

Figura 4.2. Simulación de la evolución de la energía eléctrica suministrada a un termo partiendo de dos condiciones iniciales diferentes

La siguiente gráfica muestra el suministro de energía en kWh dado a la resistencia calefactora para alcanzar las temperaturas mencionadas anteriormente y su evolución con el tiempo. Vemos que efectivamente los tiempos de calentamiento son muy inferiores respecto a los de enfriamiento (unos 30 minutos frente a 7-8 horas), por lo que podemos hacer la simplificación de no considerar el enfriamiento durante el período de funcionamiento de la resistencia.

La expresión de la energía suministrada a la resistencia calefactora nos permitirá conocer, sabiendo el precio de la electricidad en €/kWh, estimar el gasto realizado por la instalación en mantener la temperatura del termo. Interesa, por lo tanto, precalentar el agua con el que se alimenta el termo mediante el acumulador solar para reducir dicho gasto.

5. Simulación de la instalación proyectada al completo

El modelo de simulación completo tiene como objeto evaluar el consumo eléctrico del termo eléctrico en los distintos meses del año para una configuración de instalación determinada. Del mismo modo permite conocer las temperaturas en el acumulador y en el termo y el reparto de energías necesario entre el termo y la piscina para evitar sobrecalentamientos en la instalación.

El consumo eléctrico del termo será debido al aporte suplementario energético para satisfacer la demanda eléctrica y a la evaluación de las pérdidas en el mismo por convección al exterior.

El modelo esquemático de la instalación sería el siguiente:

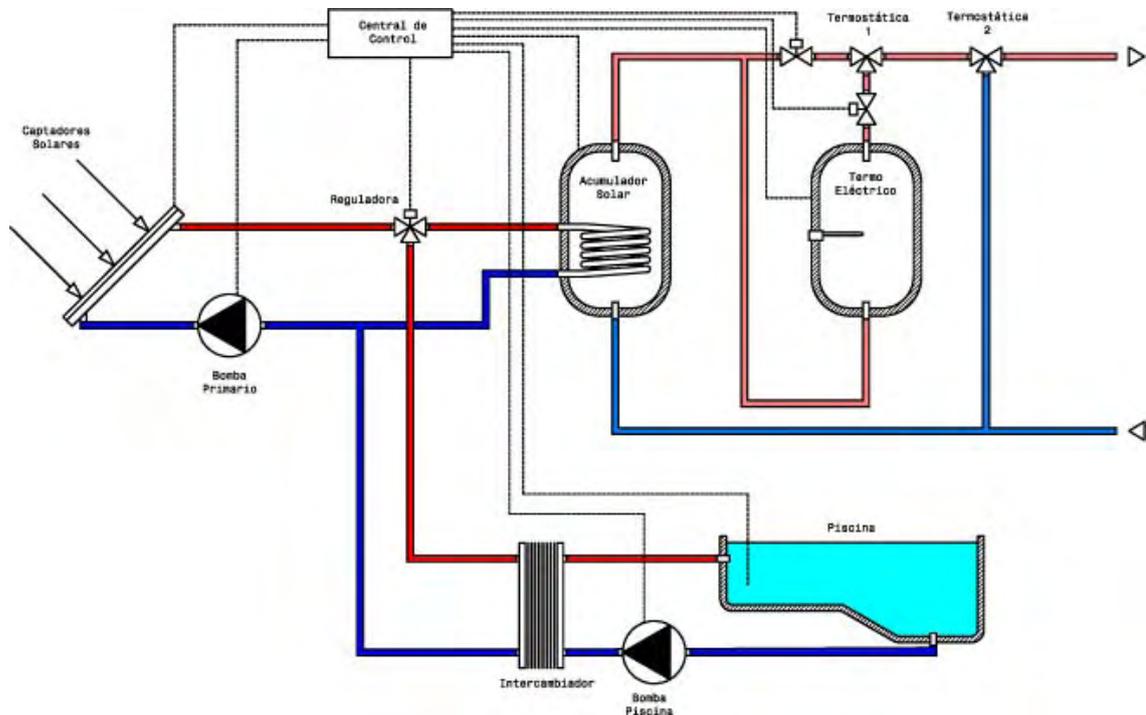


Figura 5.1. Esquema general de la instalación empleada para el modelo de simulación

Para el proceso de simulación seguiremos los siguientes pasos temporales para un mes determinado, de forma que se siga un proceso recurrente que permita evaluar el estado de equilibrio de la instalación para unas condiciones ambientales determinadas.

