

## **ANEXO I – METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN**

### **INDICE**

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>SIMULACIÓN DE UN CONSUMO PUNTUAL EN LA INSTALACIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>SIMULACIÓN DE PÉRDIDAS EN UN DEPÓSITO.....</b>	<b>10</b>
<b>4.</b>	<b>SIMULACIÓN DEL MANTENIMIENTO DE LA TEMPERATURA EN UN TERMO ELÉCTRICO Y GASTO DE ENERGÍA NECESARIO .....</b>	<b>11</b>
<b>5.</b>	<b>SIMULACIÓN DE LA INSTALACIÓN PROYECTADA AL COMPLETO.....</b>	<b>13</b>
<b>6.</b>	<b>ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD DE LA INSTALACIÓN PARA UNA CONFIGURACIÓN DETERMINADA .....</b>	<b>24</b>

## 1. Introducción

El presente anexo muestra la metodología de simulación empleada para la creación de un programa de cálculo de actuaciones específico para esta instalación. Dicho programa ha sido creado en C++ y tiene como objeto evaluar distintas combinaciones de superficies de captadores y volúmenes de acumulación para distintos fabricantes. El resultado será una comparativa de tasas de rendimiento interno de la instalación de forma que podamos elegir la más adecuada, siempre asegurando el suministro de ACS requerido.

Para ilustrar los pasos dentro del proceso de simulación, explicaremos la metodología seguida en los siguientes pasos:

- Simulación de un consumo puntual en la instalación
- Simulación de las pérdidas térmicas en un depósito
- Simulación de la energía a suministrar al termo eléctrico para mantener su temperatura
- Simulación de la instalación completa
- Análisis de rentabilidad de la configuración

## 2. Simulación de un consumo puntual en la instalación

En la instalación proyectada, se suministra agua caliente bien del termo eléctrico, bien del interacumulador solar, de forma que se optimice el uso de la energía térmica almacenada.

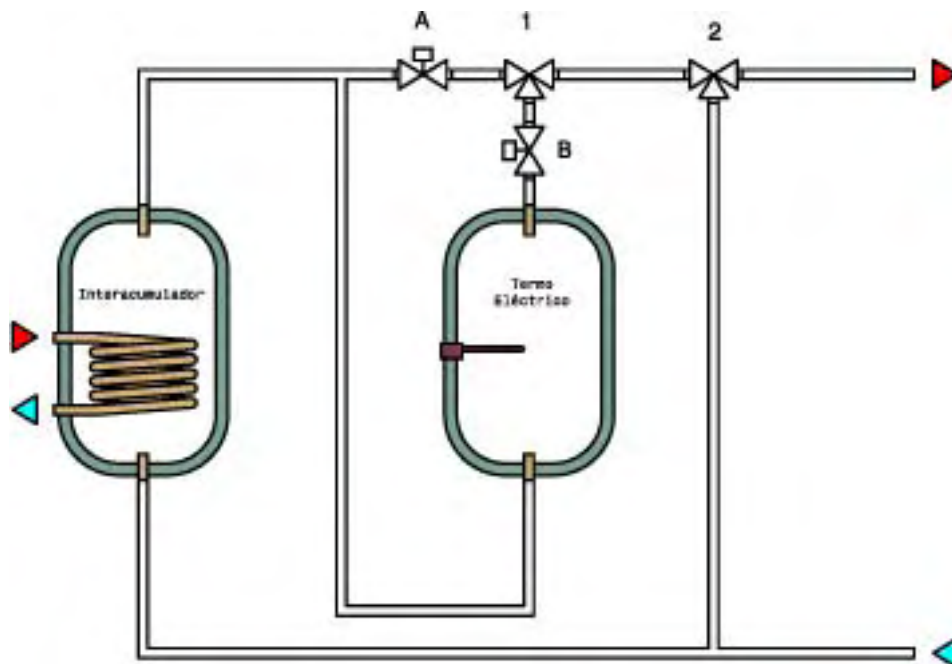


Figura 2.1. Esquema de suministro al circuito secundario desde el termo eléctrico y el interacumulador solar

La satisfacción de una demanda de consumo puntual de agua caliente estará controlada por una válvula termostática (2), que a su vez recibe la alimentación de la red de agua fría y de otra válvula termostática (1), alimentada por el interacumulador y el termo eléctrico. Este suministro a la válvula (1) está controlado por dos válvulas de paso (A) y (B) comandadas por el sistema de control, de forma que se tome el agua del depósito a menor temperatura compatible con la demanda necesaria. Con esta disposición, la válvula termostática (1) puede estar siendo alimentada sólo por el interacumulador, sólo por el termo o una mezcla de ambos. Para entender el funcionamiento, vamos a ver dos situaciones de funcionamiento opuestas que corresponderían a un mes típico de invierno y otro de verano.

