

PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS SOLARES DE CALENTAMIENTO DE AGUA A LARGO PLAZO

José Luis Duomarco

duomarco@adinet.com.uy

A.I.U.

Montevideo, Uruguay

Resumen. La norma ISO 9459-2 se aplica a sistemas domésticos de calentamiento de agua, sin calor auxiliar, con una sola extracción diaria a la puesta del sol y con un depósito de a lo sumo 600 litros, para predecir su desempeño anual, en cualquier clima y condición de operación. Se sigue un procedimiento de “caja negra”, sin suposiciones sobre las características del sistema en estudio (termosifón, circulación forzada, captador depósito integrado, etc.). Los perfiles de comportamiento del sistema solar se obtienen a partir de los resultados de tres ensayos especiales. Con dichos resultados se ingresa a un software, suministrado por la propia norma, para realizar la simulación numérica, día por día los 365 días del año, del comportamiento del sistema solar en el lugar requerido. La norma prevé dos esquemas de consumo diferentes. En el esquema 1 se realiza una extracción diaria de volumen constante con temperatura variable. En el esquema 2 se realiza una extracción de temperatura constante y volumen variable. Últimamente se han considerado otros dos esquemas de consumo, para ser utilizados en la evaluación del rendimiento de sistemas. Los esquemas 3 y 4 fijan un volumen de extracción nominal y una temperatura nominal, de forma de tener acotada la energía extraída nominal diaria. Las condiciones diarias del clima se reflejan en la temperatura de extracción, superior o inferior al valor nominal previsto. Si es inferior, para cumplir con el valor previsto de temperatura del agua caliente será preciso suplementar con otra energía auxiliar. Si es superior, se plantea una situación de sobrecalentamiento, subsanable en forma diferente para el esquema 3 que para el esquema 4. En los dos casos parte de la energía captada es rechazada. En este trabajo se desarrolló un software para ser utilizado con el esquema 4 de consumo.

Palabras clave: Energía Solar, Normativa

1. INTRODUCCIÓN

La Organización Internacional de Normalización (ISO) ha producido normas sobre el ensayo de colectores y sistemas solares. Una de ellas es la norma ISO 9459-2 referida al ensayo a la intemperie de sistemas sin aporte auxiliar de calor, con un volumen de acumulación de hasta $V_S = 600$ litros y con una extracción diaria a la puesta del sol. La norma describe tres ensayos especiales y da el algoritmo de cálculo utilizado para calcular la predicción del rendimiento a largo plazo de un sistema solar térmico.

El primer ensayo permite determinar la captación de calor (Q_T) por el agua en el colector solar, en función lineal (5) de la radiación solar incidente (G_T) y de la pérdida de calor al ambiente $U_L(T_S - T_a)$.

El segundo ensayo permite determinar las evoluciones de la temperatura del agua de extracción normalizada $f(V_c)$ y la temperatura del agua de extracción de mezcla normalizada $g(V_c)$. Un volumen de agua igual a tres volúmenes de acumulación ($3V_S$), se extrae del sistema en este ensayo. El perfil de la temperatura de extracción (T_d) cuantifica la estratificación en el tanque, como resultado de la mezcla del agua caliente del acumulador, con el agua fría que ingresa y sustituye al agua caliente que se extrae. El perfil de la temperatura de extracción de mezcla se obtiene al extraer agua del sistema, previamente calentado en forma uniforme a alta temperatura. La normalización se realiza calculando el porcentaje de la energía total extraída en tres volúmenes de acumulador, contenida en 30 décimos del volumen del acumulador, extraídos en secuencia (12).

El tercer ensayo permite determinar el coeficiente de pérdida de calor al ambiente del tanque acumulador (U_S) a ser utilizado en el cálculo de la pérdida de calor nocturna (Q_{lost}) (15).

El algoritmo para evaluar el rendimiento a largo plazo está basado en la utilización de series de temperatura máxima, mínima y de radiación solar sobre plano horizontal. Se debe destacar la característica de ser series simultáneas y diarias, lo que habilita estudiar el juego del intercambio energético entre el colector y el acumulador de calor, con un primer nivel de detalle.

