STS_048

Comportamiento de la eficiencia térmica de un arreglo de colectores solares planos, a lo largo del día y para diferentes días del año

Jorge A. Escobedo-Bretado; José A. Burciaga-Santos; Plinio E. Castro-López;
Ignacio R. Martín-Domínguez*; Ma. Teresa Alarcón-Herrera
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua.
31109 Chihuahua, Chih. México.
* (614) 439-1148 ignacio.martin@cimav.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo se muestra el comportamiento horario de la eficiencia térmica de un sistema de colectores solares, que suministran agua caliente a una cocina tipo industrial.

Se muestra y analiza el efecto de la variación del número de colectores solares utilizados, de la carga térmica demandada y de la época del año, sobre la eficiencia térmica del arreglo de colectores. Se hace el análisis del sistema mediante simulación en el paquete TRNSYS (Transient Systems Simulation Program), que permite simular también la variación horaria de la temperatura ambiente y de la irradiación solar.

Se muestra que la eficiencia térmica promedio anual de un arreglo de colectores solares planos puede variar ampliamente debido a que depende de varios factores, tales como: comportamiento térmico del modelo de colector utilizado (curva de eficiencia), temperatura ambiente, irradiación solar y temperatura de entrada del fluido de trabajo.

Este trabajo permite apreciar claramente el alto grado de incertidumbre que representa el pretender asignarle un valor estimado empíricamente a la eficiencia térmica promedio de un sistema solar para calentamiento, para con ello determinar su capacidad de suministro de energía para un servicio dado.

ABSTRACT

This work shows the behavior according to the time of day of a system of solar collectors that provide hot water for an industrial kitchen. It shows and analyzes the effect that the number of solar collectors employed, the demanded thermal charge and the time of the year have on the thermal efficiency of the collector array. The system is analyzed through simulation in the software package TRNSYS (Transient System Simulation Program), which also makes it possible to simulate the variation of ambient temperature and solar irradiation with the time of day.

It is also shown that the average annual thermal efficiency of a solar collector array can vary widely due to various factors, such as the thermal behavior of the collector model being used (efficiency curve), ambient temperature, solar irradiation and temperature of the incoming work fluid.

This work makes it possible to clearly appreciate the high degree of uncertainty associated with trying to assign an empirically estimated value to the average thermal efficiency of a solar heating system in order to determine its capacity to supply energy for a given service.

INTRODUCCION

En numerosos procesos industriales, el calentamiento de agua es usualmente llevado a cabo mediante la utilización de combustibles fósiles. Ante la inminente reducción en la disponibilidad de combustibles fósiles, una alternativa es la utilización de energía solar a través de sistemas de captación y almacenamiento térmico. (Lee, 2007).

Para dimensionar adecuadamente un sistema de captación solar, que pueda sustituir el uso de un combustible fósil para el calentamiento de algún fluido, se requiere conocer, primeramente, la carga térmica que se deberá satisfacer para suministrar el servicio deseado. Sin embargo, estimar la cantidad de energía térmica obtenible de un sistema de colección solar, su disponibilidad temporal y la temperatura de colección no es tarea simple, y el grado de confiabilidad con el que se lleve a cabo influirá fuertemente en las dimensiones del sistema resultante, y por lo tanto en la rentabilidad económica del proyecto.

Los colectores solares planos disponibles comercialmente, son probados en laboratorio para determinar su comportamiento térmico, y el fabricante suministra la "Curva de Eficiencia" de cada modelo de colector que comercializa. La curva de eficiencia muestra el comportamiento de la eficiencia térmica del colector, en función de un parámetro que contiene la temperatura ambiente, la temperatura del fluido de trabajo a la entrada del colector solar, y la irradiación solar incidente sobre el colector (W/m^2), operados de la siguiente forma:

$$\eta \propto \frac{(T_{entrada} - T_{ambiente})}{Irradiacion\ Solar}$$

En la Figura 1 se muestra la curva del modelo de colector utilizado en éste estudio.

