V.- ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR, A.C.S., CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN

pfernandezdiez.es

La energía solar es una fuente de energía que depende del tiempo; para una amplia gama de aplicaciones las necesidades de energía dependen también del tiempo, pero en forma distinta del suministro de energía solar, por lo que el desfase entre los períodos de disponibilidad de la energía solar y los períodos de consumo, requieren de alguna forma de almacenamiento.

El almacenamiento de energía solar se tiene que realizar teniendo en cuenta:

- El tipo de colector solar

- Las unidades de almacenamiento

- Los aparatos de conversión (tales como acondicionadores de aire o motores), cargas, suministros de energía auxiliares o suplementarios, etc

- Los sistemas de control

Las características y el COP de cada uno de estos elementos están relacionados con la temperatura; en un proceso termosolar de generación de potencia, el sistema de almacenamiento de energía térmica provoca una gran diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del fluido, lo que a su vez implica una baja temperatura de entrada en la máquina térmica y, por lo tanto, un bajo COP de ésta y de toda la instalación.

La capacidad de almacenamiento óptimo de la energía solar es función de su disponibilidad, que depende de:

- El tiempo

- La naturaleza de las cargas que se pueden esperar en el proceso

- La forma en que se suministra la energía auxiliar

- Un análisis económico que determina qué parte de las cargas totales de energía deben ser de tipo solar y qué otras partes procedentes de otras formas de energía.

V.1.- CARGAS DEL PROCESO DEL COLECTOR SOLAR

Si se considera un proceso solar en el que la variación de la carga P con el tiempo y la ganancia del colector, están relacionados de forma que durante una parte del tiempo, la energía disponible sobrepasa a la carga y viceversa.

Un sistema de almacenamiento tiene que permitir:

- Almacenar un exceso de calor Q_{col} sobre la carga P, cuando $Q_{col} > P$

- Devolverlo cuando $P > Q_{col}$

siendo:

$$Q_{col} = (G\, c_p)_{col}\, (T_{c2} - T_{dep}) = C_{col}\, (T_{c2} - T_{dep})$$

en la que G es el gasto másico del agua que circula por el colector, c_p su calor específico, C_{col} la capacidad calorífica del colector, T_{c2} la temperatura de salida del agua en el colector y T_{dep} la temperatura del depósito.

La información que se deriva de los valores de Q_{col} y de A (superficie de intercambio térmico en el depósito), sobre el coste del suministro de energía solar, permite calcular la fracción de las necesidades de la energía total que se cubren con las fuentes de energía solar o auxiliar.

Los parámetros básicos que permiten definir el depósito de almacenamiento son:

- La duración del almacenamiento

- La cantidad de energía a almacenar

- La temperatura deseada en el sistema receptor de la energía, que viene condicionada por la utilización de esta energía

Los medios de almacenamiento se clasifican en:

- Almacenamiento a plazo corto (horas o días)

- Almacenamiento de larga duración (meses), generalmente del verano para el invierno

V.2.- ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN LOS PROCESOS SOLARES

El almacenamiento de la energía solar se puede hacer:

- En forma de calor sensible, en el que el calor almacenado aumenta la temperatura de un medio líquido, sólido o gaseoso

- En forma de calor latente, como el calor de fusión en sistemas químicos

- En forma de calor sensible y latente, en el que el calor almacenado entraña una variación de temperatura y un cambio de estado del sistema receptor (sólido o líquido); la restitución del calor corresponde al cambio de

estado inverso

- En forma de energía química originada en algunas reacciones químicas

- En forma de energía mecánica que se puede transformar en energía potencial mediante el almacenamiento de fluidos a ciertas alturas

- En forma de sustancias obtenidas en procesos solares no energéticos, como el agua destilada en un alambique solar que se puede almacenar en depósitos para su utilización posterior

La elección de los medios de almacenamiento de energía depende de la naturaleza del proceso:

- Para el calentamiento de agua, resulta lógico el almacenamiento de energía bajo forma de calor sensible

- Si se usan colectores de calentamiento para acondicionamiento de aire, el almacenamiento puede ser tanto en forma de calor sensible, como latente

