

DIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIONES SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE AGUA

Jorge Luis Guerrero
Consultora Helioenergética
A. Alcorta 227 - 1706 Haedo

Resumen

Se presenta un procedimiento para dimensionar instalaciones para calentamiento de agua empleando datos climáticos y de radiación solar global publicados. Incluye la selección de colectores solares aptos por sus características físicas tanto en lo concerniente al clima como al objetivo de la instalación. Se determina el área de colección y se seleccionan los sistemas según las heladas. Se discuten además diversas situaciones. Los modelos aproximativos son cotejados con datos detallados de mediciones reales o con días tipo de diseño.

Introducción

Ante la necesidad de contar con una herramienta adecuada para el dimensionamiento de instalaciones solares para calentamiento de agua y que pueda usar la información meteorológica disponible, se han realizado una serie de análisis y propuestas de modelos que desembocan en los procedimientos aquí descritos.

Es indudable que si contáramos con días típicos de diseño para las distintas situaciones climáticas del país, que incluyan como parámetro de selección a la radiación solar, como actualmente se cuenta para La Plata y alrededores (1), el procedimiento diferiría bastante y su confiabilidad sería mayor.

Debido a esta circunstancia se han desechado modelos de análisis y dimensionamiento que contengan interacciones entre parámetros climáticos que no son de difusión habitual y situaciones instantáneas de las instalaciones solares.

El procedimiento permite la utilización de las estadísticas climatológicas publicadas en (2) y los valores de radiación publicados en (3).

En esencia se basa en el empleo de valores medios característicos del funcionamiento de las instalaciones acordes con los climáticos. Así se analiza la ecuación del comportamiento del colector, la determinación del rendimiento global del día medio del mes, la influencia de los días de baja heliofanía, la necesidad de acumulación por las secuencias de días nublados, los riesgos de congelamiento total del agua en el colector, el riesgo de hervor, la elección del colector y del sistema, la carga térmica adicional por la inclusión de un intercambiador de calor, y el dimensionamiento del área de colección del sistema.

En lo referente a los sistemas automáticos de comando del funcionamiento para instalaciones grandes o medianas, los análisis realizados son adecuados para su programación. No obstante dada la diversidad de posibilidades, no se particulariza al respecto.

I. Comportamiento del Colector

Es habitual encontrar en la bibliografía (4) tres ecuaciones similares para representar el comportamiento del colector solar, estas son:

$$\eta = \alpha\tau - \frac{U}{I_T} (t_p - t_a) \quad (1)$$

$$\eta = F' \left\{ \alpha\tau - \frac{U}{I_T} \left(\frac{t_e + t_s}{2} - t_a \right) \right\} \quad (2)$$

$$\eta = F_R \left\{ \alpha\tau - \frac{U}{I_T} (t_e - t_a) \right\} \quad (3)$$

donde:

η es el rendimiento físico del colector (adimensional)

α es la absorptancia de la superficie receptora de radiación solar (adimensional),

τ es la transmitancia de la cubierta transparente a la radiación solar (adimensional),

U es el coeficiente global de pérdidas por unidad de superficie ($W/m^2 \cdot ^\circ C$),

t_p es la temperatura media de la placa receptora ($^\circ C$),

t_a es la temperatura del aire ambiente ($^\circ C$),

t_e es la temperatura de entrada al colector ($^\circ C$),

t_s es la temperatura de salida del agua del colector ($^\circ C$),

I_T es la radiación incidente sobre el plano del colector (W/m^2)

F' es un factor de proporcionalidad entre la temperatura del agua y la del receptor en el sentido transversal al flujo de la primera (adimensional),

$F_R = F'F''$ donde F'' cumple las mismas funciones que F' pero en el sentido del flujo del agua (adimensional).