El caso en estudio, es un sistema solar funcionando en Montevideo localizado, $34^{\circ}53'$ latitud S y $56^{\circ}09'$ longitud O y con datos meteorológicos satelitales, disponibles en Internet provenientes del proyecto “Surface Meteorology and Solar Energy” (NASA, 2010). Se utilizan series diarias de temperatura ambiente máxima, mínima y de radiación solar global sobre plano horizontal del año 2010.

2. ANTECEDENTES SOBRE EL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

El procedimiento de cálculo propuesto en la norma ISO 9459-2 incluye 2 *esquemas* de consumo diferentes. En el *esquema 1*, el consumo se determina por un volumen constante de extracción diario y temperatura variable. En el *esquema 2* el consumo se determina por una mínima temperatura constante de extracción y volumen variable. Cuando la temperatura es inferior a ese valor mínimo, no se extrae agua del acumulador, por el día.

El CSTG (Collector and System Testing Group) de la Comunidad Europea ha aceptado también el *esquema 3* de consumo, desarrollado por Bourges *et al.* (1991). Se fijan una temperatura nominal (T_{dn}) y un volumen nominal de extracción (V_{dn}), para cumplir con una cota nominal de calor (Q_{dn}) a extraer diariamente (2). Si durante la extracción $T_d < T_{dn}$, se extrae un volumen V_{dn} . Si $T_d > T_{dn}$ se supone la existencia de una válvula mezcladora regulada a la temperatura nominal (T_{dn}), con una extracción de volumen tal que el calor extraído esté limitado por la cota nominal.

El *esquema 4*, utilizado en nuestros cálculos, introduce en la propuesta del CSTG y cuando $T_d > T_{dn}$ la utilización de una pantalla que regula la captación solar para que el calor extraído esté limitado por la cota nominal (2). Cuando $T_d < T_{dn}$ se calcula el déficit energético a ser completado por la fuente auxiliar (18). Aparte de la diferencia operativa, para tratar el tema del sobrecalentamiento, los *esquemas 3 y 4* son equivalentes.

Se ha observado por Carvalho *et al.* (2000), que la extracción anual de calor por el sistema en el *esquema 3 o 4*, es inferior a la del *esquema 1*, pero superior a la del *esquema 2*.

La prospectiva planteada requiere de tres series de valores diarios simultáneos, de temperaturas máximas, mínimas y de radiación sobre el plano frontal del colector plano, con un horizonte mínimo de un año. Las series pueden ser reales o estadísticamente típicas.

La aplicación del procedimiento con series de diferentes lugares permite prever el comportamiento del mismo sistema solar en diferentes lugares.

3. APLICACIÓN A LA CIUDAD DE MONTEVIDEO

En la Fig. 1 se representan los valores de energía solar diaria incidentes sobre el plano del colector, orientado al ecuador e inclinado 35° . A partir de la radiación sobre plano horizontal, se calcularon las componentes de energía solar directa, difusa y de albedo de la radiación total, por un método de difusa isótropa.