Utilizaremos la siguiente nomenclatura:

- a₁:** Parámetro lineal de pérdidas en el captador
- a₂:** Parámetro de segundo orden de pérdidas en el captador
- ACS:** Condiciones del consumo de agua caliente (volumen consumido en litros y temperatura de consumo en °C)
- amb:** Condiciones ambiente de la piscina (humedad, temperatura del aire e intensidad del viento)
- b:** Parámetro de pérdidas ópticas en el captador
- E₁:** Energía captada por los paneles en J
- E₂:** Energía perdida por convección en el acumulador en J
- E_{termo}:** Energía suministrada al termo en J
- H:** Energía incidente en J/m²
- I:** Irradiancia en W/m²
- incl.:** Ángulo de inclinación de los captadores en grados
- k:** Factor de corrección por inclinación de los captadores

**Proyecto de Instalación
Solar de ACS en Vivienda
Unifamiliar**

Código: ANEXO-I
Edición: Original
Fecha: 01 ABR 2008
Página: 15 de 25

lat:	Latitud del lugar en grados
S:	Superficie de captadores en m ²
t:	Tiempo de de sol para un día del mes en horas
T_{acumulador}:	Temperatura del acumulador tras el consumo en °C
T_{amb}:	Temperatura media ambiente en un día del mes en °C
T_{conv}:	Temperatura de comparación para la convergencia en °C
T_{lim}:	Temperatura máxima que permitimos en la acumulación en °C
T_m:	Temperatura media de acumulación (media entre T _{res} y T _{max}) en °C
T_{max}:	Temperatura alcanzada por el depósito al final del día, antes del consumo en °C
T_{piscina}:	Temperatura media del agua de la piscina en °C
T_{red}:	Temperatura de agua de la red en °C
T_{res}:	Temperatura del acumulador al comienzo del día siguiente en °C
T_{termo}:	Temperatura del termo en °C
V:	Volumen del interacumulador en litros
η_{panel}:	Rendimiento del panel
η_{perdidas}:	Coefficiente aproximado de corrección para tener en cuenta las pérdidas de la instalación
ξ:	Factor de reparto de energía captada con la piscina (0 – Toda la energía se deriva hacia la piscina, 1 – Toda la energía se almacena en el acumulador)

