

MODELO NUMERICO PARA EL CALCULO DE SUPERFICIES  
OPTIMAS DE COLECCION SOLAR PLANA

Rodolfo O. fernández  
SMAR S.A.I.C. Bmé. Mitre 5354  
1678 - CASEROS - ARGENTINA

Resumen

A partir de los datos de radiación solar global en la superficie horizontal se calcula la cantidad de radiación que llega a una superficie arbitrariamente orientada.

Con los parámetros de diseño mecánico y óptico de los colectores solares y con la carga térmica calculada mensualmente, con variación de la temperatura del agua de entrada, se calcula el calor útil dado por los colectores y sus pérdidas.

Se deriva de esto el factor de carga solar y la energía auxiliar requerida, los resultados obtenidos se comparan económicamente con equipos convencionales a gas licuado y electricidad.

Se calcula la inversión equivalente anual y el costo total del ciclo de vida.

## 1- Introducción:

La simulación de sistemas solares por medio de computadora, tiene varias ventajas; primero, el tiempo necesario para efectuar una prueba se minimiza al utilizar una computadora digital. Segundo, permite efectuar un estudio detallado de los procesos dinámicos en un colector solar en presencia de diferentes climas, sin hacer ensayos in-situ. Tercero, se puede usar el modelo como método de diseño mecánico, pues se puede efectuar un análisis de sensibilidad, variando diferentes parámetros en forma simulada, y calcular los cambios en los rendimientos del colector.

El estudio que se presenta, fué realizado con el objeto de poder diseñar rápidamente un colector solar, analizar la incidencia en los costos de los cambios en las componentes del equipo y la influencia que tienen los cambios introducidos en el comportamiento del sistema.

Además de un modelo estrictamente físico, se tuvieron en cuenta las variables económicas a través de un estudio de costos y amortizaciones, con cálculo de ahorros, inversiones anuales equivalentes y costos totales del ciclo de vida de un calefón solar.

Este modelo, ha sido aplicado también al diseño de grandes instalaciones de energía solar, donde ha probado ser de enorme utilidad dada la posibilidad de optimizar todos los parámetros de diseño en beneficio de una amortización o retorno de la inversión mas rápida.

## 2- Modelo de simulación

El modelo utilizado, se fundamenta en un trabajo previo (1). El sistema solar utilizado, consta básicamente, para el caso de instalaciones domiciliarias, de colectores solares planos y un tanque de acumulación de agua. El equipo se simula instalado, funcionando en condiciones normales de termosifón y al aire libre con una situación climatológica variable, tal como las condiciones naturales.

Partiendo de la ecuación de Hottel-Whillier (2) donde la cantidad de calor útil es

$$Q_d = F_R A [H_T (\tau \alpha)_{ef} - U_L (T - T_a)] \quad -1-$$

en función de los parámetros  $F_R$  y  $U_L$  del colector solar; el modelo genera a través de subrutinas estos valores, partiendo de datos de radiación solar global, temperatura ambiente, y datos físicos del colector.

El equipo solar simulado, tiene capacidad de tanque y area de colección va-

estables, habiéndose fijado únicamente como punto de partida el consumo de agua caliente y la temperatura de la misma a la salida de los equipos solares. El modelo de por sí y mediante el cálculo iterativo del ahorro y amortizaciones producidas, optimiza las áreas y capacidades de almacenamiento.

La capacidad de tanque, se ha tomado variable, partiendo del valor de 65 litros de agua por metro cuadrado, y se varía hacia un sentido y otro. En el caso de capacidades mayores, no se adicionan deterioros al rendimiento del equipo. Por debajo de esa capacidad, hay un deterioro variable, tanto mayor cuanto más grande sea el apartamiento del valor dado.

Los colectores solares, durante las horas diurnas, entregan energía al tanque, el cuál la acumula para el momento en que la demanda de agua caliente así lo requiera. En este modelo, no se ha tenido en cuenta la estratificación del tanque, lo cual trae aparejado un error de poca magnitud (3 a 4 %) El balance de energía del tanque viene dado por

$$M C_p \frac{dT}{dt} = Q_d - Q_w + E_w \quad -2-$$

donde  $Q_d$  es la cantidad útil entregada por los colectores,  $Q_w$  es la carga térmica debida al consumo de agua, y  $E_w$  la energía auxiliar necesaria para suplementar el funcionamiento, si se dan condiciones de clima adversas.