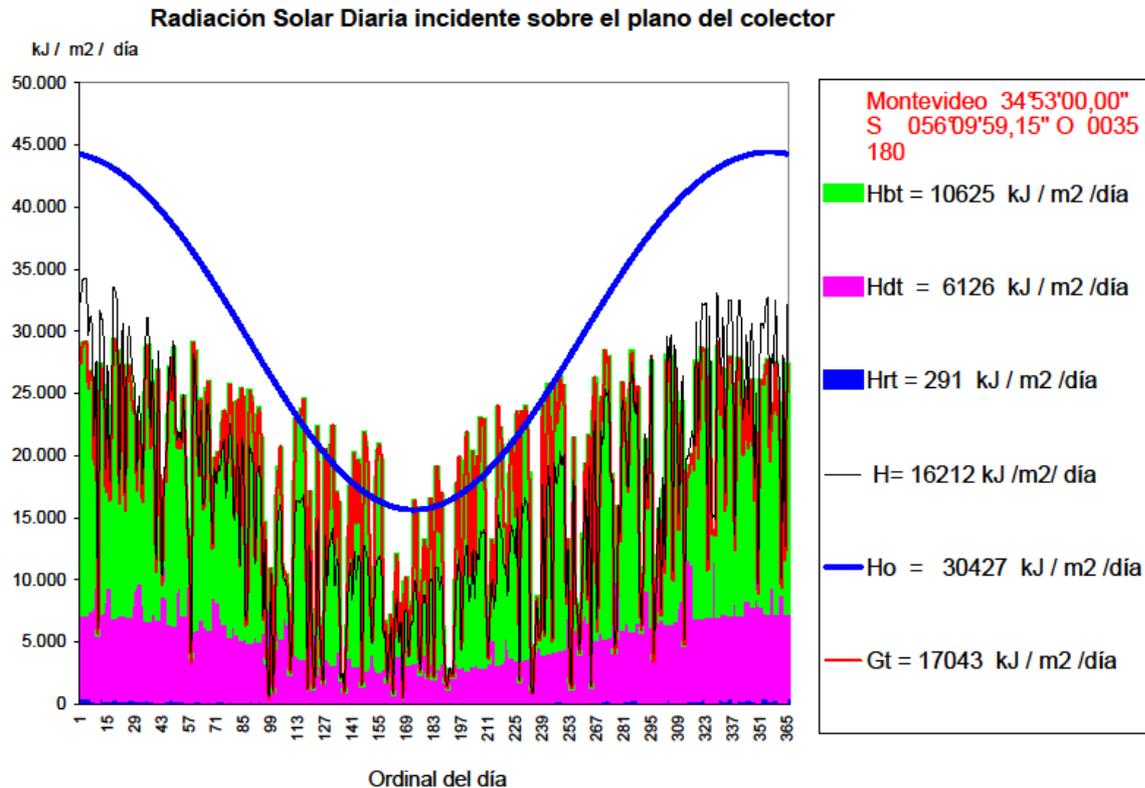


Figura 1 – Radiación Solar diaria incidente sobre el plano del colector

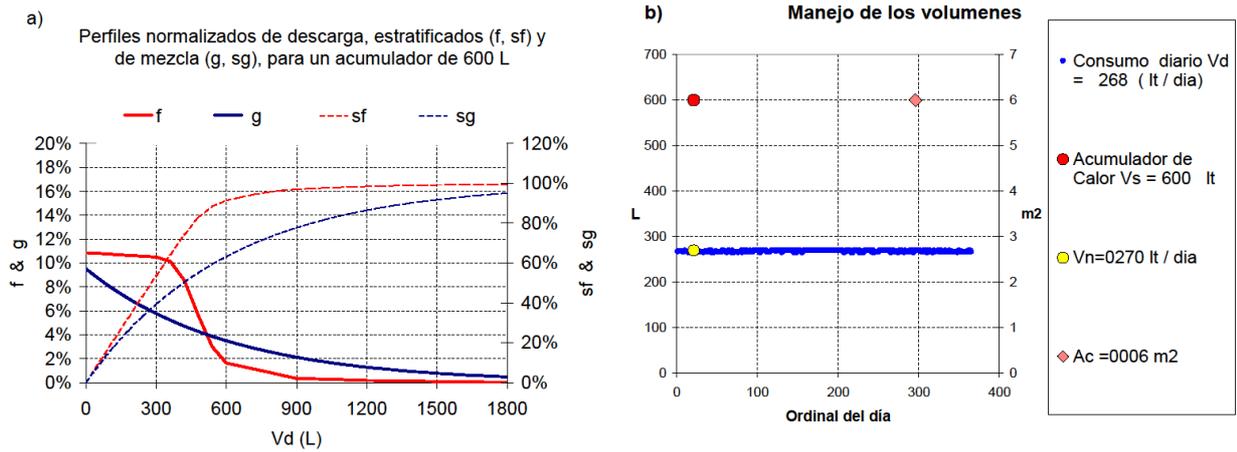


Figura 2 - a) Perfiles normalizados de descarga, estratificada (f, sf) y de mezcla (g, sg), para un volumen de tanque de acumulación $V_s = 600$ litros. b) Volumen diario de extracción V_d para un volumen nominal de extracción $V_{dn} = 270$ lt.