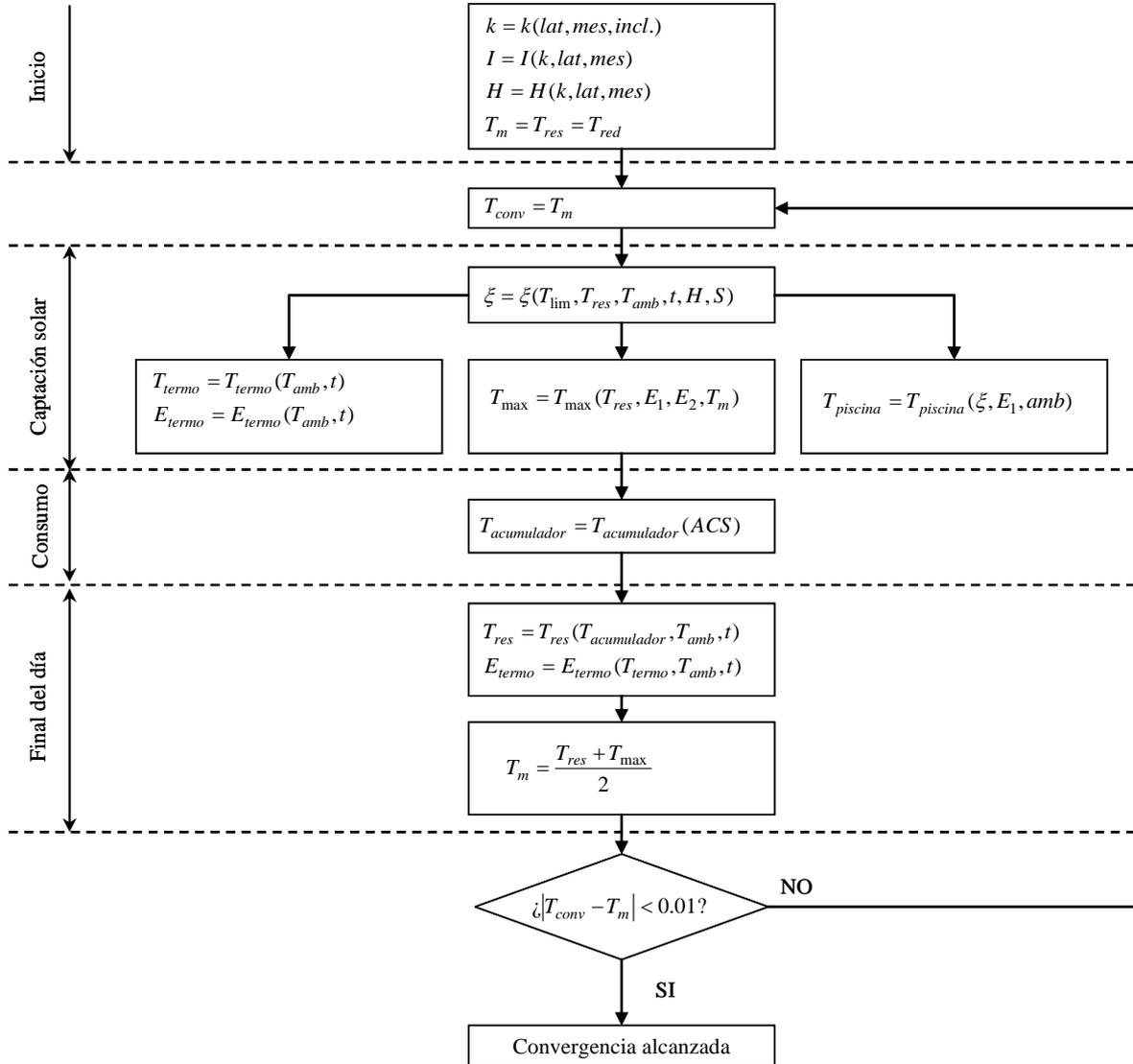


Figura 5.2. Algoritmo seguido por el modelo de simulación

Consideraremos los siguientes bloques de cálculo:

Inicio: Se establecen los valores de partida para los cálculos. Concretamente se calculan:

- Factor de corrección (k) de los captadores para la ubicación, orientación y el mes considerados
- Irradiancia media diaria (I) para la ubicación y el mes considerados, considerando la corrección anterior por orientación de los captadores
- Energía incidente media diaria (H) para la ubicación y el mes considerados, considerando la corrección anterior por orientación de los captadores

- Se asigna un valor inicial a la temperatura del acumulador y de los captadores equivalente al agua de la red de ese mes

Captación Solar: El proceso de simulación para el proceso de captación de energía se hace usando valores medios diarios de energía e irradiación. Para ello se hace uso del valor de temperatura media de los paneles, procedente de la iteración anterior. Como el sistema dispone de un sumidero térmico para el exceso de temperatura en la piscina, el proceso seguido es el siguiente:

- Evaluamos la máxima energía que son capaces de extraer los captadores, E_1 en función de su temperatura media T_m , temperatura ambiente T_{amb} , curva de rendimiento y coeficiente de pérdidas de la instalación a partir de las expresiones

$$\eta_{panel} = 0.94b - a_1 \frac{T_m - T_{amb}}{I} - a_2 800 \left(\frac{T_m - T_{amb}}{I} \right)^2 \quad [5.1]$$