Una de las variables más críticas, es la carga térmica a ser colocada en el edificio, se hicieron varios ensayos, pero la definición se obtuvo luego de una serie de ensayos y mediciones en viviendas particulares. De estos ensayos surgió una constancia en los valores de consumo de agua caliente, habiéndose fijado este valor en 45 litros diarios por persona.

Los equipos se someten en el modelo, a una carga constante e invariante a lo largo de un año; la carga térmica, en cambio, se toma variable y modulada por la temperatura ambiente. En los meses de invierno, la temperatura del agua de alimentación de los tanques, se toma en valores sensiblemente inferiores a los de verano. Se ha supuesto, debido a la frecuente alimentación de equipos solares desde tanques de reserva a la intemperie, que la temperatura de entrada de agua a los equipos es

$$T_w = T_a - 2^\circ\text{C}$$

donde  $T_w$  es la temperatura del agua en el tanque de reserva y  $T_a$  la del ambiente.

La energía auxiliar,  $E_w$ , se calcula como el suplemento necesario para tener un suministro de agua predeterminado.

El análisis se efectúa en forma anual, y en consecuencia, se deberán inte -

grar las ecuaciones anteriores en el tiempo, sobre un período  $\Delta t$

$$M C_p \int_{\Delta t} \frac{dT}{dt} dt = \int_{\Delta t} Q_d dt - \int_{\Delta t} Q_w dt + \int_{\Delta t} E_w dt \quad -3-$$

Llamando

$$L = \int_{\Delta t} Q_w dt \quad -4-$$

$L$ , es la carga térmica en ese período de tiempo. También

$$E = \int_{\Delta t} E_w dt \quad -5-$$

reemplazando además -1- en -3- y poniendo que

$$f = \frac{L-E}{L}$$

queda

$$f = \frac{F_R A}{L} \int_{\Delta t} [H_T (\mathcal{T}\alpha)_{ef} - U_L (T - T_a)] dt \quad -6-$$

si el período de integración es lo suficientemente largo, por lo menos de un mes, el término de la izquierda de -3- se puede despreciar por ser suficientemente pequeño ante los demás términos de la ecuación.

Dividiendo la ecuación en dos partes, e introduciendo variables adimensionales, queda

$$Y = \frac{F_R A}{L} \int_{\Delta t} H_T (\mathcal{T}\alpha)_{ef} dt = \frac{F_R A}{L} S (\overline{\mathcal{T}\alpha}) \quad -7-$$

donde  $S$  es la radiación solar global sobre la superficie inclinada en ese período de tiempo. La barra sobre  $(\mathcal{T}\alpha)$  indica promedio.

$$Z = \frac{F_R A}{L} \int_{\Delta t} U_L (T - T_a) dt = \frac{F_R A}{L} U_L (T_{ref} - \overline{T_a}) \quad -8-$$

donde  $T_{ref} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $T_a$  es el promedio mensual de temperatura ambiente.

La primer variable adimensional ( $Y$ ), es el cociente entre la energía absorbida en los colectores solares y la carga térmica; la segunda ( $Z$ ) es la energía perdida dividida por la carga térmica.

Según la bibliografía existente, hay una correlación entre el factor de carga y estas variables. En nuestro modelo, se ha asumido que

$$f = ay + bz + cy^2 + dz^2 + gy^3 \quad -9-$$

Los coeficientes surgieron de un análisis de regresión efectuado con datos experimentales de los colectores solares.

Previamente se había intentado utilizar los coeficientes derivados de una regresión efectuada entre el factor de carga y las variables Y y Z para una casa solar en Denver, U.S.A., pero luego de los primeros ensayos, resultó evidente que dicho método daba valores muy altos para las superficies colectoras. Se efectuó un nuevo cálculo de coeficientes, pero esta vez partiendo de datos experimentales de colectores solares, que se hicieron en la planta de SMAR S.A.I.C.