En la Fig. 2 se representan los perfiles normalizados de la descarga, estratificada f y de mezcla g, junto con sus perfiles acumulados sf y sg. Son curvas características de la forma en que se realiza la mezcla del agua caliente en el tanque con el agua fría entrante para sustituir al agua extraída. Entre otros muchos factores puede depender de la orientación del tanque acumulador cilíndrico, horizontal o vertical.

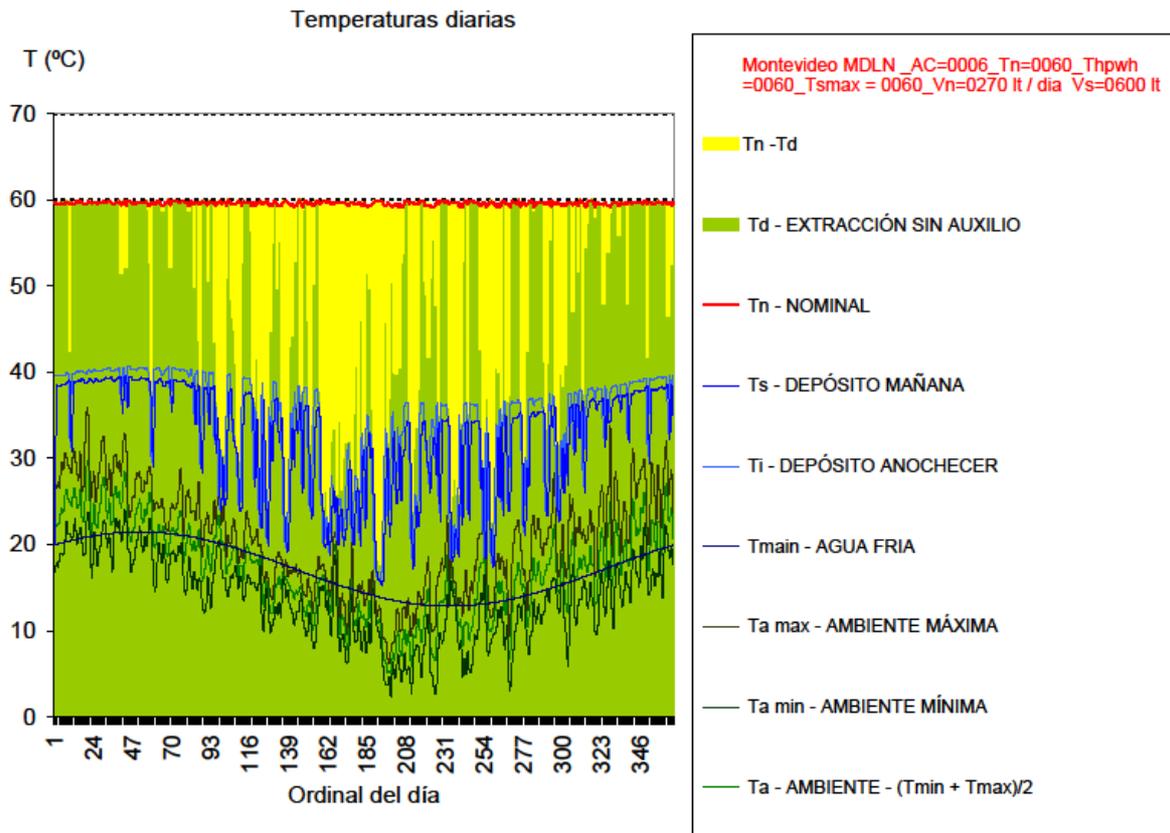


Figura 3 - Gráfico de temperaturas promedio diarias.

