

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE COLECTORES SOLARES PLANOS OPERANDO EN SERIE

Ignacio R. Martín Domínguez y 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 FAX: (614) 439-1112
ignacio.martin@cimav.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta un sencillo simulador computacional que permite observar el efecto que tienen las variables ambientales y de operación sobre colectores solares planos operando en serie.

Se discuten las consecuencias de utilizar una definición de eficiencia basada en la temperatura del fluido de entrada, sobre la predicción del comportamiento en colectores solares planos.

Se analizan los efectos de la tasa de flujo, irradiación solar, temperatura de entrada y temperatura ambiente sobre la eficiencia, la temperatura de salida y la energía útil obtenida del sistema.

Se discute la pertinencia de utilizar el simulador como ayuda para el diseño de sistemas termo solares.

ABSTRACT

A rather simple simulator of solar collector systems is presented in this work, which permits to observe the effect of the weather and operational variables on flat solar collectors working in series.

The consequences of using a thermal efficiency definition, based on inlet water temperature, over the collector thermal behavior is discussed.

The effects of flow rate, solar irradiation, inlet water temperature and ambient temperature over the collector's efficiency, outlet temperature and useful energy are analyzed.

The advantages of using the simulator as an aid to the design process are discussed.

PALABRAS CLAVES

Colectores solares planos, sistemas de colectores, simulación, selección de equipo

INTRODUCCIÓN

Para aprovechar la disponibilidad de energía solar, como complemento, o en sustitución, de combustibles fósiles en la producción de agua caliente o como calor de proceso, en la actualidad se tiene ya una amplia disponibilidad de colectores planos comerciales. Existen diversos fabricantes nacionales, con diseños ya probados.

Uno de los problemas al que existen para dimensionar un sistema de aprovechamiento de la energía solar, mediante el uso de arreglos de colectores solares planos, consiste en la estimación de la energía útil y temperaturas que puede obtenerse de un arreglo dado. A diferencia de una caldera, en la cual se tiene control sobre el proceso de calentamiento del agua, en un colector solar no se tiene control sobre las principales variables que determinan la cantidad de energía útil obtenible y la temperatura de salida del agua del colector. Las variables no controlables son la irradiación solar, temperatura ambiente y temperatura del agua a la entrada del colector.

Ante la necesidad de poder predecir cuanta energía térmica se puede esperar obtener de un colector solar plano, por lo general se cuenta únicamente con información limitada respecto al funcionamiento del colector bajo diferentes condiciones de operación. En el mejor de los casos la información disponible es la curva de eficiencia del colector, como la mostrada en la figura 1. La obtención de la curva de eficiencia requiere el someter al colector solar a mediciones experimentales, en un banco de pruebas adecuadamente instrumentado, preferentemente de acuerdo con el estándar de la ASHRAE (ASHRAE, 1987).

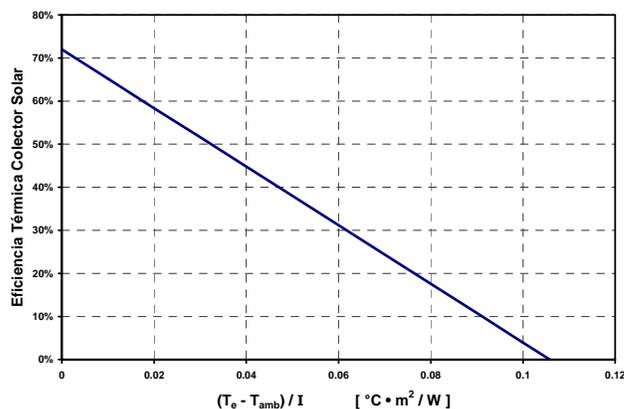


Figura 1. Curva de eficiencia típica de un colector solar plano

En la gráfica de la figura 1, la eficiencia se muestra como función de un parámetro independiente, que resulta de dividir la diferencia entre las temperaturas del agua de entrada al colector y la temperatura ambiente, sobre la irradiación solar incidente en el colector. Con ello se tendría que la eficiencia de un colector solar particular depende de tres variables. Sin embargo, aún cuando no

está explícita en la gráfica, el flujo másico de agua es también una cuarta variable independiente. Ello se reconoce del hecho de que la curva de eficiencia fue obtenida haciendo circular un cierto flujo másico constante y al utilizarse un flujo diferente al de prueba, la eficiencia térmica del colector será también diferente de la predicha por la gráfica.