La Ec.1) reviste sólo interés analítico para los colectores planos, dado que los ensayos de los mismos se realizan generalmente calentando un líquido, en virtud de la complejidad de la determinación de la temperatura de la placa receptora y sus gradientes. Además para los fines del dimensionamiento de sistemas helioenergéticos interesa más la temperatura del agua que la de la placa receptora. La Ec. 3) presenta el inconveniente de la variabilidad de F'' (5) según el salto de temperaturas entre la entrada y la salida del colector. Cuando $t_s \rightarrow t_e$, $F_R \rightarrow F'$.

Debido a estas causas se ha encontrado más satisfactoria la Ec. 2) para representar el comportamiento del colector y sus temperaturas bajo diferentes situaciones ambientes y de radiación solar incidente.

II. Rendimiento medio de colección

El rendimiento global en el día medio de un período determinado (habitualmente un mes) resulta de particular importancia si está relacionado con parámetros que intervengan en la Ec. 2).

Este rendimiento no es el promedio de los rendimientos que toma el colector durante el día, sino es el rendimiento global del mismo, es decir:

$$\eta_g = \frac{Q_a}{H_T} \quad (4)$$

donde:

Q_a es el total del calor ganado por el colector por unidad de área en el día (J/m^2) y

H_T es la energía solar por unidad de área interceptada por el colector (J/m^2)

Si la Ec. 2) la hacemos variar según distintos momentos ω del día y si la multiplicamos por $I_T(\omega)$ tenemos que toma la forma:

$$Q_a(\omega) = I_T(\omega) \eta(\omega) = F' \left\{ \alpha_T I_T(\omega) - U \left(\frac{t_e(\omega) + t_s(\omega)}{2} - t_a(\omega) \right) \right\} \quad (5)$$

donde $Q_a(\omega)$ es la potencia absorbida por el colector.

Integrándola entre ω_{SS} y ω_{SR} ("amanecer" y "ocaso") resulta:

$$\int_{\omega_{SR}}^{\omega_{SS}} I_T(\omega) \eta(\omega) d\omega = Q_a \quad (6)$$

$$\int_{\omega_{SR}}^{\omega_{SS}} I_T(\omega) d\omega = H_T \quad (7)$$

$$\int_{\omega_{SR}}^{\omega_{SS}} \frac{t_e(\omega) + t_s(\omega)}{2} d\omega = (\omega_{SS} - \omega_{SR}) \frac{t_i + t_f}{2} \quad (8)$$

donde:

t_i es la temperatura inicial del agua del sistema ($^{\circ}C$) y

t_f es la temperatura final del mismo* ($^{\circ}C$)

$$\int_{\omega_{SR}}^{\omega_{SS}} t_a(\omega) d\omega = (\omega_{SS} - \omega_{SR}) t_{am} \quad (9)$$

donde: t_{am} es la temperatura ambiente media ($^{\circ}C$)

De las Ec. 5) 6) 7) 8) y 9)

$$Q_a = F' \left\{ \alpha_T H_T - U (\omega_{SS} - \omega_{SR}) \left(\frac{t_i + t_f}{2} - t_{am} \right) \right\} \quad (10)$$

Si dividimos por el intervalo $(\omega_{SS} - \omega_{SR})$ a la Ec. (10) tenemos:

$$Q_{am} = F' \left\{ \alpha_T I_{Tm} - U \left(\frac{t_i + t_f}{2} - t_{am} \right) \right\} \quad (11)$$

donde:

Q_{am} es la potencia media absorbida en el día (W/m^2)

I_{Tm} es la radiación media del día (W/m^2).

sobre el plano colector.

* Se suponen nulas las pérdidas de calor en las cañerías.