Si se conoce la eficiencia, la potencia térmica que se puede obtener de un colector en un instante dado (potencia útil), se puede calcular como:

$$\dot{Q}_{util} = \eta \cdot \dot{Q}_{entrada}$$

Para lo cual se requiere conocer la potencia térmica incidente en el colector solar (irradiación), el área de captación y la eficiencia térmica del mismo. Sin embargo,

la irradiación solar, la temperatura ambiente y la temperatura del fluido de trabajo a la entrada del colector varían continuamente a lo largo del día. Por lo tanto la eficiencia térmica instantánea también varía y consecuentemente la potencia térmica útil disponible de un arreglo de colectores variará continuamente a lo largo del día, y de forma diferente de un día a otro, a lo largo del año (Andersen, 2009).

La energía útil colectada por un arreglo de colectores solares se puede calcular como el área bajo la curva de potencia útil contra tiempo. Por lo tanto, para estimar la cantidad de energía térmica colectada a lo largo del día se requiere contar con información que por su naturaleza variable e interfuncionalidad es esencialmente desconocida para el diseñador de sistemas solares.

Para analizar la problemática anterior se realizó la simulación computacional de un sistema de calentamiento de agua solar, utilizando el paquete de simulación TRNSYS, y se procedió a analizar el comportamiento de la eficiencia térmica del arreglo de colectores solares en función de los parámetros señalados, para un día de verano y otro de invierno, en una misma localidad geográfica.

El sistema de colección solar utilizado en este trabajo fue el conocido como "Solar plus sumplementary", en el que se utiliza también un calentador auxiliar que permite garantizar el suministro de agua caliente a una temperatura constante, independientemente de la disponibilidad de la energía solar (García-Valladares, 2008).

OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo del trabajo es el de determinar el comportamiento de la eficiencia térmica de un arreglo de colectores solares, integrados en un sistema de calentamiento de agua, en función de:

- Temperatura ambiente
- Irradiación solar
- Temperatura del fluido de trabajo a la entrada del arreglo de colectores (como función de la demanda de agua caliente impuesta al sistema)
- Hora del día
- Época del año

METODOLOGÍA

Para la realización de éste trabajo se utilizó el modelo de simulación de un sistema de calentamiento de agua para el suministro de una cafetería tipo industrial, que se había utilizado anteriormente para determinar el desempeño técnico-económico del sistema (Escobedo-Bretado *et al*., 2008). El sistema simulado debe proveer agua caliente a 45°C a un comedor industrial, diariamente durante todo el año, con un flujo constante desde las 7 a.m. hasta las 5 p.m.

Los componentes principales del sistema son:

- Arreglo de colectores solares planos en paralelo
- Termo-tanque vertical de 1000 L
- Bomba para circular el agua entre el termo-tanque 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 la sección fría del tanque y los colectores solares.
- 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 2 se muestra un esquema del sistema simulado, y en la Figura 3 se muestra la implementación para su simulación en el paquete TRNSYS.

Los parámetros que se analizaron fueron:

- Número de colectores: 4, 6 y 8
- Consumo de agua en la cafetería: 1000, 2000 y 3000 L/día.
- Época del año: Invierno (1º de Febrero) y verano (1º de Agosto).

La simulación se desarrolló para periodos de un año de operación del sistema, realizándose cálculos cada 15 minutos.

La descripción del modelo de simulación y sus componentes ya ha sido detallada en otro trabajo anterior (Escobedo-Bretado *et al*., 2008).

En éste trabajo solo se muestran los resultados de la simulación de la operación del sistema descrito, durante dos días del año. El propósito es mostrar el comportamiento instantáneo de la eficiencia térmica del arreglo de colectores, durante un día de verano y uno de invierno.

RESULTADOS

En las figuras 4 a la 10 se muestran los resultados de éste estudio, y se clasifican de acuerdo a la siguiente tabla.

Figura	Mes	Parámetro Fijo	Variables
4	Feb	4 Col	Efic - Temp
5	Ago	4 Col	Efic - Temp
6	Feb	8 Col	Efic - Temp
7	Ago	8 Col	Efic - Temp
8	Feb	4 Col	Efic - Potencia
9	Ago	4 Col	Efic - Potencia
10		Núm Col	Efic Promedio

En todas las figuras se muestra el comportamiento de la eficiencia térmica de los colectores a lo largo del periodo diurno de un día de invierno, 1 de febrero, y uno de verano, 1 de Agosto, respectivamente. Se muestra también el efecto de extraer del sistema tres gastos diferentes de agua caliente, 1000, 2000 y 3000 L/día (carga térmica).