En correspondencia privada (7), fué analizado el punto y se concluyó que es necesario adecuar el modelo al tipo de colector utilizado.

Los parámetros  $F_r$  y  $U_L$  fueron calculados según los procedimientos habituales (3) partiendo de las medidas y parámetros físicos del colector SMAR. El cálculo de  $U_L$  es muy sensible a las hipótesis que se efectúan sobre la temperatura de equilibrio de la placa. En este caso, se hizo un procedimiento iterativo en el cual se parte de una temperatura de prueba de placa y se converge hacia el valor de  $U_L$ .

#### Datos de Radiación Solar

Uno de los aspectos más dificultosos del modelo, es la elección de los datos a ser usados. El período de integración elegido (un mes), determina que el valor promedio mensual es adecuado. El problema es que este valor oculta el hecho de que en meses donde la radiación solar está por encima de lo requerido, esta energía se desperdicia, trayendo aparejada una subutilización de los equipos y una disminución de los rendimientos. Para solucionar el punto, sería necesario usar datos diarios y aún horarios, lo cual es costoso en tiempo de máquina.

Un segundo aspecto se refiere a la confiabilidad de los datos, la cual es altamente dudosa en el caso de los piranómetros. En este caso se usaron únicamente datos solarimétricos, con un error estimado en el 6 al 7 %. Se tomaron seis estaciones del Servicio Meteorológico Nacional en base a las cuales se zonificó el país. (4).

Para proyectar a plano inclinado, se desarrollaron unos coeficientes, pro-

mediados mensualmente, tomando el procedimiento de Liu y Jordan (5). De los valores horarios, se pasó a los diarios y mensuales, a través de un promedio pesado con los valores de radiación solar global tomados en esas estaciones, al efecto se desarrolló una subrutina especial.

El factor de proyección al plano inclinado, será

$$R = \left(1 - \frac{D}{H}\right) R_d + \frac{D}{H} \left(\frac{1 + \cos S}{2}\right) + \rho \left(\frac{1 - \cos S}{2}\right) \quad -9-$$

siendo D y H las radiaciones difusa y global, S el ángulo de inclinación del colector y  $\rho$  la reflectividad de la superficie.  $R_d$  fué calculado con la subrutina mencionada.

#### 4.- Análisis económico

El modelo incorpora un extenso análisis económico por el cual se analiza el comportamiento del colector a la luz del costo de la unidad de energía obtenida del equipo solar.

El factor primordial sobre el cuál gira el análisis es el ahorro producido por el calefón solar. El ahorro es

$$\text{Ahorro} = C_f \sum_1^{12} f \cdot L - \text{Anual} \left[ \frac{\text{Costo}}{m^2} \text{Area} + \text{COSTO FIJO} \right] \quad -10-$$

anual, es un coeficiente que multiplicado por la inversión total inicial, da la inversión equivalente sobre un año, es decir la cuota de capital más interés que corresponde a un año, tomando todos los años a cuota constante.  $C_f$  es el costo del combustible auxiliar.

Al variar de un mes a otro la carga térmica, variará el factor de carga solar,  $f$ , y con un área constante se producirá cierto ahorro. Variando las áreas de colección o mejorando los parámetros del colector, el ahorro anual será tanto mayor, cuanto más eficiente sea el sistema. Esto puede verse en la Figura 1. Hay un punto de inversión óptima, que será función de infinidad de variables, algunas de las cuales fueron tomadas en cuenta en el modelo. En nuestro caso las variables analizadas para optimizar un diseño son treinta y dos.

Se hizo además un análisis comparativo con equipos convencionales a gas licuado, natural y electricidad, del tipo termotanque y calefón. En base a estos resultados se calcularon los ahorros absolutos de combustible, y, por ende, los períodos de amortización de los equipos solares. Además se calculó la inversión equivalente anual de cada sistema, tomando la cuota de capital amortizado al 8 % de interés anual, más el gasto de combusti-