Dividiendo por I_{Tm} resulta el rendimiento global del día:

$$\eta_g = F \left\{ \alpha \tau - \frac{U}{I_{Tm}} \left(\frac{t_i + t_f}{2} - t_{am} \right) \right\} \quad (12)$$

Si comparamos la Ec. 12) con la Ec. 2) vemos que tienen la misma forma y es más, si a esta última la expresamos como:

$$\eta = f(\psi) \quad (13)$$

donde:
$$\psi = \left(\frac{t_e + t_s}{2} - t_a \right) \frac{1}{I_T}$$

$$(14)$$

para el valor de:

$$\psi = \left(\frac{t_i + t_f}{2} - t_{am} \right) \frac{1}{I_{Tm}} = \psi_g \quad (15)$$

será

$$\eta = \eta_g \quad (16)$$

De esta manera podemos definir el rendimiento $\bar{\eta}$ para el día medio del mes a aquel en que se cumpla que:

$$\psi = \bar{\psi} = \left(\frac{t_i + t_f}{2} - \bar{t}_a \right) \frac{1}{\bar{I}_T} \quad (17)$$

donde ahora:

- \bar{t}_a es la temperatura media del mes ($^{\circ}\text{C}$)
- \bar{I}_T es la intensidad de radiación media del mes (W/m^2)
- t_i es la temperatura del agua fría a calentar ($^{\circ}\text{C}$)
- t_f es la temperatura a la cual deseamos llevar el agua ($^{\circ}\text{C}$).

En (2) se puede encontrar \bar{t}_a para muchas localidades del país en estadística de 10 años. En (3) se puede hallar el valor de la integral mensual de radiación global sobre plano horizontal para todo el país. Con procedimientos habituales desarrollados por Liu y Jordan se puede hallar \bar{H}_T y también \bar{I}_T (6).

III. Influencia de la heliofanía

Tiene importancia la cantidad de días nublados o despejados cuando se desea emplear fuentes alternativas. En el caso de no usarse las mismas, el dimensionamiento de las instalaciones con los valores medios obvia esta necesidad. El sistema coleccionará en los días claros lo que no colecciona en los nublados.

En áreas frías donde $\bar{\psi}$ es habitualmente grande tiene sentido usar el colector en los períodos que se pueda, es decir en los días donde ψ_g arroje un valor positivo de η_g .

En (3) se dan fórmulas de correlación de la heliofanía relativa H_r y la radiación solar global H diaria sobre plano horizontal, considerando la radiación que sobre dicho plano incidiría sin atmósfera H_0 , de la forma:

$$H = H_0 (a H_r + b) \quad (18)$$

Los coeficientes a y b que se dan en (3) tienen valor para grandes correlaciones de datos de heliofanía, es decir que para casos particulares deberá

ajustárselos de modo que coincida con las integrales mensuales.

En (2) no figura el dato de heliofanía, pero en cambio figura la nubosidad por octavos de cielo. En los casos analizados existe una buena correlación entre estos valores y determinados límites de la heliofanía relativa. Estos valores serían:

- A) $H_r > 0,7$ para nubosidades menores a 2/8 de cielo.
- B) $0,2 < H_r < 0,7$ para nubosidades entre 2/8 y 6/8 de cielo.
- C) $H_r < 0,2$ para nubosidades mayores a 6/8 de cielo.

Así los días de tipo A, B y C pueden ser considerados con $H_{rA} = 0,85$; $H_{rB} = 0,45$ y $H_{rC} = 0,1$.

Las zonas con alta nubosidad arrojan mayores diferencias. Para La Plata y Buenos Aires las cantidades son, para el mes de junio:

	A	B	C
según (1)	7,5	9	13,5
según (2) Bs.As.	6	10	14
según (2) La Plata	4	12	14

Es decir que en La Plata, por ejemplo, la radiación media mensual debería ser empleando la Ec. 18)

$$\bar{H} = H_0 \left[\frac{4}{30} (0,85 a + b) + \frac{12}{30} (0,45 a + b) + \frac{14}{30} (0,1 a + b) \right]$$

$$H = H_0 (0,34 a + b)$$

Es decir que:

$$\frac{\bar{H}_A}{\bar{H}} = \frac{0,85 a + b}{0,34 a + b}$$

(los valores de a y b se dan en (3)).