Efecto de la época del año y la inclinación de los colectores

Lo primero que puede observarse es el efecto que tiene la época del año sobre el comportamiento del sistema. Comparando los resultados correspondientes a invierno y verano, figuras 8 y 9, se observa que el periodo de tiempo diario, durante el cual se tiene insolación, aumenta en un 25% durante el día de verano analizado, respecto al día de invierno correspondiente. Se observa que en el día de invierno analizado, se tiene insolación suficiente de 7 a.m. a 5 p.m. (10 h), mientras que en el día de verano ejemplificado, se tiene insolación suficiente de 6 a.m. a 6:30 p.m. (12.5 h).

La intensidad de radiación solar máxima y el número de horas con luz, se pueden apreciar en la Figura 8 y Figura 9, para el caso de 4 colectores, en invierno y verano respectivamente. En esas figuras se puede también apreciar el efecto de la inclinación utilizada en los colectores solares, que fue de un valor igual a la latitud (28° N) más 15° (inclinación usada 43°). Con esto se logra, durante el invierno, que la intensidad de radiación incidente sobre la superficie de los colectores solares sea superior a la incidente sobre un plano horizontal. Durante el verano ocurre lo contrario, la intensidad incidente en los colectores es inferior a la incidente sobre un plano horizontal. Con la inclinación dada a los colectores solares se logra tener una intensidad de radiación incidente en ellos casi igual a lo largo del año, lo que permite un funcionamiento más homogéneo del sistema.

La temperatura del agua de entrada a los colectores, proveniente de la parte inferior del termo-tanque, es menor en invierno que en verano, esto puede apreciarse en las Figura 4 y Figura 5. Una menor temperatura en el agua de entrada a los colectores solares significa una mejor eficiencia térmica de los mismos. Una menor temperatura en la parte inferior del termo-tanque se puede deber a una menor temperatura en el agua de reposición, pero también depende de la carga térmica solicitada del termo-tanque por el servicio suministrado. Esto puede observarse en las figuras de la 4 a la 7, en las cuales se observa como la operación del sistema a mayor carga se refleja en una mayor eficiencia de operación, debido a que el agua del termo-tanque regresa más fría a los colectores solares.

Debido a la inclinación dada a los colectores solares, la irradiación obtenida sobre los mismos durante el invierno alcanza valores muy similares a los obtenidos en verano, lo cual cancela el efecto de la mayor disponibilidad solar en el verano, y se obtiene una operación anual con poca variación de irradiación promedio.

Efecto de la carga térmica demandada

Al incrementar el flujo de agua caliente que se toma del sistema, la temperatura del agua almacenada en el termo-tanque disminuye, pues el agua de reposición llega a una temperatura igual o menor a la temperatura ambiente, y por ello la temperatura del agua que fluye de la parte inferior del termo-tanque hacia los colectores solares también se reduce, como puede observarse en las figuras 4 y 5, para 4 colectores, y Figuras 6 y 7, para 8 colectores instalados. Es interesante notar que a mayor demanda (carga) corresponde una mayor eficiencia térmica del sistema. Este efecto, combinado con el número de colectores instalado, permite observar que el caso que presenta los valores de eficiencia térmica más altos, corresponde al de menor número de colectores instalados y mayor carga demandada, en las Figura 4 yFigura 6, para invierno y en las Figura 5 y Figura 7 para el verano.

Efecto del número de colectores instalados

En las figura 4 y 5, se puede observar que la mayor eficiencia se alcanza con 4 colectores y una carga de 3000 L/día, llegando en verano a 75% aproximadamente. Se observa que con la máxima carga y el mínimo número de colectores solares, la temperatura del agua de entrada a los colectores es la menor observada, por lo que la eficiencia térmica alcanza el máximo valor.

En el caso contrario para 8 colectores y una carga de 1000 L/día (Figuras 6 y 7), la eficiencia en verano alcanza un valor promedio de 65% o menos, aproximadamente. Esto se debe a la mayor temperatura del agua de entrada, originada por la baja carga y mayor número de colectores solares. Éste caso corresponde a un sistema sobre diseñado.