$$E_1 = \eta_{perdidas} \eta_{panel} HS$$

- Calculamos de forma aproximada las pérdidas que sufrirá por convección al exterior el acumulador por estar a una temperatura media T_m a partir del procedimiento descrito en el apartado 3 de este anexo
- Fijando una temperatura máxima a alcanzar límite, establecemos por un proceso de iteración la fracción de E_1 que podemos transmitir a la instalación para maximizar la temperatura en el interacumulador sin hacer que se sobrepase dicha temperatura límite. Denominamos a esa fracción ξ que tendrá valores entre 0 (toda la energía a la piscina) y 1 (toda la energía a la instalación)
- Partiendo de la temperatura del acumulador de la iteración anterior, T_{res} , evaluamos la temperatura alcanzada en el interacumulador a través de la expresión

$$T_{max} = T_{res} + \frac{\xi E_1 - E_2}{4184V}$$

- Evaluamos la energía suministrada al termo eléctrico a lo largo de las t horas del día para mantener su temperatura programada, siguiendo el proceso descrito en el apartado 4 de este anexo
- Teniendo en cuenta la fracción derivada a la piscina, por otro proceso iterativo calculamos la temperatura del agua de la misma, aunque no es un dato relevante, ya que el objeto de la instalación no es climatizar dicha piscina.

Consumo: Conocidas las temperaturas del interacumulador y del termo eléctrico (por simplicidad en el cálculo, estamos suponiendo que el

**Proyecto de Instalación
Solar de ACS en Vivienda
Unifamiliar**

Código: ANEXO-I
Edición: Original
Fecha: 01 ABR 2008
Página: 18 de 25

almacenamiento del agua se hace a temperatura uniforme, por lo que no estamos teniendo en cuenta el efecto de estratificación que se da en los depósitos), procedemos a realizar el consumo proyectado en una sola etapa y evaluamos las temperaturas residuales en ambos depósitos de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 2 de este anexo.

Final del día: Desde el momento del consumo hasta el principio del día siguiente, hacemos los siguientes cálculos:

- El termo eléctrico tiene que alcanzar y mantener su temperatura programada. La energía necesaria para ese proceso se calcula para un período de 24-t horas de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 4 de este anexo.
- El interacumulador pierde energía (y temperatura) durante la noche por convección. La temperatura final después de un período de 24-t horas se calcula de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 3 de este anexo
- Finalizados los cálculos anteriores, calculamos la nueva temperatura media a lo largo del día de los paneles, T_m como valor medio entre T_{res} y T_{max} y lo comparamos con el valor de temperatura de la iteración anterior para comprobar la convergencia. Cuando la diferencia es inferior a una centésima de grado consideramos que hemos encontrado la solución
- Alcanzada la convergencia, la suma de la energía suministrada al termo para mantener la temperatura durante el día, más la necesaria para volver a alcanzar la temperatura programada después del consumo y mantenerla durante la noche es el gasto eléctrico para el día medio del mes considerado.

Para ilustrar el proceso de convergencia, lo haremos con dos ejemplos numéricos, en los que describiremos paso a paso la primera iteración de convergencia y posteriormente a través de gráficas la evolución de los distintos parámetros hasta alcanzar la convergencia.

En el primer ejemplo, consideramos la instalación en el mes de Enero, con los siguientes datos de partida:

Instalación

<i>Termo</i>	<i>Volumen</i>	300 lt
	<i>Potencia</i>	3000W
	<i>Superficie aislada</i>	2.75 m ²
	<i>Espesor aislante</i>	20 cm
	<i>Conductividad aislante</i>	0.04 W/m°C
	<i>Temperatura programada</i>	60° C
	<i>Umbral termostato</i>	5° C

**Proyecto de Instalación
Solar de ACS en Vivienda
Unifamiliar**

Código: ANEXO-I
Edición: Original
Fecha: 01 ABR 2008
Página: 19 de 25

Interacumulador	Volumen	200 lt
	Superficie aislada	2.75 m ²
	Espesor aislante	20 cm
	Conductividad aislante	0.04 W/m°C