**Situación a)** El acumulador solar alcanza una temperatura inferior a la programada en el termo (en nuestro caso 60°). En este caso, el termo eléctrico es el que debe suministrar la temperatura extra necesaria para el consumo (en función de la temperatura existente en el interacumulador solar). La válvula (1) sin embargo tomará primero siempre el agua del acumulador al estar a una temperatura inferior a la del termo, reservándose el agua del termo sólo para cuando sea necesario (por ejemplo si se acaba el agua del acumulador solar)

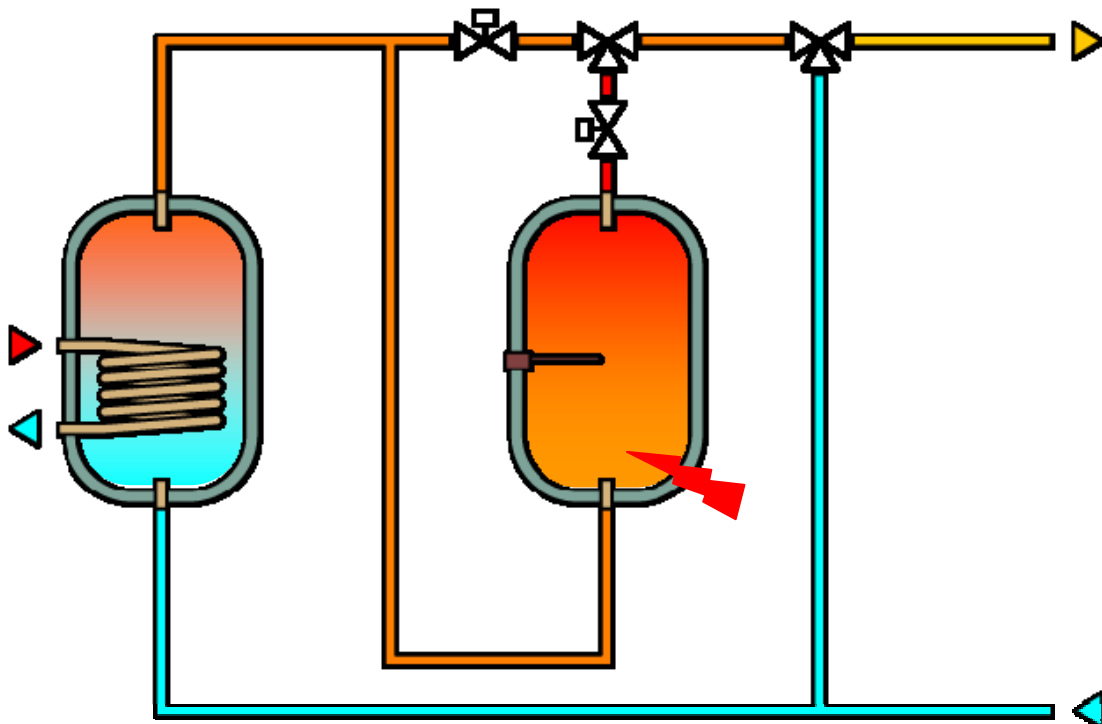
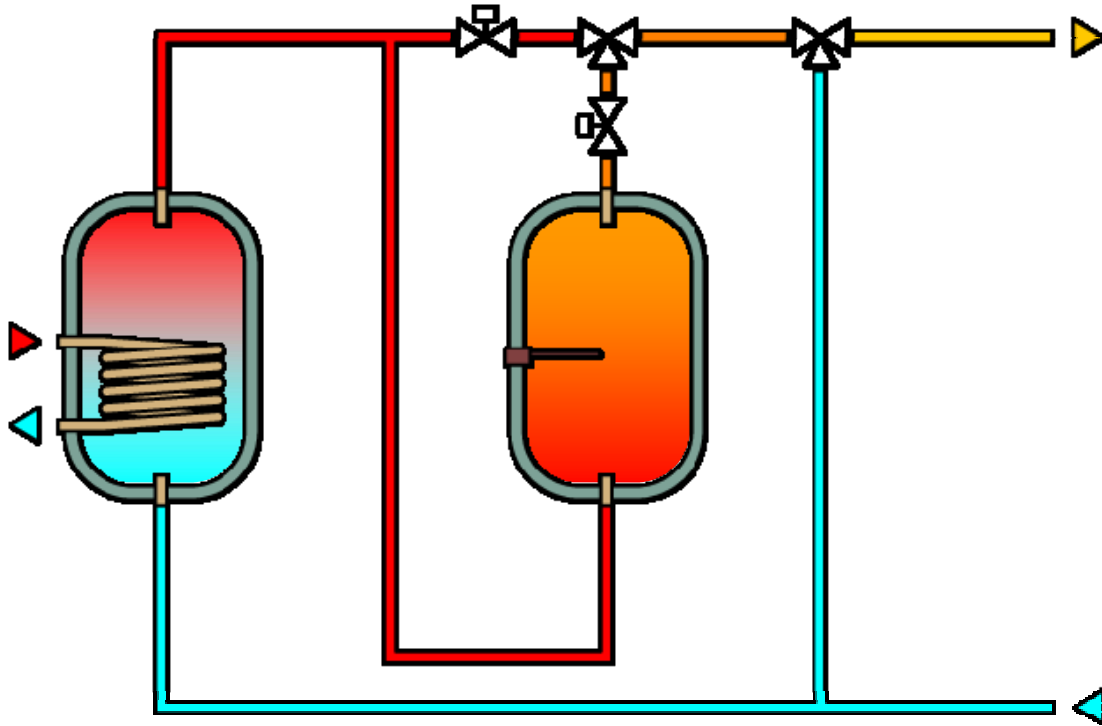