En la Fig. 3 se representan: a) la temperatura del agua extraída, previa a recibir un complemento energético desde la fuente auxiliar, para acercarse a la temperatura nominal, b) las temperaturas ambiente, máximas mínimas y medias, c) la temperatura del agua fría, d) las temperaturas del agua en el tanque acumulador luego de la extracción vespertina y en la mañana siguiente, antes de recibir sol.

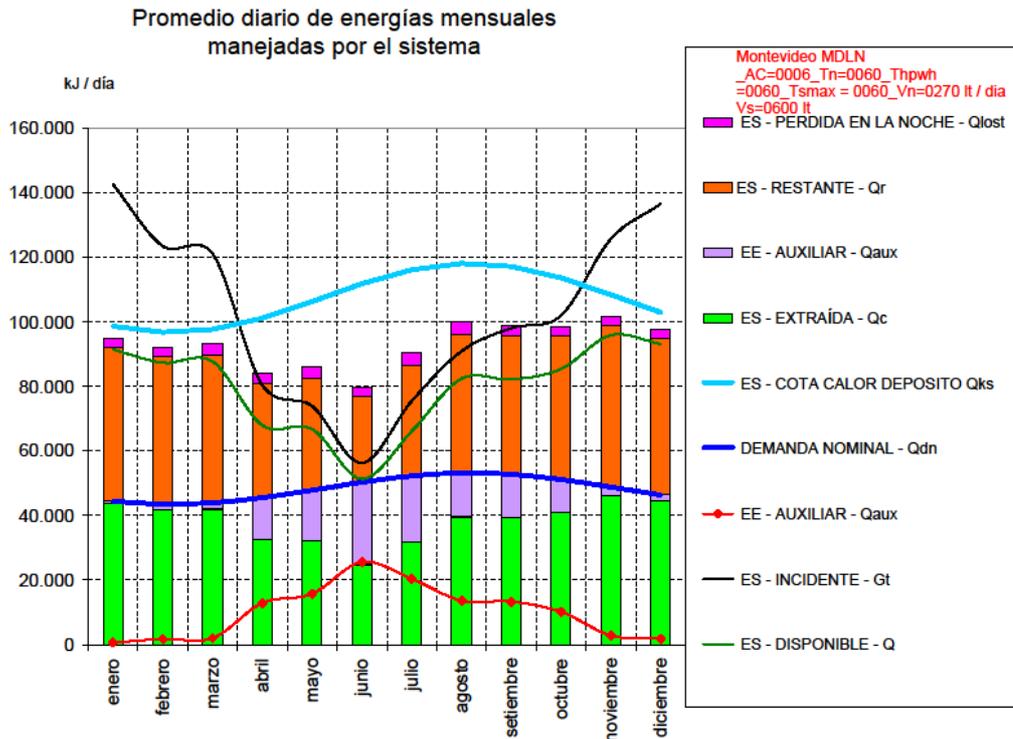


Figura 4 – Gráfico de energías diarias, promedio mensual manejadas por el sistema

En la Fig. 4 se representan, entre otras: a) la energía solar extraída, b) la energía solar remanente en el acumulador para el día siguiente, c) la energía solar disponible, suma de las anteriores y d) la energía auxiliar suficiente para completar la demanda nominal