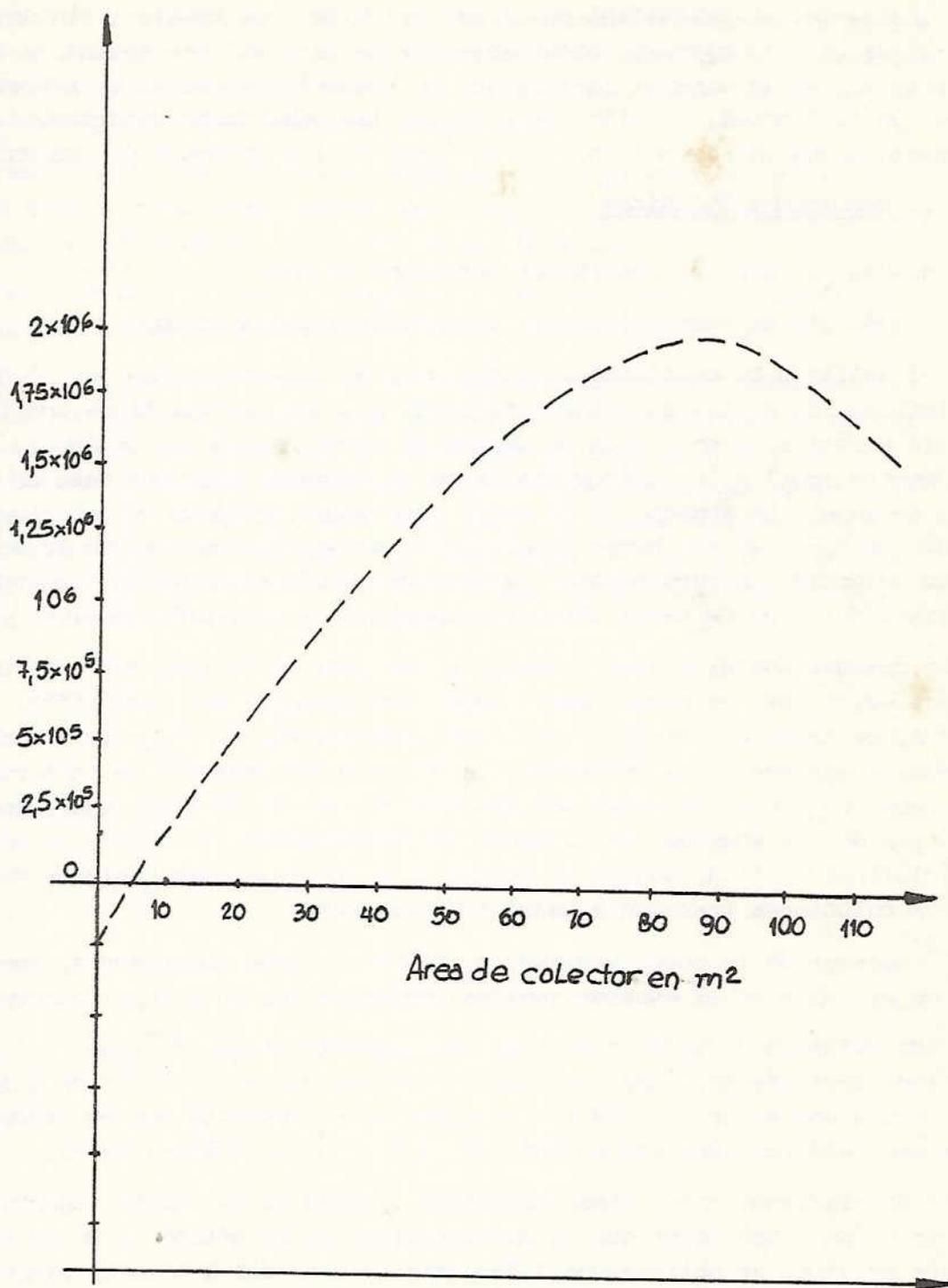


FIG 1

ble auxiliar.

Finalmente, se calculó el costo del ciclo de vida total, a fin de tener en cuenta la inflación de combustible. Al costo total del equipo, o inversión inicial, se le suma el gasto total de combustible auxiliar, inflacionado en un 10 % anual. Lo mismo se hizo con los equipos convencionales. Los procedimientos utilizados son los de norma en los tratados de economía (6).