Queremos satisfacer un consumo de 360 lt a 45 °C

Inicio

<i>Ubicación:</i>	Madrid (40.4° N)
<i>Captadores:</i>	$a_1 = 4.5$, $a_2 = 0$, $b = 0.8$, incl. = 45° y $S = 7\text{m}^2$ (nos referimos al área total abarcada por los captadores)
<i>k:</i>	1.408
<i>I (corregida):</i>	309.76 W/m ²
<i>H (corregida):</i>	8867584 J
<i>t:</i>	8 horas
<i>T_{amb}:</i>	6° C
<i>T_{termo}:</i>	60° C (temperatura programada)
<i>T_{red}:</i>	6° C
<i>T_{res}:</i>	6° C
<i>T_m:</i>	6° C
<i>η_{perd}:</i>	0.85 (consideramos aproximadamente un 15% de pérdidas en la instalación)

Captación solar

<i>η_{panel}:</i>	75.2%
<i>E1:</i>	39677118 J
<i>E2:</i>	0 J (inicialmente el depósito está a la misma temperatura que el ambiente)
<i>ξ:</i>	1 (toda la energía va al acumulador)
<i>T_{max}:</i>	53.42° C
<i>T_{termo}:</i>	58.59° C (es la temperatura que tiene antes de realizarse el consumo, valor que a lo largo del día ha ido oscilando entre 55° y 60° como se describe en el apartado 4 de este nexo)
<i>E_{termo (1)}:</i>	6276000 J (cantidad de energía que es necesario suministrar al termo para intentar mantener los 60° C durante las 8 horas)

Consumo (usando la nomenclatura del apartado 1 de este anexo)

<i>V₁₁:</i>	228 lt (cantidad de agua del acumulador que alimenta la válvula (1))
<i>V₁₂:</i>	93.9 lt (cantidad de agua del termo que alimenta la válvula (1))
<i>V₂₂:</i>	38.1 lt (cantidad de agua de la red que alimenta la válvula (2))
<i>T_{acumulador}:</i>	6 °C (después del consumo)
<i>T_{termo}:</i>	43.40 °C (después del consumo)

A modo de comprobación de balance energético, se puede ver que antes del consumo, había 300 lt a 58.59° C en el termo, 200 lt a 53.42° C en el acumulador y 360 lt (para el consumo) en la red a 6° C. Esto es, respecto a una referencia a 0° C...

$$300 \cdot 58.59 + 200 \cdot 53.42 + 360 \cdot 6 \approx 3420 \text{ kcal}$$

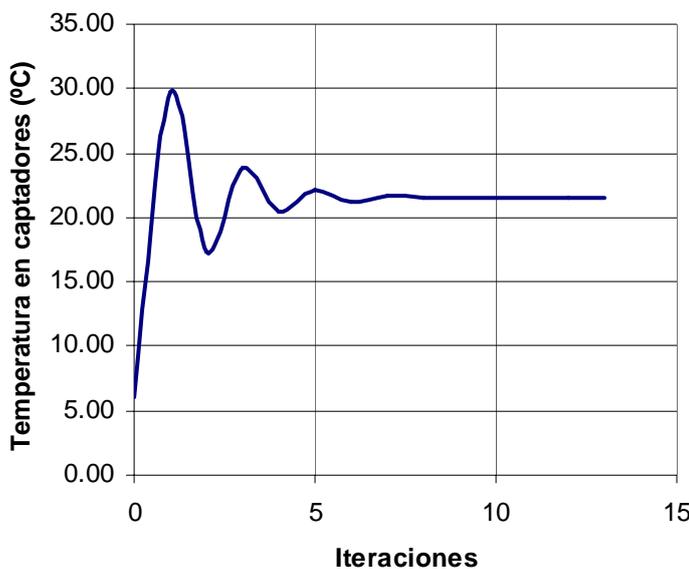
Ahora en el termo hay 300 lt a 43.40° C, en el acumulador 200 lt a 6° C y hemos servido 360 lt a 45° C (consumo). Esto es, respecto a una referencia a 0° C...

$$300 \cdot 43.40 + 200 \cdot 6 + 360 \cdot 45 \approx 3420 \text{ kcal}$$

con lo que vemos que el balance energético es correcto

Final del día (y principio del siguiente)