Figura 2.2. Esquema de funcionamiento en invierno. El consumo se hace principalmente del interacumulador solar (a menor temperatura) y el termo sirve de complemento

**Situación b)** El acumulador solar alcanza una temperatura superior a la programada en el termo. En este caso, el termo está a una temperatura inferior a la del acumulador y la válvula (1) tomara primero el agua del termo. Sin embargo, éste se va rellenando con agua del acumulador, que está a una mayor temperatura,

de forma que después del consumo seguimos teniendo agua a una temperatura superior a la programada en el termo, por lo que no será necesario que entre en funcionamiento la resistencia eléctrica de éste para el calentamiento.



*Figura 2.3. Esquema de funcionamiento en verano. El consumo se hace principalmente del termo eléctrico. El relleno del termo se hace desde el interacumulador solar a más temperatura*

Para expresar numérica y gráficamente las dos situaciones anteriores, mostramos el proceso de cálculo seguido, considerando la siguiente nomenclatura:

- $T_{con}$ : Temperatura demandada en el consumo en °C
- $V_{con}$ : Volumen de agua demandada en el consumo en litros
- $T_{11}$ : Temperatura en el punto superior del acumulador solar en °C
- $T_{12}$ : Temperatura en el punto superior del termo en °C
- $T_{13}$ : Temperatura de salida de la válvula (1) en °C
- $T_{21}$ : Temperatura a la entrada de la válvula (2) en °C. Suponemos el mismo valor que  $T_{13}$ .
- $T_{22}$ : Temperatura de la red en °C y que alimenta a la válvula (2)
- $T_{23}$ : Temperatura realmente obtenida en la válvula (2)
- $V_{11}$ : Volumen de agua extraído del acumulador solar que alimenta la válvula (1) en litros
- $V_{12}$ : Volumen de agua extraído del termo en litros
- $V_{13}$ : Volumen de agua suministrado por la válvula (1) en litros
- $V_{21}$ : Volumen de agua que llega a la válvula (2) desde la válvula (1) en litros. Coincide con  $V_{13}$

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

Código: ANEXO-I  
Edición: Original  
Fecha: 01 ABR 2008  
Página: 5 de 25

- $V_{22}$ : Volumen de agua empleado de la red para rebajar la temperatura en la válvula (2) en litros  
 $V_{23}$ : Volumen de agua empleado en el consumo en litros. Coincide con  $V_{con}$

- 1) La válvula (2), en función de las temperaturas que detecta de la red y de la conexión con la válvula (1), determina el caudal a recibir de cada una de las ramas, resolviendo el sistema...

$$\begin{cases} T_{21}V_{21} + T_{22}V_{22} = V_{con}T_{con} \\ V_{21} + V_{22} = V_{con} \end{cases} \quad [2.1]$$

- 2) Conocido el caudal que la válvula (1) tiene que suministrar a la válvula (2), y conociendo las temperaturas en los puntos superiores del acumulador y del termo, calcula el caudal necesario de cada fuente, tomando como prioridad la fuente de menor temperatura.
- 3) Conocidos los caudales que tienen que suministrarse desde el acumulador y desde el termo, se realiza una descarga de los mismos, rellenándose el acumulador con agua a temperatura de la red y el termo con el agua proveniente del acumulador solar. Como en cada depósito se consideran estratos a diferentes temperaturas, se calcula la temperatura real del agua suministrada a la válvula (1). Para obtener un resultado realista, la descarga realmente se va haciendo en pequeñas "porciones" de agua, de forma que se pueda tener en cuenta la estratificación de las temperaturas y sea más fácil calcular la temperatura de la demanda resultante
- 4) Con las temperaturas reales de suministro a la válvula (1), se calcula la temperatura real suministrada a la válvula (2) a partir del sistema...

$$\begin{cases} T_{11}V_{11} + T_{12}V_{12} = V_{13}T_{13} \\ V_{11} + V_{12} = V_{13} \end{cases} \quad [2.2]$$

- 5) Con las temperaturas reales de suministro a la válvula (2), se calcula la temperatura real obtenida por el sistema...

$$\begin{cases} T_{21}V_{21} + T_{22}V_{22} = V_{23}T_{23} \\ V_{21} + V_{22} = V_{23} = V_{con} \end{cases} \quad [2.3]$$

El sistema, a diferencia de otros que empleen otro tipo de energía auxiliar, como por ejemplo calderas murales de gas, puede ser que no sea capaz de alcanzar la temperatura de consumo deseada, ya que el sistema eléctrico del termo no es capaz de calentar el agua a la velocidad necesaria. El gasto, sin embargo, sí será el deseado.