Eficiencia Promedio Anual

En lo anterior se mostro el comportamiento de la eficiencia térmica a lo largo de dos día de operación, uno en invierno y otro en verano. Para dimensionar un sistema solar para calentamiento de agua como el discutido en éste trabajo se necesita, sin embargo, el conocer cual será la eficiencia térmica promedio anual que tendrá el sistema. Con dicho valor, y con el correspondiente valor promedio de irradiación solar incidente, se podría ya estimar la cantidad de energía útil obtenible.

La figura 10 muestra la eficiencia térmica promedio anual del sistema aquí mostrado, en función del número de colectores solares utilizados y de la carga térmica aplicada al sistema. Se observa que la eficiencia promedio anual obtenible es mayor para menor número de colectores, y siempre aumenta al aumentar la carga térmica impuesta al sistema, como se discutió anteriormente.

Es importante señalar dos aspectos importantes:

1. Dependiendo de cómo se dimensione y se opere el sistema, la eficiencia promedio anual puede variar hasta en 8% (~61% a 69%).
2. Si bien se mostró que en los dos días analizados de invierno y verano la eficiencia térmica podía alcanzar valores de hasta 75%, el valor “de diseño” real para éste sistema estará necesariamente entre los límites señalados en el punto anterior, es decir, entre 61% y 69%. Cualquier otro valor que se hubiese escogido estaría sub- o sobre estimando el desempeño del sistema mostrado.

CONCLUSIONES

La eficiencia térmica promedio anual de un arreglo de colectores solares planos puede variar ampliamente debido a que depende de varios factores, tales como: el comportamiento térmico del colector solar utilizado (curva de eficiencia), la temperatura ambiente, la irradiación solar y la temperatura de entrada del fluido de trabajo a los colectores solares. Si bien el comportamiento de la temperatura ambiente y la irradiación solar pueden ser modelados y estimados, la temperatura de entrada del fluido de trabajo puede tener diferentes comportamientos en el tiempo, producto del diseño mismo del sistema utilizado, pero también dependerá del modo de operación, del número de colectores instalados y de la demanda térmica impuesta al sistema.

Con los resultados obtenidos en este trabajo se muestra que para diseñar un sistema solar para calentamiento de agua se requiere contar con herramientas informáticas (paquetes de simulación de sistemas solares), que permitan simular el comportamiento horario de cualquier sistema a lo largo de periodos extendidos de tiempo, además de contar con información detallada de:

- Clima del lugar
- Características técnicas del equipo a utilizar (colectores, tanques)
- Requerimientos precisos del servicio esperado (temperatura del agua requerida, consumo, horarios de uso, temperatura del agua de repuesto)

El correcto dimensionamiento de un sistema solar-térmico se ve influenciado por numerosas variables de diseño, y casi todas ellas cambian continuamente de valor a lo largo del día, de un día para otro, y de forma diferente en diferentes localidades geográficas. Algunos parámetros más varían en función del modo de operación del sistema mismo. La interfuncionalidad que existe entre las variables de diseño es por lo general no-lineal. De todo lo anterior se concluye fácilmente que cualquier intento de "estimar" empíricamente el comportamiento de un sistema de calentamiento solar conlleva un alto e inevitable grado de incertidumbre. Tomando en cuenta que la rentabilidad de un proyecto de este tipo dependerá de un adecuado diseño, es necesario reconocer que se le debe de dar la mayor importancia a la fase de diseño de éste tipo de sistemas, y recurrir a la utilización de las herramientas de cálculo adecuadas, para evitar posteriores fracasos económicos.

REFERENCIAS

Andersen, E. y Furbo, S. (2009) Theoretical variations of the thermal performance of different solar collectors and solar combi systems as function of the varying yearly weather conditions in Denmark. Solar Energy. v.83 pp.552-565.

Lee, D.W. y Sharma, A. (2007) Thermal performances of the active and passive water heating systems based on annual operation. Solar Energy, v.81 pp.207-215.

Garcia-Valladares, O.; Pilatowsky, I. y Ruiz, V. (2008) Outdoor test method to determine the thermal behavior of solar domestic water heating systems. Solar Energy. v.82, pp.613-622.

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. Artículo ERE 01-49. Memorias de la 26 Semana Nacional de Energía Solar. ANES. pp.181-185. Noviembre 11-15. Chetumal, Q.R. México.