- Si se usan procesos fotovoltaicos o fotoquímicos, el almacenamiento es en forma de energía química

-

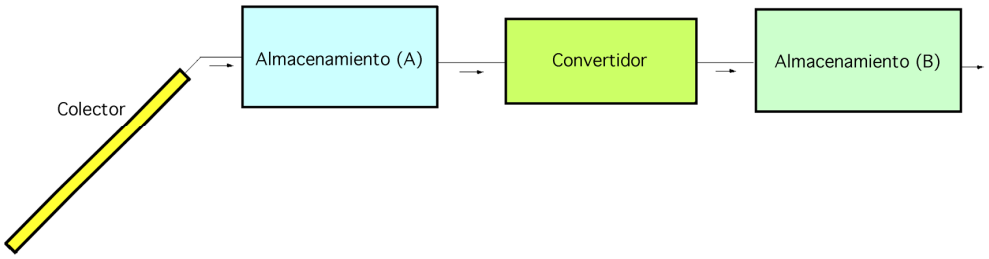


Fig V.1.- Esquema de almacenamiento alternativo

A la hora de diseñar el componente de almacenamiento de energía, pueden existir varias alternativas. Si por ejemplo se considera un proceso en el que un motor térmico transforma la energía solar en energía eléctrica, el almacenamiento se puede disponer:

- Como almacenamiento térmico entre el colector solar y el motor

- Como almacenamiento mecánico entre el motor y el generador

- Como almacenamiento químico en una batería (acumulador) entre el generador y la aplicación energética definitiva, como puede ser la refrigeración solar mediante un acondicionador de aire, o el frío generado por el acondicionador de aire que se puede almacenar en una unidad de almacenamiento térmico de baja temperatura por debajo de la del medio ambiente

Estas alternativas no son equivalentes, ni en la capacidad, ni en los costes, ni en las formas de diseño, ni en el COP del sistema. La capacidad necesaria en una unidad de almacenamiento, Fig V.1, en la posición B es inferior a la que hace falta en la posición A, debido a la eficiencia del convertidor que interviene. El almacenamiento de energía térmica en A tiene la ventaja de que el convertidor se puede diseñar para funcionar a un régimen más próximo al régimen estacionario, originando así una eficiencia de conversión superior y un factor de uso más alto en el convertidor.

La elección entre el almacenamiento de energía en A o en B puede tener efectos muy distintos en la temperatura de funcionamiento del colector solar, en el tamaño del colector y en el coste.

Estos argumentos se pueden modificar de forma sustancial, según se utilice o no energía auxiliar.

Las características principales de un sistema de almacenamiento de energía térmica son:

- Su capacidad por unidad de peso o de volumen

- El campo de temperaturas dentro del cual funciona, es decir, la temperatura a la que se aplica y se extrae calor del sistema

- Los medios para aplicar y extraer calor y las diferencias de temperatura asociadas con ellos

- La estratificación de la temperatura en la unidad de almacenamiento

- Las necesidades energéticas para añadir o extraer calor

- Los contenedores, depósitos y otros elementos estructurales asociados con el sistema de almacenamiento

- Los medios para controlar las pérdidas térmicas del sistema de almacenamiento

- Su coste

En cualquier sistema de almacenamiento de energía solar tienen un significado especial los factores que afectan al funcionamiento del colector.

La ganancia útil de un colector disminuye a medida que aumenta la temperatura media de la placa; una relación entre la temperatura media del colector y la temperatura a la cual transmite el calor, se puede poner en la forma:

$$T_{(colector)} - T_{(transmisión)} =$$

$$= \Delta T_{(transporte\ desde\ el\ colector\ al\ almacenamiento)} + \Delta T_{(almacenamiento\ de\ entrada)} + \Delta T_{(pérdida\ de\ almacenamiento)} + + \Delta T_{(salida\ de\ almacenamiento)} + \Delta T_{(transporte\ desde\ el\ almacenamiento\ a\ la\ aplicación)} + \Delta T_{(entrada\ en\ aplicación)}$$

La temperatura del colector, que es la que determina su ganancia útil, es más alta que la temperatura a la cual se utiliza el calor, debido a la suma de una serie de incrementos como consecuencia de las pérdidas, por lo que uno de los objetivos del diseño general del sistema y sobre todo de la unidad de almacenamiento, es el reducir al mínimo estas caidas de temperatura.