Para ilustrar los resultados de la simulación del sistema, mostramos a continuación la evolución de las temperaturas del acumulador solar y del termo eléctrico con el tiempo para diferentes tipos de descargas (diversas temperaturas y gastos), así como las temperaturas reales obtenidas. Los resultados se mostrarán para las dos situaciones descritas anteriormente (a y b), que podrían corresponder a meses de invierno y de verano respectivamente.

Para ambas situaciones consideraremos un acumulador solar de 300 litros y un termo de la misma capacidad. La temperatura programada de partida en el termo es de 60° y consideramos una demanda continuada de 50 °C, que llevamos hasta los 1000 litros de consumo. La temperatura del agua de la red será de 6 °C en la situación a) y 14 °C en la situación b).

**Situación a).** Meses de invierno. Consideramos una situación típica en la que en el momento de consumo, el acumulador se encuentre a una temperatura media de 35 °C (por simplificar no se considera en la simulación una estratificación inicial en el depósito)

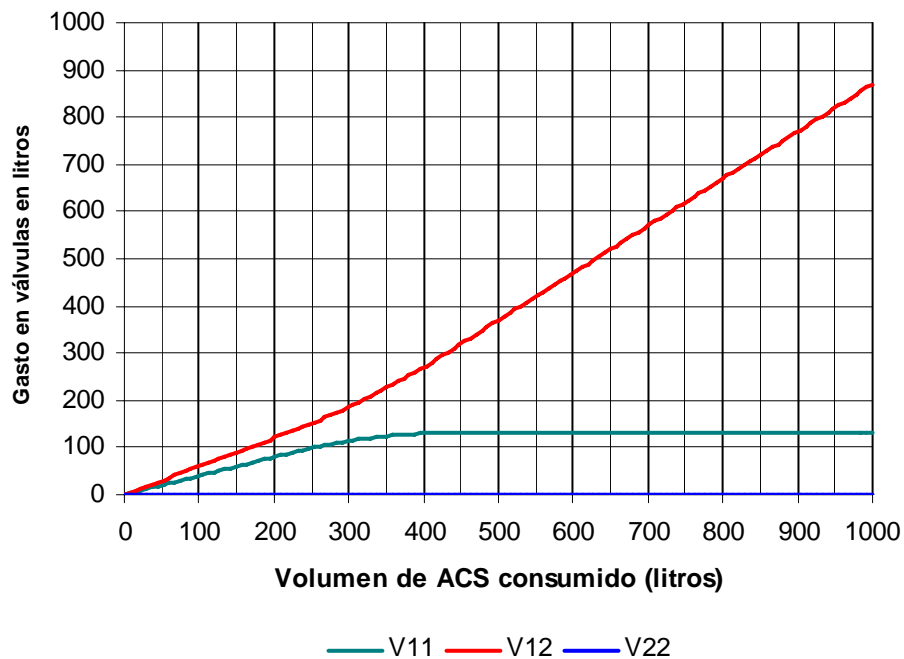
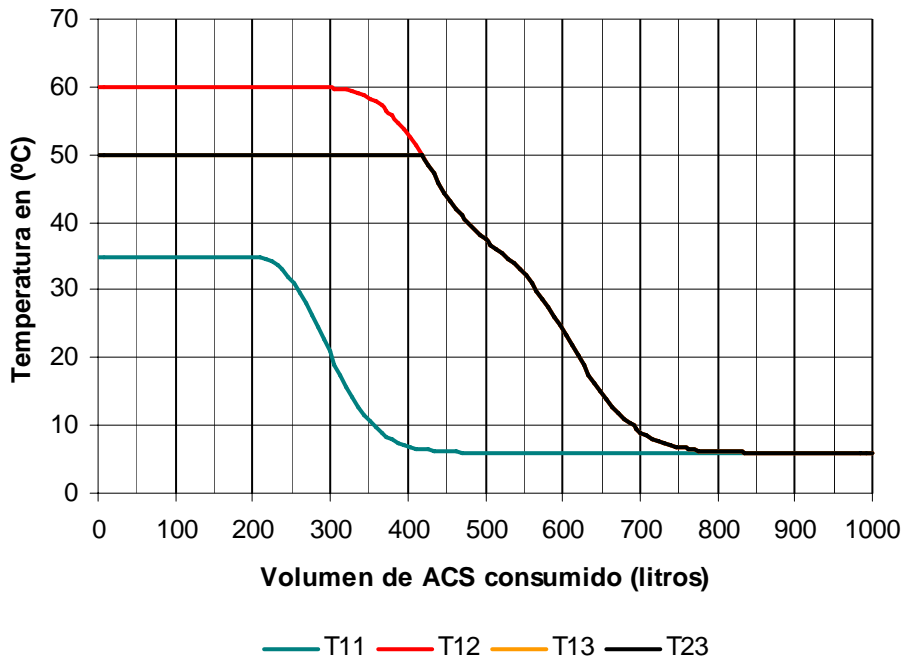