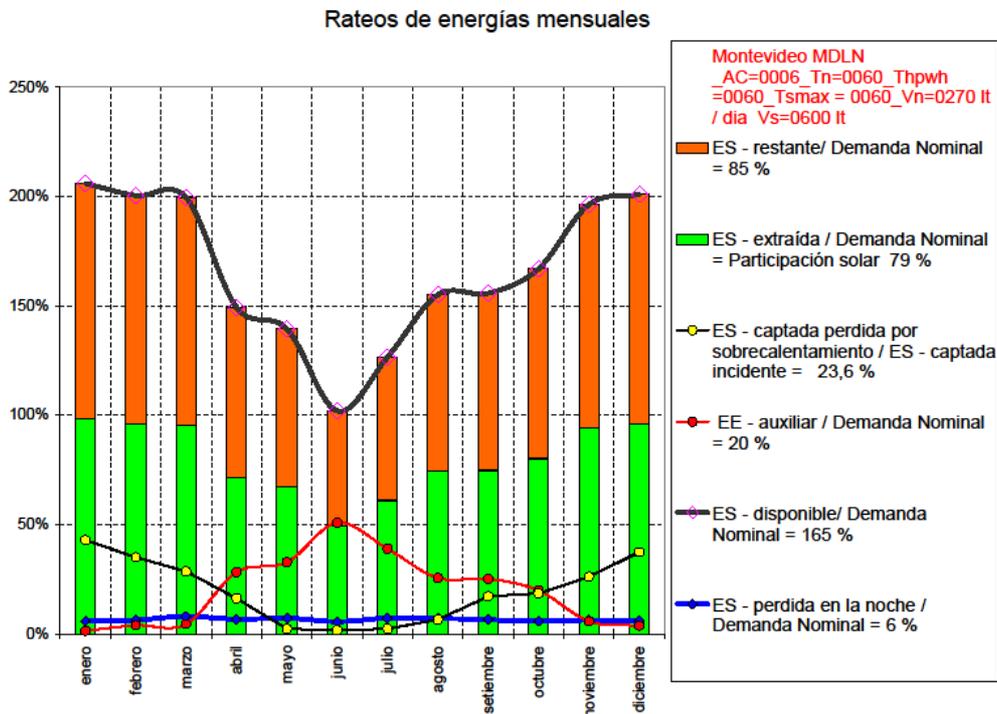


Figura 5 – Gráfico de rateos energéticos mensuales

En la Fig. 5 se representan los porcentajes de la energía disponible, de la energía extraída, de la energía restante, de la energía auxiliar y de la energía perdida respecto de la demanda nominal. También aparece el porcentaje de la captada inútil respecto de la captada incidente.

Tabla 1
Nomenclatura (i identifica al día)

T_{S_i}	Temperatura del agua en el depósito antes de la extracción, igual a la temperatura de ingreso al colector.	°C	$g(V_c)$	Perfil de temperatura de extracción con mezcla, sin estratificación, normalizado	% / 100.
T_{main_i}	Temperatura de suministro del agua fría	°C	Q_{dT_i}	Calor sensible contenido en el volumen V_c de extracción sin mezcla	kJ / día
Q_{T_i}	Energía solar captada por el agua en el colector inclinado	kJ / día	V_{c_i}	Volumen del consumo	L / día
$F_R(\tau\alpha)$	Factores de remoción de calor, absorción y transmisión para el colector	0.6967 %/100	Q_{dS_i}	Calor sensible contenido en el volumen V_c de extracción con mezcla	kJ / día
G_{T_i}	Energía solar incidente en la superficie frontal del colector inclinado	kJ/m ² /día	Q_{R_i}	Calor remanente en el depósito después de la extracción.	kJ / día
A_c	Area de captación del colector	6 m ²	T_{i_i}	Temperatura del depósito al anochecer luego de la extracción	°C
$F_R U_L$	Factor de remoción de calor y coeficiente de pérdida de calor para el colector	5.6508 W/m ² / C	Q_{lost_i}	Pérdidas de calor por el depósito en la noche	kJ / día
T_{max}^a	Máxima temperatura diaria del aire ambiente diurno	°C	T_{min}^a	Mínima temperatura diaria del aire ambiente nocturno	°C
Q_{S_i}	Calor sensible en el depósito referida a T_{main}	kJ / día	U_S	Coefficiente de pérdida de calor del depósito	3.872 W / °C
V_S	Volumen del depósito	600 litros	ΔT_i	Horas nocturnas	h
ρ_w	Densidad del agua	1 kg/lt	Q_{dn_i}	Calor extraído nominal	kJ / día
C_{p_w}	Calor específico del agua a presión constante	4.1868 kJ/kg°C	V_{dn}	Volumen de extracción nominal	L / día
Q_i	Energía disponible en el sistema	kJ / día	T_{dn}	Temperatura de extracción nominal	60 °C
r_i	Factor de sobrecalentamiento o de pantalla solar	% / 100	Q_{d_i}	Extracción de calor	kJ / día
T_{d_i}	Temperatura del agua de extracción.	°C	Q_{aux_i}	Calor auxiliar de complemento	kJ / día
$f(V_{c_i})$	Perfil de temperatura de extracción con estratificación normalizado	% / 100	T^{aa}	Temperatura ambiente máxima o mínima anual.	°C