### 5.- Resultados Obtenidos

Podemos dividir los resultados obtenidos en dos.

El análisis de sensibilidad, y los resultados económicos.

Del análisis de sensibilidad surge que, en primera instancia, el ángulo de inclinación de los colectores respecto a la horizontal tiene una importancia relativa, y se admite un margen de error razonable. Un ángulo aproximadamente igual a la latitud, optimiza la energía sobre una base de utilización anual. Un aumento de 5° sobre este valor, produce un deterioro del orden de 2,2 % en el ahorro anual. Este porcentaje aumenta con la superficie de colección, comprobándose que la inclinación se optimiza haciendo un análisis del tipo de carga térmica a cubrir y su variación anual.

En grandes instalaciones y debido a las características estructurales de los edificios, es generalmente imposible trabajar por termosifón, por lo cual se trabaja a flujo forzado con bombeadores. El flujo dentro de los caños se acelera, y la transferencia de calor por aumento de la turbulencia crece. En todos los casos una duplicación del flujo trajo aparejado una mejora en los ahorros. En el punto de optimización, se mejora en un 20 %. Triplicar el flujo mejora el ahorro en un 29 %. A estos valores de flujo, los colectores trabajan a bajas temperaturas.

El espesor de la chapa absorbente, tiene una gran importancia, pues aumentos del 40 % en el espesor implican mejorías del 30 % en el ahorro.

Todo esfuerzo dirigido a mejorar las características ópticas de la placa, tiene buen efecto, pues disminuir la emisividad en un 22 % (de 0.18 a 0.14) implica una mejora del 29 %. Los aumentos en absorptividad no producen los mismos efectos pues una mejora del 5 % rinde un 2 % en ahorro.

El acoplamiento entre placa colectora y caños es de enorme importancia. Si las uniones son tales que la conductividad de un método es un 10 % mayor que en otro, se obtiene una diferencia a favor del 9 % en el dinero ahorrado anualmente. Todo porcentaje de conductividad entre chapa y caño que se disminuya, repercute en igual medida en la eficiencia del colector.

En lo referente al estudio económico, la primera característica es la influencia del precio de los colectores solares por metro cuadrado en el análisis. Esta magnitud, es de primer orden de influencia, siendo los costos de instalación de segundo orden respecto a aquellos.

Las amortizaciones de los colectores solares son en general variables en períodos de tres a cinco años, siendo sensibles a la zona en la cual se instala el equipo y por ende del nivel de radiación solar.

El precio del combustible que se reemplaza, tiene una obvia influencia. A mayor precio por unidad de energía, más rápido el retorno de la inversión.

El costo total del ciclo de vida, da en todos los casos analizados favorable a los equipos solares, aunque los valores de inflación anual de combustible que se tomaron son irreales. En este caso se tomó un 10 % anual, a tasa constante. La experiencia de los últimos años indica que es razonable calcular un 25 al 30 %. Con estos valores, los costos totales de ciclo de vida son dramáticamente favorables al caso solar. A veinte años de plazo, los combustibles inflacionados al 25 % anual deben ser multiplicados por 87, para obtener el precio en ese momento.

## BILIOGRAFIA

- (1) S.A. Klein, W.A. Beckman y J.A. Duffie. "A design procedure for solar heating systems. Solar Energy, Vol. 18, N° 2 (1976).
- (2) H.C. Hottel, A. Whillier, "Evaluation of flat plate solar collectors performance". Trans. of the Conference on the Use of Solar Energy. University of Arizona (1965).
- (3) J.A. Duffie, W.A. Beckman. " Solar Energy Thermal Processes". Willey Interscience. (1973).
- (4) M. de Kurlat, Rodolfo O. Fernández. " Radiación Solar Global en la Argentina ", Acta Scientifica N° 19, (1970).
- (5) B.Y.H. Liu, R.C. Jordan. " The long term average performance of flat plate collectors". Solar Energy, Vol. 7, N° 2 (1963).
- (6) José Gonzales Gale. " Intereses y Anualidades ciertas ". Ediciones Mauchi. Buenos Aires, (1973).
- (7) Francis de Winter, Altas Corporation, California, USA, Correspondencia privada.