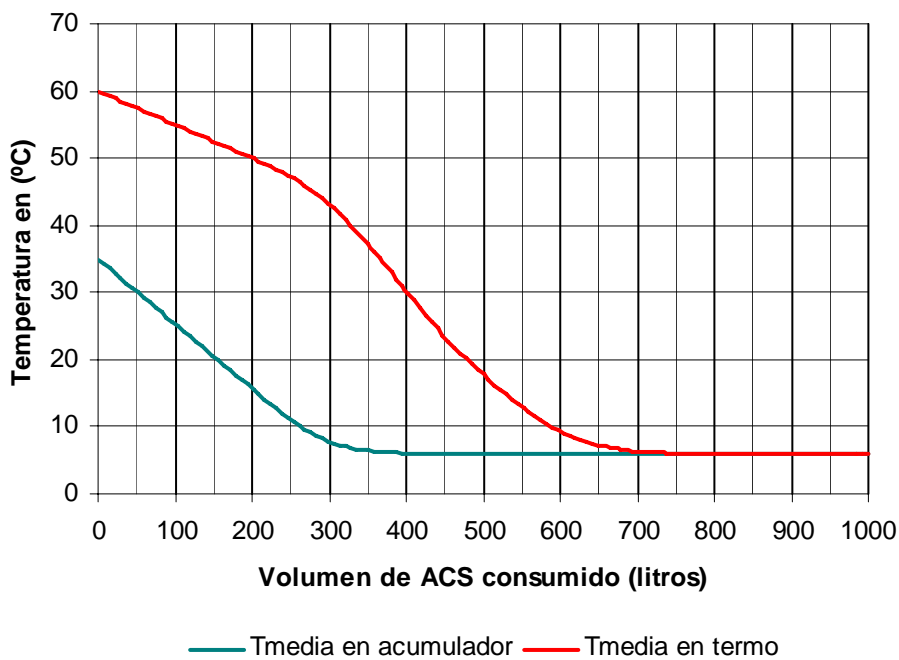
Figura 2.3. Evolución del gasto extraído del interacumulador solar, termo eléctrico y agua de la red en un mes típico de invierno

En la gráfica anterior estamos representando los valores de consumo en la válvula (1) y en la válvula (2) según vamos demandando un mayor consumo de ACS. En ningún momento se produce consumo de agua de la red en la válvula (2), sino que inicialmente se toma una mezcla del acumulador (línea roja) y del termo (línea gris), hasta que al llegar a unos 400 litros de consumo, todo viene a partir del termo (estamos considerando V<sub>11</sub> el gasto que pasa por la válvula (1) procedente del acumulador. Hay que tener en cuenta que el termo se alimenta del acumulador, pero ese efecto no está aquí recogido).



*Figura 2.4. Evolución de la temperatura del agua que pasa por cada una de las secciones de las válvulas de control en un mes típico de invierno*

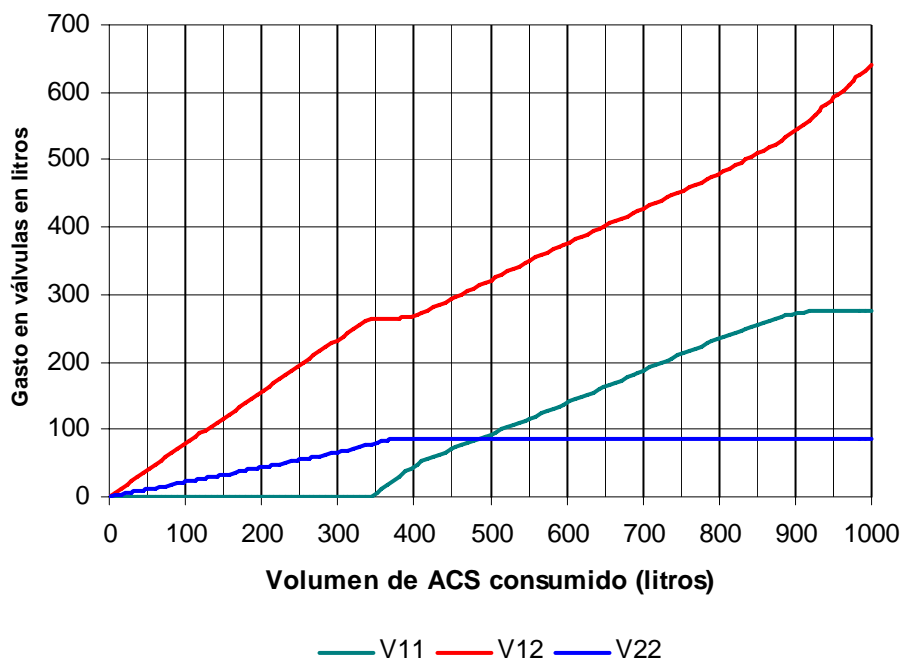
Si evaluamos las temperaturas del agua que pasa por las distintas secciones de las válvulas, vemos que se puede mantener el suministro a 50°C hasta unos 425 litros de consumo y a partir de ahí no es posible mantener esa temperatura (en la gráfica, los valores de T<sub>13</sub> y T<sub>23</sub> son coincidentes pues no hay adición de agua de la red en la válvula (2)).