4. ALGORITMO PARA CALCULAR EL ESQUEMA 4

- a. PASO 1 - Temperatura del agua fría y calor extraído nominal. El subíndice i identifica al día del año.

$$T_{main_i} = \frac{(T_{max}^{aa} + T_{min}^{aa})}{2} + \frac{0.35(T_{max}^{aa} - T_{min}^{aa})}{2} \cos\left(\frac{2\pi(i-51)}{365}\right) \quad (1)$$

$$Q_{dn_i} = V_{dn} \rho_{\omega} c_{p\omega} (T_{dn} - T_{main_i}) \quad (2)$$

- b. PASO 2 – Calor disponible 6 horas después del mediodía solar.

$$T_{S_{i=1}} = T_{main_{i=1}} \quad (3)$$

$$T_{S_{i+1}} = T_{main_i} + \frac{\left(Q_{R_i} - Q_{lost_i}\right)}{V_s \rho_{\omega} c_{p\omega}} \quad (4)$$

$$Q_{T_i} = F_R (\tau\alpha) G_{T_i} A_c - F_R U_L (T_{S_i} - T_{max_i}^a) A_c \quad (5)$$

$$Q_{S_i} = V_s \rho_{\omega} c_{p\omega} (T_{S_i} - T_{main_i}) \quad (6)$$

$$Q_i = r_i Q_{T_i} + Q_{S_i} \quad (7)$$

- c. PASO 3 – Calor y temperatura de extracción en función del volumen extraído.

$$Q_{dT_i} = Q_{T_i} \int_0^{V_{ci}} f(V) dV \quad (8)$$

$$Q_{dS_i} = Q_{S_i} \int_0^{V_{ci}} g(V) dV \quad (9)$$

$$T_{d_i} = T_{main_i} + \frac{r_i Q_{T_i} f(V_{ci}) + Q_{S_i} g(V_{ci})}{0.1 V_s \rho_{\omega} c_{p\omega}} \quad (10)$$

$$Q_{di} = r_i Q_{dT_i} + Q_{dS_i} \quad (11)$$

$$f(V_j) = \frac{\rho_{\omega} c_{p\omega} \frac{V_S}{10} \left[T_d(V_j) - T_{main} \right]}{\sum_{j=1}^{30} \rho_{\omega} c_{p\omega} \left[T_d(V_j) - T_{main} \right] \frac{V_S}{10}} \quad (12)$$

d. PASO 4 – Resumen del día y contribución para el día siguiente (i+1)

$$Q_{Ri} = Q_i - Q_{di} \quad (13)$$

$$T_{ii} = T_{main_i} + \frac{Q_{Ri}}{V_S \rho_{\omega} c_{p\omega}} \quad (14)$$

$$Q_{lost_i} = V_S \rho_{\omega} c_{p\omega} (T_{ii} - T_{min_i}^a) * \left[1 - \exp\left(-\frac{U_S \Delta t_i}{V_S \rho_{\omega} c_{p\omega}}\right) \right] \quad (15)$$

$$Q_{aux_i} = Q_{dn} - Q_{di} \quad (16)$$

e. PASO 5 - Aumentar $Q_{di} \uparrow$ por aumento de $V_{ci} \uparrow$ mientras se cumpla $Q_{di} < Q_{dni}$.

$$\text{Si resulta } V_{ci} > V_{dn} \text{ o } T_{di} < 0.6 * T_{dn} \Rightarrow V_{ci} = V_{dn}$$

f. PASO 6 – Disminuir $Q_{di} \downarrow$ por disminución de $r_i \downarrow$ mientras se cumpla $T_{di} > T_{dn}$

Reiterar PASO 5 y PASO 6 hasta mantener estable a Q_{di} .

g. PASO 7 – Días posteriores. El procedimiento se reitera con comienzo en el paso 1, para el día i+1 y continua para los 365 días del año.