Con lo anterior se tiene que si bien casi toda la información sobre el comportamiento del colector está en la curva de eficiencia, dado que su comportamiento depende en realidad de cuatro variables, resulta difícil visualizar el como cada una de las variables afecta por si sola su comportamiento. Si adicionalmente se tiene el caso en que se desea conectar dos colectores en serie, para con ello obtener una mayor temperatura en el flujo de salida, resulta aún mas complicado el visualizar la respuesta del sistema.

Con el objetivo de contar con una herramienta que permitiera ingresar la información básica sobre el funcionamiento de un colector solar, tal como la pendiente y la ordenada al origen de la curva de eficiencia, y el valor del flujo utilizado para la obtención de la curva, se desarrollo un pequeño simulador gráfico que permite visualizar rápidamente los valores de las variables principales de cada colector en un arreglos de dos en serie.

OBTENCIÓN DE LA CURVA DE EFICIENCIA

El método experimental para determinar la eficiencia térmica de un colector solar plano consiste, básicamente, en exponer el colector a la radiación solar, medir la cantidad de energía que incide sobre el, medir la cantidad de energía que es removida por el fluido de trabajo Q_u , y sacar la relación entre ambos valores.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I} = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{A_c I} \quad (1)$$

El calor útil también puede escribirse como:

$$Q_u = A_c F_R [I(\tau \alpha) - U_L (T_e - T_{amb})] \quad (2)$$

En donde se tiene la energía que llega al colector como el producto de la irradiación, I , por la transmitancia, τ y la absorbancia, α , las pérdidas de calor del colector evaluadas como el coeficiente global de transferencia de calor U_L , multiplicando la diferencia entre la temperatura de entrada del agua al colector, T_e , y la temperatura ambiente T_{amb} . El Factor de Remoción de Calor, F_R , aparece en la ecuación para corregir el hecho de que se está tomando la temperatura de entrada del agua al colector en la ecuación, en lugar de la temperatura promedio del agua en el colector. Esto es debido a que la temperatura fácilmente medible es la de entrada al colector. Este factor relaciona la ganancia real de calor útil con la ganancia de calor que se tendría si el todo colector estuviera a la temperatura constante del agua de entrada al mismo. Sustituyendo la ecuación (2) en la (1) y simplificando se obtiene la siguiente expresión.

$$\eta = F_R (\tau \alpha) - F_R U_L \frac{(T_e - T_{amb})}{I} \quad (3)$$

En donde se tiene ya la ecuación de la eficiencia en función de las temperaturas de entrada y ambiental e irradiación solar incidente. Como se aprecia de inmediato, es la ecuación de una recta, y la pendiente y ordenada al origen son los factores a encontrarse experimentalmente para cada diseño de colector. Los detalles de la anterior derivación se encuentran disponibles en la literatura (Duffie y Beckman, 1991).

EFICIENCIA TÉRMICA BASADA EN LA TEMPERATURA DE ENTRADA

La eficiencia térmica de un colector solar es la relación entre la energía útil agregada al flujo que pasa por el, en relación con la energía radiante que llega a el proveniente del sol. La diferencia entre ambas cantidades son las pérdidas de calor que ocurren desde el colector hacia su medio ambiente. Dichas pérdidas son función directa de la diferencia de temperatura entre el colector y su entorno. Si se recuerda que la temperatura del colector varía continuamente, debido a que el agua se va calentando a su paso por el aparato, se entiende que al disminuir el flujo y aumentar la temperatura de salida, se originan más pérdidas y disminuye la eficiencia. Este hecho, sin embargo, no se observa cuando se utiliza la ecuación (3), en donde se predice que la eficiencia será constante mientras que la temperatura de entrada también lo sea, independientemente del flujo y por ello de la temperatura promedio del colector. Este hecho es significativo cuando se opera un colector solar a flujos diferentes a los utilizados para la obtención de su curva de eficiencia, y se puede corregir la ecuación (3) mediante la introducción de un factor de corrección por flujo.