*Figura 2.5. Evolución de la temperatura media en el interacumulador solar y termo eléctrico en función del consumo en un mes típico de invierno*

Esta última gráfica, que muestra las evoluciones de las temperaturas medias en el acumulador y en el termo, nos indica que el primer depósito en “vaciar” de agua caliente es el acumulador (al llegar a unos 400 litros de consumo) y el siguiente el termo (al llegar a unos 700 litros de consumo).

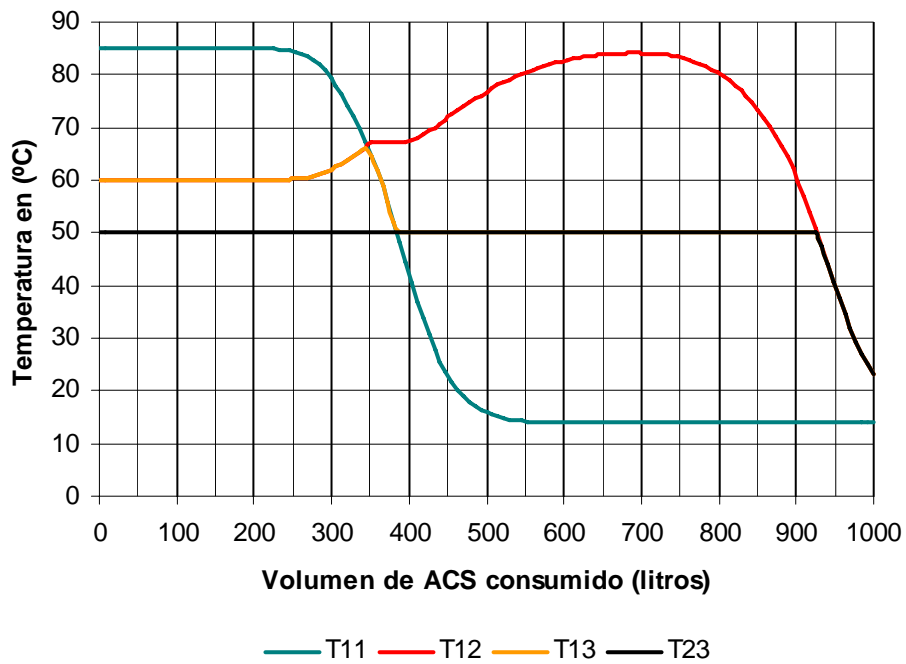
**Situación b).** Meses de verano. Consideramos una situación típica en la que en el momento de consumo, el acumulador se encuentre a una temperatura media de 85 °C. Como se verá en la parte de simulación de la instalación completa, se considera un sistema de seguridad para limitar la temperatura en la instalación, derivando los excedentes de energía en los meses estivales hacia la piscina.



*Figura 2.6. Evolución del gasto extraído del interacumulador solar, termo eléctrico y agua de la red en un mes típico de verano*

En la gráfica anterior de los diferentes consumos a través de la válvula de tres vías y la válvula termostática, vemos que inicialmente consumimos sólo del termo (que está a menor temperatura que el acumulador) y vamos mezclando con agua fría de la red para alcanzar la temperatura deseada hasta los primeros 350 litros. A partir de ahí, vamos haciendo la mezcla con agua del acumulador (que ha ido rellenando el termo y se ha rellenado a su vez con agua de la red) y agua del termo, no volviendo a emplear el agua de la red para las mezclas.





*Figura 2.4. Evolución de la temperatura del agua que pasa por cada una de las secciones de las válvulas de control en un mes típico de verano*

Vemos que ahora el consumo de 50 °C lo podemos mantener hasta unos 925 litros, momento a partir del cual no hay más energía almacenada y baja la temperatura de suministro. Ahora las temperaturas  $T_{13}$  y  $T_{23}$  no son coincidentes en los primeros momentos del consumo por haber adición de agua de la red en esos primeros momentos. Vemos además una subida de la temperatura en  $T_{12}$  que se corresponde con el agua más caliente del acumulador que primero ha pasado por el termo y se empieza a utilizar una vez se ha consumido el agua que había en éste.