Análogamente podemos hallar \bar{H}_B , \bar{H}_C y por consiguiente \bar{T}_{TA} , \bar{T}_{TB} y \bar{T}_{TC} para cada tipo de día y así encontrar los ψ_g y η_g correspondientes.

El dimensionamiento de la instalación queda entonces reducido sólo a los días que se consideren, debiendo usarse fuentes alternativas en los restantes.

IV. Acumulación

Para la determinación de la acumulación necesaria no es de utilidad el conocimiento de los porcentajes de días nublados o claros, sino su secuencia. Al respecto no hay elaboraciones que se adecuen a esta necesidad. Salvo para algunas localidades se han hecho ciertos análisis.

No se ha encontrado ningún modelo simple para determinar con cierta aproxima-

ción estas secuencias.

Para zonas con mayoría de días claros la necesidad de acumulación es prácticamente de un día. La gran variedad de secuencias se encuentra donde son comparables los nublados y los claros o más los primeros.

V. Riesgo de congelamiento

El congelamiento total del agua en las cañerías del colector (si éstas son rígidas) produce el deterioro del mismo. Por esta razón y a fin de tomar las medidas adecuadas (fluido intermedio anticongelante, colectores elásticos, vaciado del colector, etc.) es necesario delimitar el riesgo de congelamiento total del colector.

El agua congelará en el colector si:

$$\frac{M}{U} = \frac{\bar{t}_h \Delta T_h}{C_h} \quad (19)$$

donde:

- M es la masa de agua contenida en el colector por unidad de superficie (Kg/m²)
- C_h es el calor de fusión del hielo (J/Kg)
- \bar{t}_h es la temperatura media de heladas (°C)
- ΔT_h es la duración de la misma (seg)

Haciendo una aproximación senoidal de la temperatura del día con origen al mediodía solar se obtiene una buena aproximación con la realidad. Dado que los días con heladas (o sea los de más baja temperatura máxima cercana al promedio mensual \bar{t}_a , se tomó ésta como máximo de la senoide y la mínima de helada t_h como mínimo.

Así la temperatura ambiente sería:

$$t_a(\omega) = \frac{\bar{t}_a + t_h}{2} + \frac{\bar{t}_a - t_h}{2} \text{ sen } \omega \quad (20)$$

e integrando en el intervalo en que está bajo cero, resulta:

$$\bar{t}_h \Delta T_h = \frac{43.200}{\pi} \left\{ (\bar{t}_a + t_h) \arccos \frac{\bar{t}_a + t_h}{\bar{t}_a - t_h} - 2\sqrt{-\bar{t}_a t_h} \right\} \quad (21)$$

Comparada esta aproximación con datos horarios de San Miguel ha arrojado buenos resultados. Cubre el 99% de las heladas ocurridas en 10 años, tomando \bar{t}_a y t_h de (2).

De esta manera, el procedimiento resulta apropiado para la previsión del congelamiento del colector.

VI. Riesgo de hervor

Si bien el peligro que representa que el agua hierva en los colectores es menor para la instalación que el congelamiento, su efecto produce incrusta-

ciones indeseables en las cañerías.

Esta situación se dá cuando se cumple la siguiente expresión:

$$\frac{Q_a + Q_{ac} - Q_{cons} - Q_{perd}}{M C_p} \geq 100^\circ\text{C} \quad (23)$$

donde:

Q_{ac} es el calor acumulado (J)

Q_{cons} es el calor consumido (J)

Q_{perd} es el calor perdido por la instalación (menos en el colector) (J)

M es la masa total de agua en la instalación (Kg)

C_p es el calor específico del agua (J/Kg °C)

Es conveniente verificar el cumplimiento de la Ec. 23) para un mes de verano, días de alta heliofanía y una cantidad estimada de días sin consumo de agua caliente.

En lo que respecta a Q_{perd} está en relación inversa con la inercia térmica global de la instalación $\frac{M C_p}{U S}$ (seg) en el que S es el área exterior (m^2) es decir que puede officiar de mecanismo regulador para determinados casos.