- $E_{\text{termo}(2)}$: 33389813 J (energía eléctrica suministrada para volver a alcanzar los 60° C programados y mantenerse durante la noche, calculado de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 4 de este anexo)
- $E_{\text{termo}(1+2)}$: 39665813 J (energía eléctrica suministrada durante todo el día)
- $T_{\text{acumulador}}$: 6 °C (después de considerar las pérdidas de la noche. En este caso no ha habido por estar a la misma temperatura que el ambiente). Equivale a T_{res} de la siguiente iteración
- T_{termo} : 58.89 °C (Temperatura después de la noche, al inicio del día siguiente después de haber suministrado $E_{\text{termo}(2)}$ durante la noche para mantener la temperatura). Es el valor con el que iniciaremos la siguiente iteración
- T_m : 29.71° C



Repitiendo el proceso de iteración con los nuevos valores de T_m , T_{termo} y T_{res} , vamos convergiendo los valores. Empleamos T_m como valor de control y detenemos las iteraciones cuando las oscilaciones son inferiores a 0.01° C. Para este ejemplo, vemos en la gráfica adjunta que esta convergencia se alcanza después de 13 iteraciones.

Los valores obtenidos para las diversas variables

Figura 5.3. Convergencia de la temperatura en captadores en Enero

**Proyecto de Instalación
Solar de ACS en Vivienda
Unifamiliar**

Código: ANEXO-I
Edición: Original
Fecha: 01 ABR 2008
Página: 21 de 25

de la instalación una vez alcanzada la convergencia son los siguientes:

$T_{\text{acumulador (1):}}$	6° C. Temperatura a primera hora de la mañana
$T_{\text{acumulador (2):}}$	37.1° C. Temperatura después de la captación solar y antes del consumo de la tarde
$T_{\text{acumulador (3):}}$	6° C. Temperatura después del consumo
$T_{\text{termo (1):}}$	57.65°C. Temperatura a primera hora de la mañana.
$T_{\text{termo (2):}}$	56.37°C. Temperatura antes del consumo de la tarde.
$T_{\text{termo (3):}}$	30.30°C. Temperatura después del consumo.
$T_m:$	21.55°C
$\eta_{\text{panel}}:$	52.74%
$\xi:$	1 (Toda la energía va al interacumulador)
$E_{\text{termo(1):}}$	6276000 J (1.74 kWh)
$E_{\text{termo(1):}}$	46875782 J (13.02 kWh)
$E_{\text{termo(1+2):}}$	53151782 J (14.76 kWh)
$V_{11}:$	154.0 lt
$V_{12}:$	206.0 lt
$V_{22}:$	0.0 lt

En el segundo ejemplo, consideramos la misma instalación en el mes de Julio y manteniendo los requisitos de consumo. Ahora, los datos de partida que varían son:

Inicio

$k:$	0.924
$I(\text{corregida}):$	659.74 W/m ²
$H(\text{corregida}):$	22582560 J
$t:$	9.5 horas
$T_{\text{amb}}:$	28° C
$T_{\text{red}}:$	14° C
$T_{\text{res}}:$	14° C
$T_m:$	14° C

Captación solar

$\eta_{\text{panel}}:$	84.75%
$E1:$	113874406 J
$E2:$	-1854907 J (inicialmente el depósito está a temperatura inferior al ambiente, por lo que éste le cede calor)
$\xi:$	0.8448 (Más del 84% de la energía captada por los paneles va al acumulador. El resto se lleva a la piscina)
$T_{\text{max}}:$	131.18° C (El valor inicial supera el límite de 90° que hemos establecido. Sin embargo, en el proceso de convergencia este valor se estabiliza en el límite establecido)

**Proyecto de Instalación
Solar de ACS en Vivienda
Unifamiliar**

Código: ANEXO-I
Edición: Original
Fecha: 01 ABR 2008
Página: 22 de 25

T_{termo} : 55.31° C
 $E_{\text{termo (1)}}$: 0 J (Al estar el ambiente a mayor temperatura, la pérdida de calor del termo es inferior a la que hay en invierno y en 9.5 horas todavía no ha bajado de los 55° C de umbral para poner en marcha el termostato)

Consumo (usando la nomenclatura del apartado 1 de este anexo)