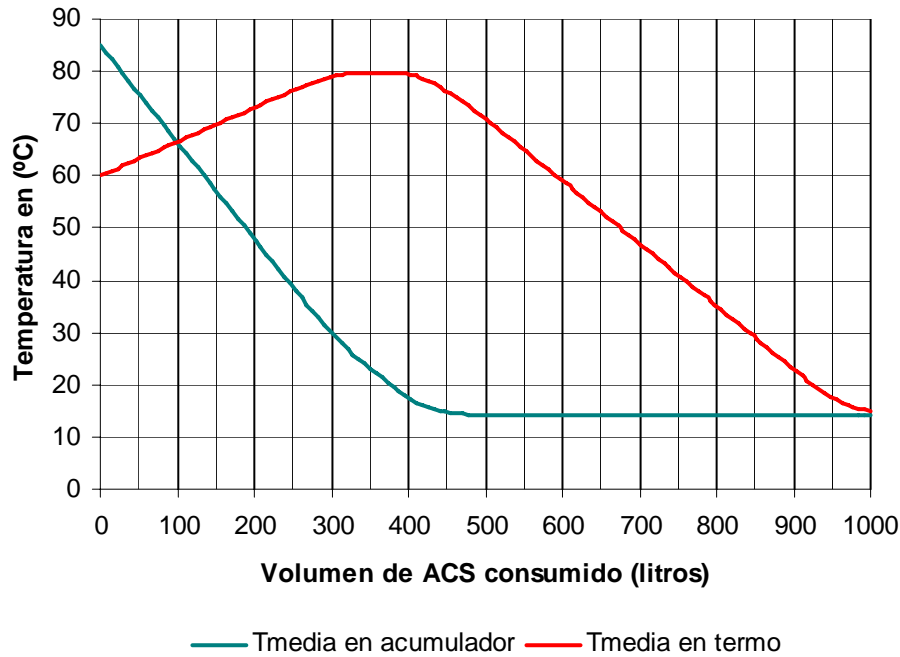


Figura 2.8. Evolución de la temperatura media en el interacumulador solar y termo eléctrico en función del consumo en un mes típico de verano

La evolución de la temperatura media en el acumulador y en el termo muestra una bajada rápida de la temperatura del acumulador y una subida del termo al principio, ya que primeramente estamos consumiendo el agua de éste y lo estamos rellenando con el agua del acumulador, a mayor temperatura.

### 3. Simulación de pérdidas en un depósito

Para simular las pérdidas por convección en el interior de un depósito, supondremos que éstas serán uniformes y se producirán únicamente a través de la superficie del depósito. Las pérdidas dependerán del material aislante del depósito, del tiempo transcurrido, de la temperatura interior (que supondremos uniforme) del depósito y de la temperatura exterior a través de la expresión...

$$dE = -\frac{\lambda S}{e}(T - T_{ext})dt \quad [3.1]$$

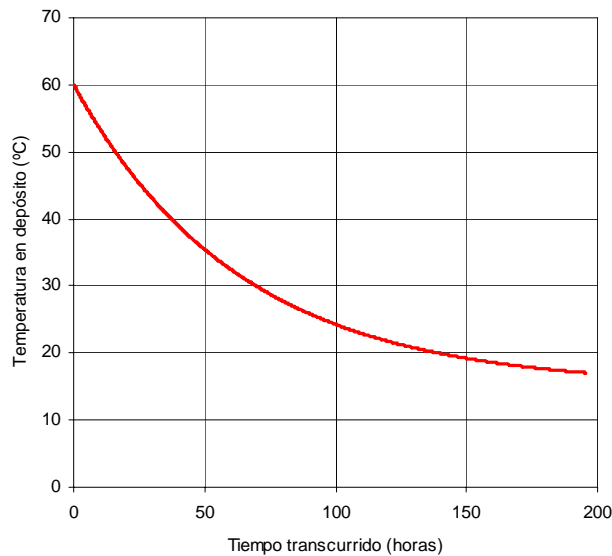
donde dE representa la pérdida de energía del depósito en julios, T es la temperatura en cada momento del mismo en °C, T<sub>ext</sub> es la temperatura en el exterior del depósito en °C, λ es el coeficiente de conductividad térmica del material aislante en w/m°C, S es la superficie total del depósito en m<sup>2</sup>, e el espesor del aislante en m y dt el tiempo transcurrido en segundos. De la expresión anterior se puede deducir por integración la ley de variación de temperatura en el interior del depósito en función del tiempo...