5. CONCLUSIONES

La norma ISO 9459-2 presenta un software específico para evaluar el comportamiento de un sistema solar a largo plazo, usando *esquemas de carga 1 y 2*. En el *esquema 1* la carga se determina por un volumen de extracción diaria constante y una temperatura variable de acuerdo a la insolación y temperatura del día. En el *esquema 2* la carga se determina por una mínima temperatura útil para el consumo diario de agua caliente, resultando un volumen de extracción variable. Si la temperatura es inferior a lo previsto se anula la extracción para ese día.

Últimamente se han considerado otros dos *esquemas* de carga, para ser utilizados en la evaluación del comportamiento de sistemas de hasta 600 litros de acumulador de calor. Los *esquemas 3 y 4* fijan un volumen de extracción nominal y una temperatura nominal, de forma de tener acotado el calor extraído nominal diario (2).

En el *esquema 3*, si la temperatura de la extracción es inferior al valor nominal, se extrae un volumen nominal de agua. Si la temperatura de extracción fuera superior al valor nominal, se asume la existencia de una válvula, donde se produce una mezcla con agua fría, para obtener los valores nominales.

En el *esquema 4*, si la temperatura de extracción es inferior al valor nominal, se extrae un volumen nominal de agua y se calcula el calor auxiliar necesario para cumplir con la cota nominal de calor prevista. Si la temperatura de extracción fuera superior al valor nominal, se reduce la insolación con una pantalla solar y se ajusta la extracción a los valores nominales.

En este trabajo se desarrolló un software para ser utilizado con el *esquema 4* de consumo. Será posible entonces anualmente,

- ❖ determinar la energía auxiliar para cumplir con la temperatura requerida,
- ❖ determinar la energía solar en exceso, responsable del sobrecalentamiento,
- ❖ determinar la energía solar extraída útil,
- ❖ determinar la energía solar perdida por fugas en la superficie del acumulador,
- ❖ determinar la energía solar remanente en el acumulador para el día siguiente,
- ❖ determinar los rateos energéticos referidos a la cota energética nominal.

Cambiando las series meteorológicas básicas, se podría también estudiar la respuesta de un sistema específico en diferentes ubicaciones geográficas. Si se usaran series estadísticamente típicas, se obtendrían resultados también típicos.

REFERENCIAS

Bourges, B.; Rabl, A.; Leide, B.; Carvahlo, M. J. & Collares Pereira, M. (1991).

Accuracy of the European solar water heater test procedure. Part 1 and Part 2. Solar Energy 47, 1-25

Carvalho, M.J. & Naron D. J. (2000).

Comparison of test methods for evaluation of thermal performance of preheat and solar only factory made systems. Solar Energy, 69 (Suppl.) 145-156

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2009).

Calentamiento solar. Sistemas de calentamiento de agua sanitaria. Parte 2: Métodos de ensayo exteriores para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares.

UNIT-ISO 9459-2:1995.

NASA (2010). Surface meteorology and Solar Energy.

<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.

PREDICTION OF LONG-TERM PERFORMANCE OF SOLAR WATER HEATING SYSTEMS

Abstract. *The standard ISO 9459 – 2 establishes test procedures for characterizing the behavior of solar domestic water heating systems operated without auxiliary boosting and for predicting annual performance in any given climatic and operating conditions, but only for an evening draw-off. Results from test are used in a day by day calculation program to determine the long –term thermal performance of solar water heating systems. The hot water demand may be temperature limited or volume limited. Recently two new forms of conducting demand have been considered. In these cases a nominal load temperature and a nominal load volume are specified in order to obtain the energy needed to meet a nominal load. To take into account this new approach a especial software has been developed. The difference between the two new forms of dealing with demand is based in the way overheating is treated.*

Key words: Solar Energy, standards