Escobedo-Bretado, J.A.; Martín-Domínguez, I.R. y Alarcón-Herrera, M.T. (2008) Análisis técnico-económico de un sistema de calentamiento de agua solar para un comedor industrial, mediante simulación en TRNSYS. Artículo STS-22. Memorias de la 32 Semana Nacional de Energía Solar. ANES–ISES. Octubre 20-22. Mérida, Yuc. México.

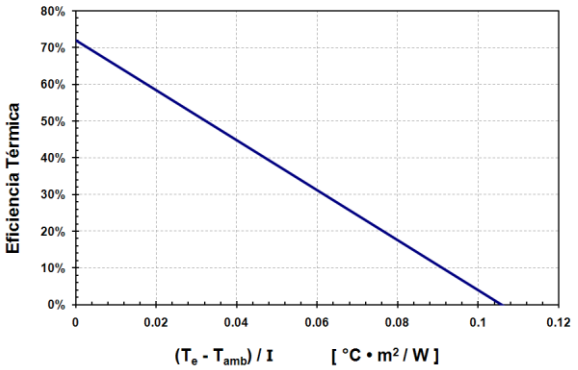

Figura 1. Curva de eficiencia térmica de los colectores solares utilizados.

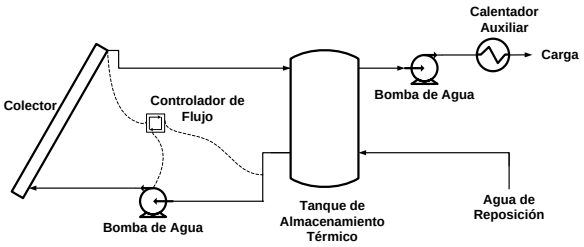

Figura 2. Esquema del sistema para calentamiento de agua simulado.