FACTOR DE CORRECCIÓN POR FLUJO

Idealmente, los valores de los parámetros de la ecuación (3) deben de ser obtenidos con una tasa de flujo igual a la utilizada en la operación normal del colector. Sin embargo puede ocurrir con facilidad que el colector se opere a tasas de flujo diferentes, y con ello la información obtenida en el banco de pruebas dejaría de ser precisa. Para permitir seguir utilizando la misma curva de eficiencia aún con flujos diferentes a los de prueba, es posible introducir una corrección a la ecuación (3), que si bien es una aproximación, permite corregir el valor de eficiencia y poder predecirla a otras tasas de flujo. La eficiencia corregida se obtiene entonces como:

$$\eta_{corregido} = r \eta_{experimental} \quad (4)$$

Y el factor de corrección, r , se calcula como:

$$r = \frac{\left(\frac{\dot{m} C_p}{A_c} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c F' U_L}{\dot{m} C_p} \right) \right] \right)_{iso}}{(F_R U_L)_{ref}} \quad (5)$$

En la ecuación (5) aparece el llamado Factor de Eficiencia del Colector, F' , que es esencialmente constante para cualquier flujo en un colector dado, y que se puede calcular como:

$$(F' U_L) = \left[- \frac{\dot{m} C_p}{A_c} \ln \left(1 - \frac{A_c F_R U_L}{\dot{m} C_p} \right) \right]_{ref} \quad (6)$$

En lo anterior el subíndice *ref* indica valores medidos con el flujo de referencia (usado en la determinación experimental de la curva de eficiencia), mientras que *iso* se refiere a la condición real de operación del colector. La derivación completa de lo anterior se encuentra en la literatura (Duffie y Beckman, 1991).

SIMULADOR DE COMPORTAMIENTO DE COLECTORES PLANOS EN SERIE

Para tener una visión global del comportamiento de dos colectores solares planos, conectados en serie, (Figura 2) se desarrolló un sencillo simulador gráfico, en el cual el usuario puede cambiar fácilmente los valores de las variables que intervienen en la eficiencia de los colectores, y observar el comportamiento del sistema.

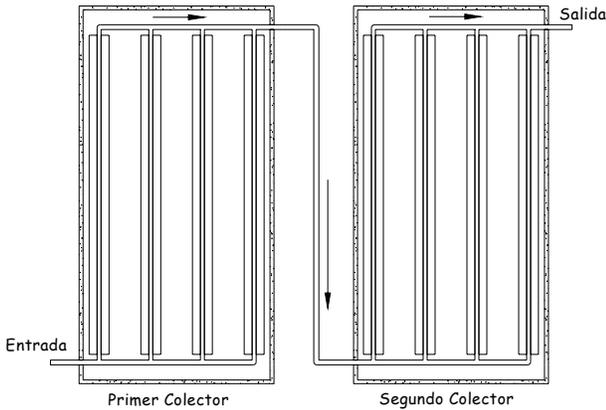


Figura 2. Colectores planos en arreglo de flujo en serie

El simulador está implementado en hoja de cálculo electrónica, MS Excel, utilizando el lenguaje VisualBasic para Aplicaciones, disponible en dicho paquete.

