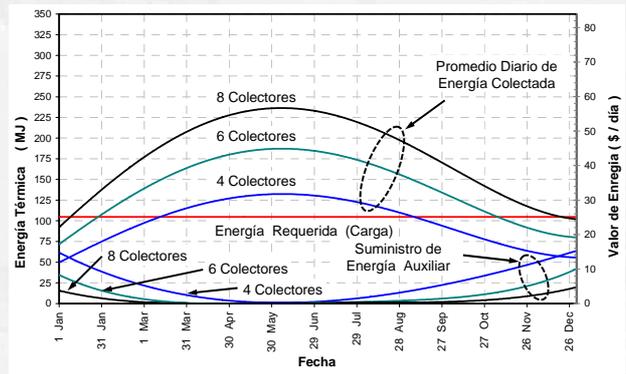


Fig. 6. Flujos térmicos para un consumo de 1000 L/día de agua

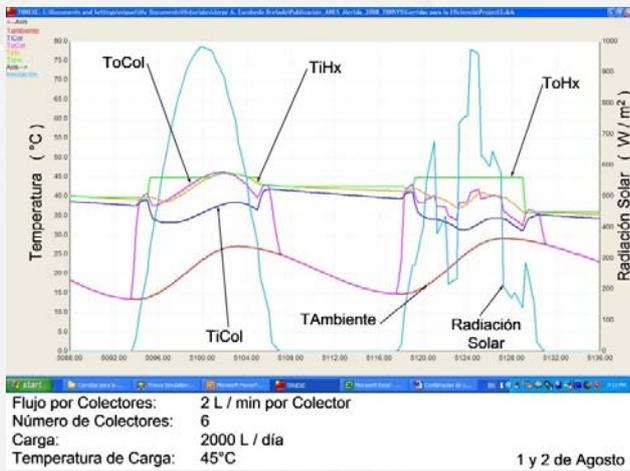


Figura 4. Simulación en verano

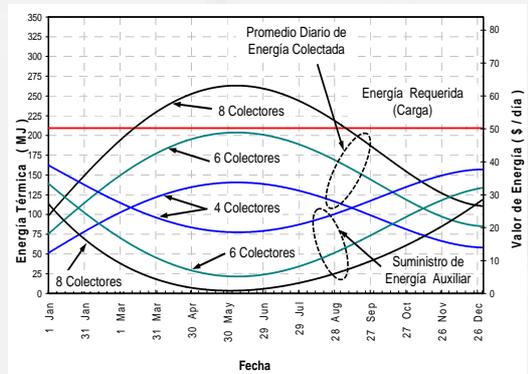


Fig. 7. Flujos térmicos para un consumo de 2000 L/día de agua

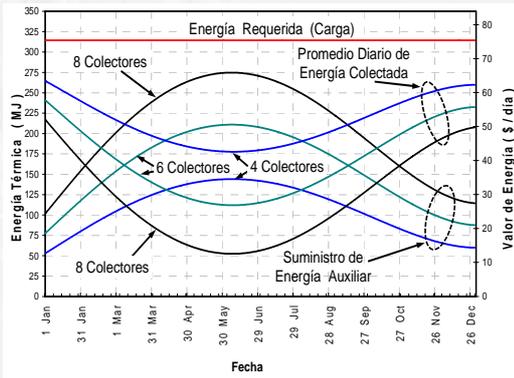


Fig. 8. Flujos térmicos para un consumo de 3,000 L/día de agua

Tabla 1. Valor económico y ahorros obtenibles

Num Col	Flujo Col L / (min col)	Carga (L / día)	Valor Calor Col (\$ / año)	Costo Aux Con Col (\$ / año)	Costo Aux Sin Col (\$ / año)	Costo Aux Con Col \$ / 1000 L	Costo Aux Sin Col \$ / 1000 L	Ahorro
4	2	1000	8,776.72	1,671.73	9,168.80	5.13	25.12	79.6%
4	2	2000	9,285.93	9,701.92	18,337.60	13.29	25.12	47.1%
4	2	3000	9,482.62	18,561.88	27,506.40	16.95	25.12	32.5%
6	2	1000	12,453.96	724.37	9,168.80	1.98	25.12	92.1%
6	2	2000	13,474.36	5,808.20	18,337.60	7.96	25.12	68.3%
6	2	3000	13,896.39	14,220.32	27,506.40	12.99	25.12	48.3%
8	2	1000	15,775.75	295.5	9,168.80	0.81	25.12	96.8%
8	2	2000	17,421.88	3,499.20	18,337.60	4.79	25.12	80.9%
8	2	3000	18,119.28	10,156.84	27,506.40	9.28	25.12	63.1%

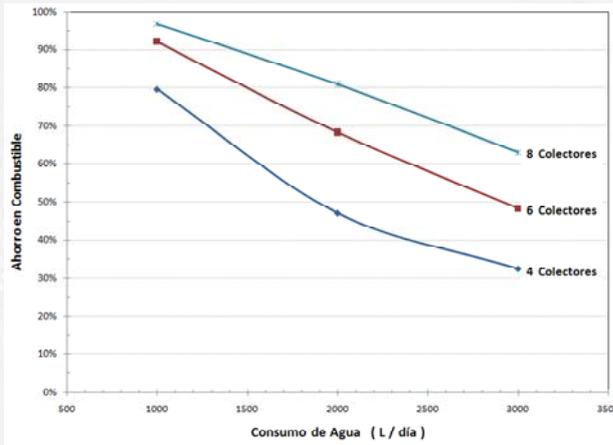


Figura 9. Comportamiento del ahorro obtenible vs. Consumo de agua.

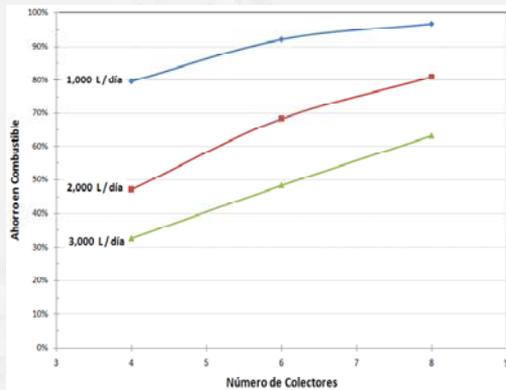


Figura 10. Comportamiento del ahorro obtenible vs. número de colectores instalados.



32<sup>a</sup> semana nacional de **energía**  
**SOLAR**



Mérida, Yucatán 20-24 Octubre 2008

# MEMORIA