$$T = T_{ext} + (T_0 - T_{ext})e^{-k\Delta t} \quad [3.2]$$

donde T es la temperatura del depósito en °C, partiendo de una temperatura T<sub>0</sub>, después de haber transcurrido un tiempo Δt en segundos y teniendo una temperatura exterior T<sub>ext</sub>. La constante k depende del volumen del depósito, su superficie exterior y su material aislante a través de la expresión...

$$k = \frac{\lambda S}{4.184eV} \quad [3.3]$$

donde λ es el coeficiente de conductividad térmica del material aislante en w/m°C, S es la superficie total del depósito en m<sup>2</sup>, e el espesor del aislante en mm y V el volumen del depósito en litros



*Figura 3.1. Ejemplo de evolución de la temperatura en un depósito de 300 litros, 2.75 m<sup>2</sup> de superficie y aislante de 20 mm de coeficiente de conductividad 0.04 w/m°C, partiendo de una temperatura de 60 °C y una temperatura exterior de 15 °C*

#### **4. Simulación del mantenimiento de la temperatura en un termo eléctrico y gasto de energía necesario**

El termo eléctrico se simulará como un depósito que dispone de una resistencia eléctrica de una potencia determinada que permite elevar la temperatura del agua almacenada. Dicha temperatura estará controlada por un termostato, de forma que por debajo de un valor umbral de la temperatura programada, se activará la resistencia eléctrica hasta alcanzar nuevamente el valor programado.

Durante el tiempo de calentamiento, supondremos por simplificar que éste es mucho más rápido que el proceso de pérdidas, por lo que el termo siempre estará, o bien calentándose, o bien perdiendo energía.

El proceso de calentamiento del depósito vendrá dado por la expresión...

$$\Delta T = \frac{P\Delta t}{4184V} \quad [4.1]$$

en donde  $\Delta T$  representa el incremento de temperatura en  $^{\circ}\text{C}$ , P es la potencia de la resistencia eléctrica en w,  $\Delta t$  es el tiempo transcurrido en segundos y V es el volumen del depósito en litros.

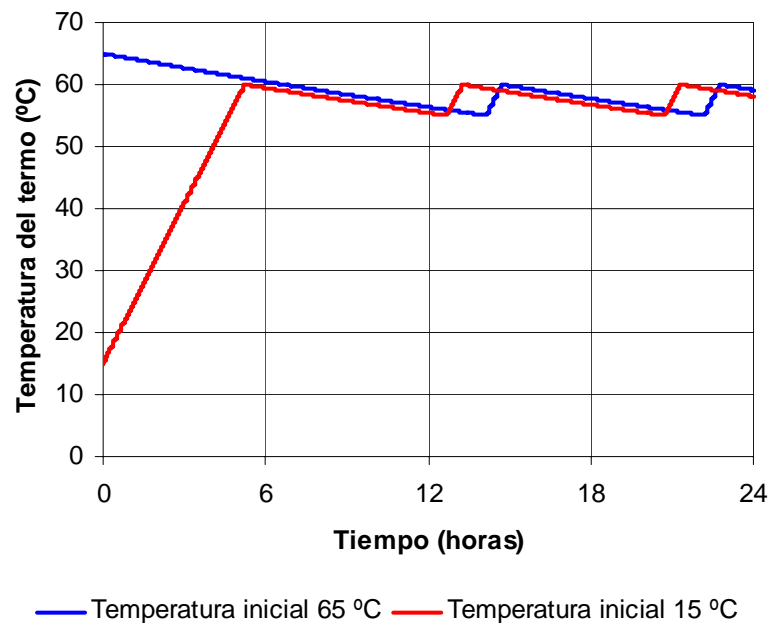


Figura 4.1. Simulación de la evolución de temperatura en un termo partiendo de dos condiciones iniciales diferentes

En la gráfica adjunta, se muestra el resultado de la simulación de la evolución de la temperatura en un termo de 300 litros, 2.75 m<sup>2</sup> de superficie y aislante de 20 mm de coeficiente de conductividad 0.04 w/m<sup>2</sup>°C durante un período de 24 horas con una temperatura objetivo de 60 grados y un umbral de 5 grados para la puesta en marcha de la resistencia calefactora de 3000 w de potencia.

La gráfica de temperatura inicial en el depósito de 65 °C (azul) tiene una primera parte de pérdidas de unas 14 horas hasta llegar a los 55°C en el termo (60 de objetivo menos 5 de umbral), momento en el que se enciende la resistencia y calienta el agua durante unos 35 minutos hasta alcanzar los 60 grados. Posteriormente sigue un proceso de enfriamiento que dura unas 7-8 horas y vuelta a empezar.

La gráfica de temperatura inicial en el depósito de 15 °C (rojo) tiene una primera parte de calentamiento que dura unas 4-5 horas hasta alcanzar los 60 °C y luego sigue el mismo proceso descrito anteriormente.