V_{11} : 41.0 lt (cantidad de agua del acumulador que alimenta la válvula (1))
 V_{12} : 248.9 lt (cantidad de agua del termo que alimenta la válvula (1))
 V_{22} : 70.1 lt (cantidad de agua de la red que alimenta la válvula (2))
 $T_{\text{acumulador}}$: 14 °C (después del consumo)
 T_{termo} : 96.23 °C (Aumenta por estar alimentado del acumulador a alta temperatura)

Como hicimos antes, a modo de comprobación de balance energético, se puede ver que antes del consumo, había 300 lt a 55.31° C en el termo, 200 lt a 131.18° C en el acumulador y 360 lt (para el consumo) en la red a 14° C. Esto es, respecto a una referencia a 0° C...

$$300 \cdot 55.31 + 200 \cdot 131.18 + 360 \cdot 14 \approx 47869 \text{ kcal}$$

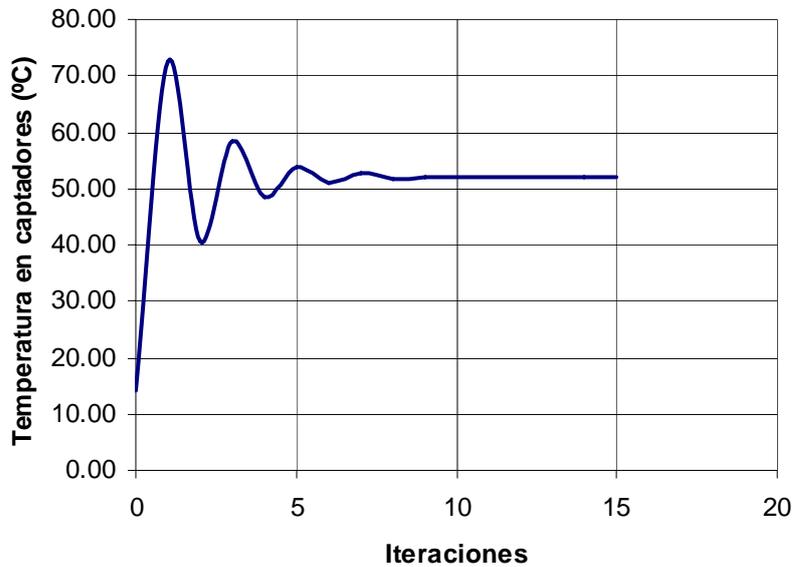
Ahora en el termo hay 300 lt a 96.23° C, en el acumulador 200 lt a 14° C y hemos servido 360 lt a 45° C (consumo). Esto es, respecto a una referencia a 0° C...

$$300 \cdot 96.23 + 200 \cdot 14 + 360 \cdot 45 \approx 47869 \text{ kcal}$$

con lo que vemos que el balance energético es correcto

Final del día (y principio del siguiente)

$E_{\text{termo (2)}}$: 0 J (Partiendo de una temperatura tan alta, a lo largo de la noche no bajamos de los 55 grados de umbral)
 $E_{\text{termo (1+2)}}$: 0 J (energía eléctrica suministrada durante todo el día)
 $T_{\text{acumulador}}$: 14 °C. Equivale a T_{res} de la siguiente iteración
 T_{termo} : 81.58 °C (Baja debido a las pérdidas por la noche). Es el valor con el que iniciaremos la siguiente iteración
 T_m : 72.59° C



Repitiendo el proceso de iteración con los nuevos valores de T_m , T_{termo} y T_{res} , vamos convergiendo los valores. Empleamos T_m como valor de control y detenemos las iteraciones cuando las oscilaciones son inferiores a 0.01°C . Para este ejemplo, vemos en la gráfica adjunta que esta convergencia se alcanza después de 15 iteraciones.