El usuario debe suministrar los valores experimentales de pendiente y ordenada al origen, de la curva de eficiencia, así como el valor del flujo de agua utilizado para las pruebas del colector, anotándolas en ciertas celdas de la hoja de cálculo. Con dicha información el simulador genera varias pantallas en donde se puede observar el comportamiento de las diferentes variables, siendo posible además el utilizar "botones" de control para variar los valores de las demás variables, directamente desde las pantallas gráficas. De esa forma se puede observar, en forma dinámica, el efecto de las variables de interés sobre el comportamiento de los colectores.

DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN PRESENTADA POR EL SIMULADOR

En la figura 3 se muestra la pantalla del simulador en la cual se presenta el comportamiento de la eficiencia térmica de un colector como función de la temperatura de entrada del agua y la irradiación solar. Se tienen como parámetros la temperatura ambiente y el flujo, y puede incluirse o no la corrección por flujo.

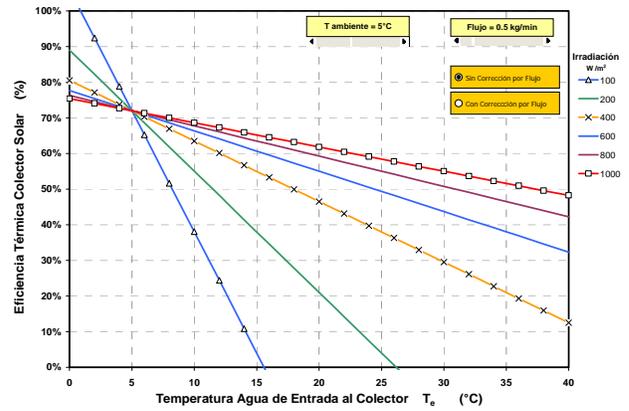


Figura 3. Pantalla de eficiencia contra temperatura de entrada

La figura 4 muestra la variación de la eficiencia y del factor de corrección en función del flujo. Se muestra simultáneamente el comportamiento de la eficiencia con y sin factor de corrección para cada uno de los dos colectores operando en serie. Se tienen como parámetros la irradiación solar, temperatura del agua de entrada y temperatura ambiente. Se puede observar que para el colector utilizado en este caso de ejemplo, el cual fue probado a un flujo de 2 kg/min, el efecto del flujo de operación es muy importante a bajos flujos, en donde la eficiencia de operación del colector disminuye fuertemente para el primer colector. Sin embargo, al tener un segundo colector en serie, la eficiencia del segundo casi no se ve afectada en comparación con el primero, debido a que la disminución de la eficiencia del primero se traduce en una disminución en la temperatura de entrada al segundo, que a su vez aumenta la eficiencia de este último y compensa el efecto del bajo flujo en el.

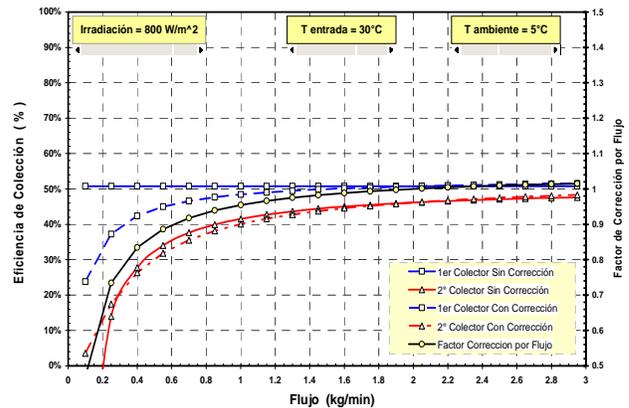


Figura 4. Pantalla de eficiencia y factor de corrección por flujo, contra flujo

La figura 5 muestra el comportamiento de la temperatura de salida de dos colectores en serie, en función del flujo, teniendo como parámetros la irradiación solar, temperatura de entrada al primer colector y temperatura ambiente. Se muestran curvas de temperatura para predicciones con y sin corrección por flujo. En la figura se puede apreciar como de nuevo a bajos flujos el comportamiento predicho de los colectores se ve fuertemente afectado si no se considera el factor de corrección por flujo. Las líneas sólidas muestran como el considerar una eficiencia independiente del flujo provoca que la temperatura de salida del primer colector se eleve sin límite, haciendo que la eficiencia del segundo se vuelva negativa, con lo cual éste tendría que funcionar como enfriador. Las curvas punteadas muestran el comportamiento real del sistema de colectores, en el cual el aumento de temperaturas se va limitando al disminuir la eficiencia.