VII. Elección del colector

Determinado el valor $\bar{\psi}$ del mes de peor situación se buscará un colector en que $\bar{\eta}$ sea un valor positivo. Lo razonable, aunque depende de las circunstancias, el valor de $\bar{\eta}$ no debe ser inferior a 0,3. Por esta razón es imprescindible el conocimiento de la ecuación de comportamiento del colector a emplearse en una instalación.

VIII. Determinación del área de colección

Para cada mes y cada pendiente del colector se puede encontrar:

$$S_{\bar{\eta}} = \frac{M C_p (t_f - t_i)}{\bar{H}_T} \quad (24)$$

donde:

$S_{\bar{\eta}}$ es el área de colección

$\bar{\eta} = f(\bar{\psi})$

M es la masa total de agua a calentar en 1 día.

Cabe hacer notar que para la época más fría del año $\bar{\psi}$ toma los valores mayores y consecuentemente en un colector dado $\bar{\eta}$ los menores.

Por ello resulta necesario buscar en estos meses la mejor orientación para el plano de colección de modo que \bar{I}_T sea grande (y disminuya $\bar{\psi}$, aumentando $\bar{\eta}$) y que \bar{H}_T sea lo mayor posible para que S sea menor.

También puede orientarse el colector al oeste de modo que su amanecer sea con temperaturas ambiente más altas. En este caso la determinación de $\bar{\psi}$ no es ya

con \bar{t}_a .

IX. Sistemas con intercambiador

Cuando es necesaria la inclusión de un intercambiador en el sistema, por razones de heladas o mala calidad del agua, se lo puede considerar a éste como una carga térmica adicional al sistema (7). Más precisamente ahora será:

$$\bar{\eta} = \frac{F' U_i S_i}{1 + \frac{F' U_i S_i}{U_i S_i}} \left\{ \alpha \tau - \frac{U}{T_T} \left(\frac{t_i + t_f}{2} - \bar{t}_a \right) \right\} \quad (25)$$

donde S_i es el área del intercambiador y U_i es su coeficiente global de transferencia de calor ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$). Es de hacer notar que cuanto mayor sea $S_i U_i$, más se acercará al caso sin intercambiador. La Ec.25 tiene valor para los casos en que el caudal másico de cada fluido multiplicado por su calor específico sean iguales entre sí, situación que se manifiesta como de equilibrio en los circuitos por termosifón. Cuando esta igualdad no se cumple, el rendimiento disminuye aún más.

Conclusiones

Los procedimientos presentados resultan en la práctica sistematizables y aunque aparentemente tienen cierta complejidad, son bastante más simples que los habitualmente disponibles, y pueden emplear datos medios estadísticos de amplia difusión.

BIBLIOGRAFIA

1. IAS/FABA. Informe Completo Programa CESAD. SEDUV. (1979)
2. Estadísticas Climatológicas 1951-1960, Servicio Meteorológico Nacional 5ta. Edición
3. E. Crivelli y M.A. Pedregal, Cartas de radiación de la República Argentina, Meteorológica, Vol. III (1972)
4. A.T. Rapallini y H. Grossi Gallegos, Proyecto. Banco de Prueba de Colectores Solares, Centro Espacial San Miguel, CNIE, San Miguel (1978)
5. J.E. Hill, Proposed Method of Testing for Rating Solar Collectors Based on Thermal Performance, National Bureau of Standards, Workshop of Solar Collectors, New York, U.S.A. (1974)
6. J.L. Guerrero, Curso "Energía Solar y Diseño Térmico" D3, IAS/FABA, La Plata (1978)
7. F. De Winter, Heat Exchange Penalties in Double Loop Solar Water Heating Systems, ISES'75, Los Angeles, U.S.A. (1975)
8. P.J. Lunde, Prediction of Average Collector Efficiency Center, Hartford, Connecticut, U.S.A. (1976)