Figura 5.4. Convergencia de la temperatura en captadores en Julio

Los valores obtenidos para las diversas variables de la instalación una vez alcanzada la convergencia son los siguientes:

$T_{\text{acumulador (1):}}$	14° C. Temperatura a primera hora de la mañana
$T_{\text{acumulador (2):}}$	90.0° C. Temperatura después de la captación solar y antes del consumo de la tarde. Coincide con el límite impuesto al sistema de control
$T_{\text{acumulador (3):}}$	14° C. Temperatura después del consumo
$T_{\text{termo (1):}}$	60.10°C. Temperatura a primera hora de la mañana.
$T_{\text{termo (2):}}$	55.42°C. Temperatura antes del consumo de la tarde.
$T_{\text{termo (3):}}$	68.88°C. Temperatura después del consumo de la tarde.
$T_m:$	52.00°C
$\eta_{\text{panel}}:$	58.83%
$\xi:$	0.8448
$E_{\text{termo(1):}}$	0 J (0 kWh)
$E_{\text{termo(1):}}$	0 J (0 kWh)
$E_{\text{termo(1+2):}}$	0 J (0 kWh)
$V_{11}:$	40.7 lt
$V_{12}:$	252.2 lt
$V_{22}:$	67.1 lt

En este caso vemos que no hay aporte energético al termo en todo el día, aunque la mayor aportación de agua para el consumo viene de él. El rendimiento del panel es ligeramente superior al del caso anterior ya que, si bien la temperatura de

funcionamiento de los captadores es mayor, también lo es la temperatura ambiente y la irradiancia solar, con lo que las pérdidas por convección son inferiores.

6. Análisis de la rentabilidad de la instalación para una configuración determinada

La metodología descrita anteriormente permite evaluar para una combinación de superficie de paneles y volumen de interacumulador la cantidad de energía que es necesaria suministrar al termo para asegurar el consumo.

Dicha energía se puede comparar con la necesaria en otro modelo de instalación que no tuviera paneles ni interacumulador (por no alargar en exceso este anexo no se detalla el modelo. Simplemente indicar que sigue el mismo procedimiento que los apartados 3 y 4 de este anexo para el cálculo de energía que es necesario suministrar para mantener la temperatura). La diferencia entre ambos representa el ahorro que supone la nueva instalación.

Para poder calcular la tasa de rentabilidad interna de la instalación y el tiempo de retorno, además de conocer el ahorro producido por la instalación, es necesario conocer el precio de la misma. Podemos estimar una cantidad más o menos fija para la instalación y una parte variable asociada a un mayor o menor número de captadores y un mayor o menor volumen de acumulación, así como la consideración de emplear unas marcas u otras (siempre asegurando una buena calidad) en función de su precio y características de los equipos.

El programa desarrollado para esta instalación contempla también la evaluación de la rentabilidad de la instalación para las diferentes combinaciones, de forma que se pueden comparar muchas combinaciones para dar con la óptima.

Los datos necesarios para conocer la rentabilidad de la instalación son:

- C:** Precio de la instalación (€), considerando sólo los elementos que integran el coste variable entre distintas configuraciones (esto es, captadores e interacumulador)
- M:** Coste anual de mantenimiento (€)
- A:** Ahorro económico proporcionado a lo largo del año (€), resultado de multiplicar el ahorro energético, obtenido del apartado anterior y el precio de la electricidad
- i:** Inflación prevista (%)
- e:** Interés financiero (%)
- c:** Incremento previsto del precio de la electricidad (%)
- v:** Vida útil de la instalación (años)

El programa calcula el beneficio neto obtenido en el año t a partir de la expresión...

**Proyecto de Instalación
Solar de ACS en Vivienda
Unifamiliar**

Código: ANEXO-I
Edición: Original
Fecha: 01 ABR 2008
Página: 25 de 25

$$B = A \sum_1^t \left(\frac{1+c}{1+e} \right)^t - M \sum_1^t \left(\frac{1+i}{1+e} \right)^t - C \quad [6.1]$$

Para encontrar el tiempo de retorno, se evalúa el valor de B para distintos valores de t desde 1 hasta la vida útil (v) de la instalación. El valor de t para el que B pasa de <0 a >0 es el tiempo de retorno. Si B<0 para t=v quiere decir que la instalación no llega a amortizarse en su vida útil.

Para encontrar la tasa de rentabilidad interna de la instalación, utilizamos la misma expresión de beneficio neto, pero fijando el valor de t al de la vida útil de la instalación. Se realiza una aproximación siguiendo el método de bisección variando el valor de e en la expresión anterior para conseguir que B sea 0.