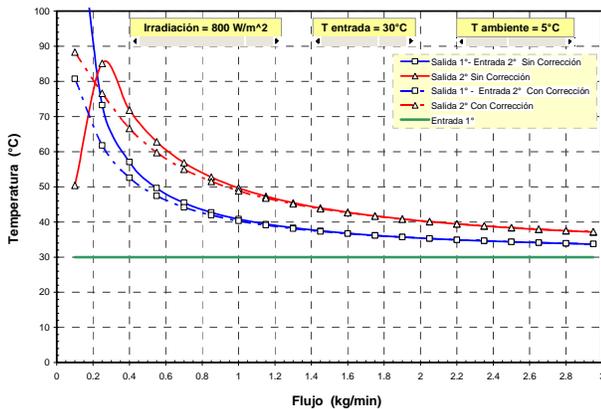


Figura 5. Pantalla de temperatura de salida contra flujo

La figura 6 muestra potencia térmica obtenida en cada colector y la suma de ambas, en función del flujo. Se tienen como parámetros la irradiación solar, temperatura de entrada al primer colector y temperatura ambiente. En esta pantalla resulta interesante el hacer notar como la potencia útil obtenida de los colectores aumenta asintóticamente con el flujo, mientras que a bajos flujos disminuye fuertemente. Estas curvas pueden ser de gran ayuda para determinar en una aplicación dada hasta cuanto potencia útil se estaría dispuesto a perder con el fin de obtener temperaturas de salida más altas, utilizando colectores en paralelo. Igualmente permiten visualizar la posibilidad de utilizar colectores en serie - paralelo, a mayor flujo, en lugar de solo paralelo, a menor flujo, para obtener temperaturas de salida más altas y con mejor eficiencia global.

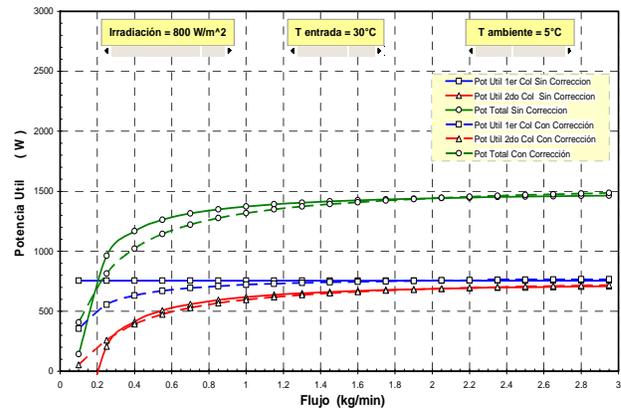


Figura 6. Pantalla de potencia útil contra flujo

En la figura 7 se muestra la pantalla de potencia útil y eficiencia térmica contra irradiación solar, teniendo como parámetros el flujo y las temperaturas de agua de entrada y ambiental, pudiendo conmutar la inclusión del factor de corrección por flujo. Para las condiciones mostradas en la figura se observa como se requiere contar con un nivel de irradiación mínimo, (aproximadamente 240 W/m² en esas condiciones), para empezar a obtener calor útil del sistema de colectores. Esta pantalla permite conocer fácilmente la potencia térmica que se obtendría de cada colector operando en serie, así como el total del arreglo, pudiendo variar rápidamente las condiciones de operación y ver dinámicamente la tendencia del comportamiento del sistema.