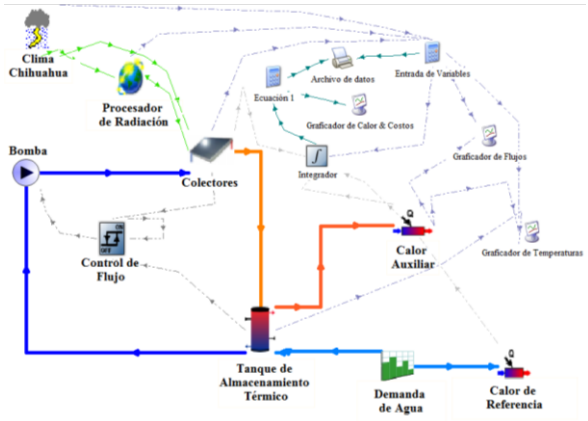

Figura 3. Modelo para simulación en TRNSYS

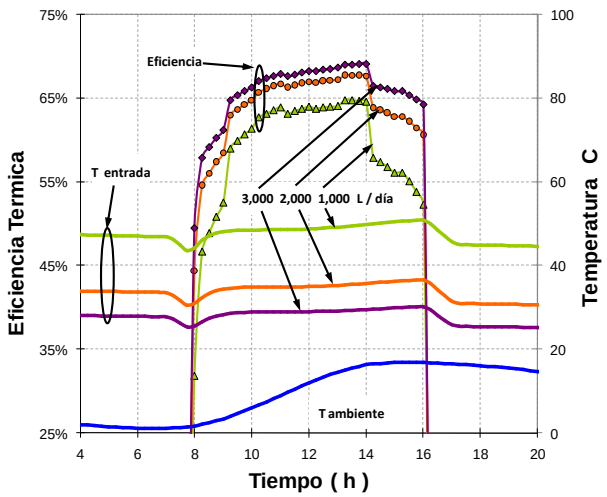

Figura 6. Febrero 8 colectores

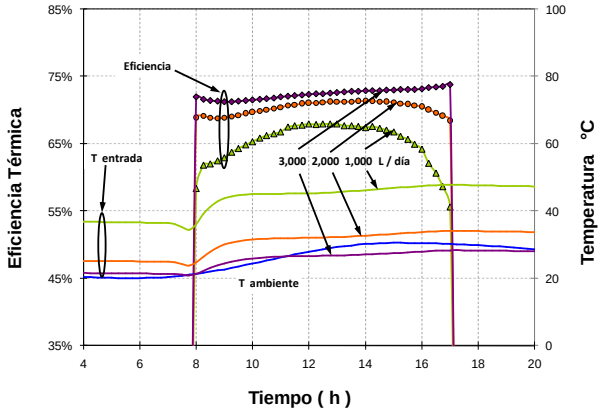

Figura 7. Agosto 8 colectores

Figura 4. Febrero, 4 colectores

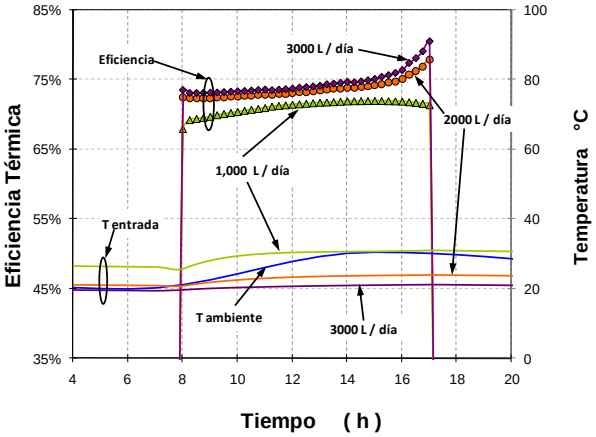

Figura 5. Agosto 4 colectores

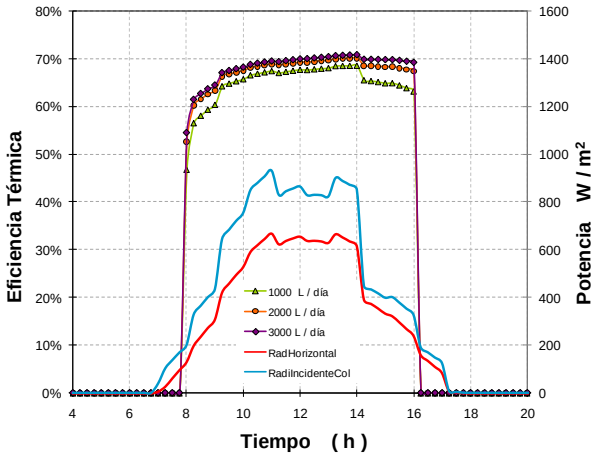

Figura 8. Febrero 4 colectores

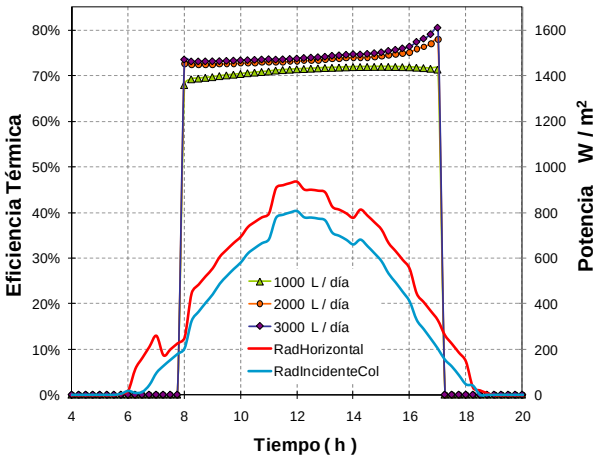

Figura 9. Agosto 4 colectores

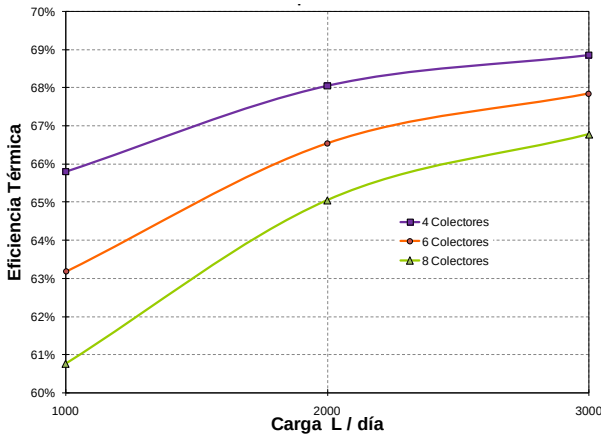

Figura 10. Eficiencia promedio anual