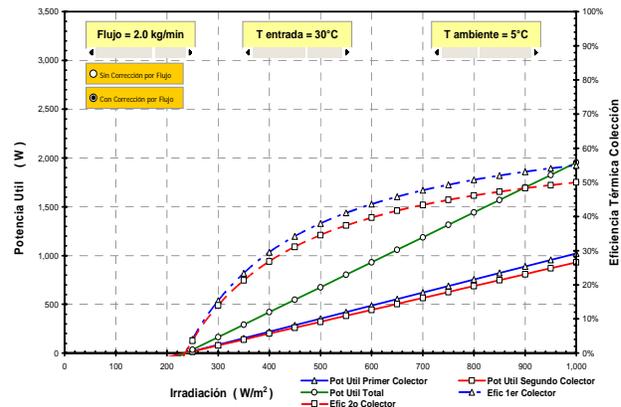


Figura 7. Pantalla de potencia útil y eficiencia contra irradiación solar

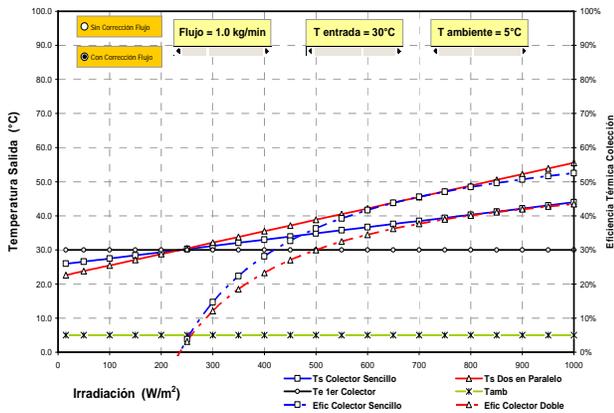


Figura 8. Pantalla de temperatura de salida y eficiencia contra irradiación solar

Finalmente, la figura 8 muestra la pantalla en la cual se tienen a la temperatura del agua de salida y la eficiencia térmica de los colectores en función de la irradiación solar, teniendo como parámetros de nuevo al flujo y las temperaturas de entrada y ambiental. En esta pantalla se pueden observar las temperaturas que se estarían obteniendo a diferentes condiciones de operación, con y sin corrección por flujo.

En todas las pantallas del simulador se tienen controles deslizables para permitir al usuario variar fácilmente los valores de los parámetros y observar rápidamente el comportamiento del sistema. Igualmente se tienen botones para conmutar la inclusión del factor de corrección por flujo en los valores calculados. El uso de controles facilita el uso del simulador y acota los valores que el usuario puede ingresar, para evitar confusiones o el usar valores fuera de rangos posibles.

CONCLUSIONES

El diseñador de un sistema de aprovechamiento solar térmico que utiliza colectores solares planos, necesita estimar cuanta energía útil puede obtener de un arreglo de colectores solares. Si como información de diseño solo cuenta con la curva experimental de eficiencia del colector, resulta difícil visualizar cual será el comportamiento de un arreglo de colectores en serie, trabajando bajo diversas condiciones ambientales y de operación.

La disponibilidad de un simulador del comportamiento térmico de un sistema de dos colectores en serie, que además toma en cuenta el efecto de operarlos bajo condiciones de flujo diferentes a las utilizadas para la obtención de la curva de eficiencia, resulta muy conveniente para visualizar el efecto de los diversos parámetros que influyen sobre su operación.

REFERENCIAS

ASHRAE Standard 95-1987 (1987) Methods of testing to determine the thermal performance of solar domestic water heating systems. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA. USA.

Duffie, J.A. y Beckman, W.A. (1991) Solar engineering of thermal processes. 2nd Edition. John Wiley 1991.

Semana Nacional de Energía



Xone' echoa



OAXACA




XXXVIII
SNES

Jointly with the
October 4-8, 2004


SolarPACES
12th International Symposium
Solar Power and Chemical Energy Systems



XXVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR



Oaxaca, Oaxaca



4 al 8 de Octubre de 2004

MEMORIA



Asociación Nacional de Energía Solar, A.C.