V.3.- ALMACENAMIENTO POR CALOR SENSIBLE PARA EL AGUA

El agua es un elemento útil, barato y fácilmente disponible para el almacenamiento de calor sensible, en forma de agua caliente sanitaria o agua para calefacción. La energía térmica solar se aplica al gasto G que circula por el colector y se extrae mediante un consumo m_L de agua sanitaria o calefactora en la unidad de almacenamiento, en donde se produce el intercambio térmico entre dichos fluidos. Si los sistemas están bien diseñados, los costes de bombeo son pequeños y de fácil cálculo; tanto las unidades de almacenamiento de agua, como el colector, pueden funcionar en circulación natural o forzada.

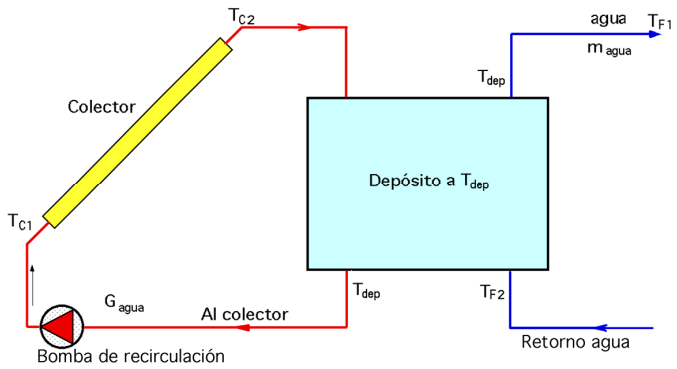


Fig V.2 .- Unidad de almacenamiento de depósito de agua con circulación de agua procedente del colector para aplicar energía calorífica y salida de la carga (agua sanitaria) para aprovechar dicha energía

La capacidad de almacenamiento de energía por unidad de líquido almacenado, que funciona en un intervalo finito de temperaturas, $\Delta T = T_{dep} - T_{F2}$, viene determinada por:

$$Q_{dep} = (m\, c_p)_{dep}\ (T_{dep} - T_{F2}) = C_{dep}\ (T_{dep} - T_{F2})$$

que es el calor comunicado al agua sanitaria entre las temperaturas T_{dep} y T_{F2}, m es el gasto másico de agua correspondiente en kg/seg y C_{dep} su capacidad calorífica

El margen de temperaturas en que la unidad puede funcionar viene determinado, en la mayoría de las aplicaciones, entre un límite inferior definido por las exigencias del proceso, y un límite superior definido por la presión de vapor del líquido.

Balance energético.- En régimen transitorio, el balance energético sobre el depósito de almacenamiento sirve para predecir su temperatura como una función del tiempo. Haciendo un balance energético sobre el depósito *sin estratificar*, la variación de energía interna del sistema tiene que ser igual a la suma de los calores y cargas puestos en juego:

$$C_{dep}\ \frac{dT_{dep}}{dt} = Q_{col} - P - (U\,A)_{dep}\ (T_{dep} - T_a)$$

ecuación en la que:

P *es la carga a la salida del depósito, función del tiempo*

Q_{col} *es la energía captada en el colector, que depende del tipo de colector:* $Q_{col} = C_{col}\ (T_{C2} - T_{dep})$

siendo: $\begin{cases} C_{col} \text{ la capacidad calorífica del fluido que circula por el colector} \\ T_{C2} \text{ la temperatura del fluido caliente a la salida del mismo} \end{cases}$

El gasto másico G que circula por el colector puede ser accionado o no por una bomba.

Si se supone que la tubería que conecta el colector con el depósito de almacenamiento está bien aislada térmicamente, se puede despreciar la caída de temperatura del fluido a lo largo de ella. Con

esta interpretación se puede poner:

$$Q_{col} = F\, C_{col}\, (T_{C2} - T_{dep})$$

en la que F es una función de control, cuyo valor oscila entre $\begin{cases} 1 \text{ cuando la bomba está funcionando} \\ 0 \text{ en otras circunstancias} \end{cases}$

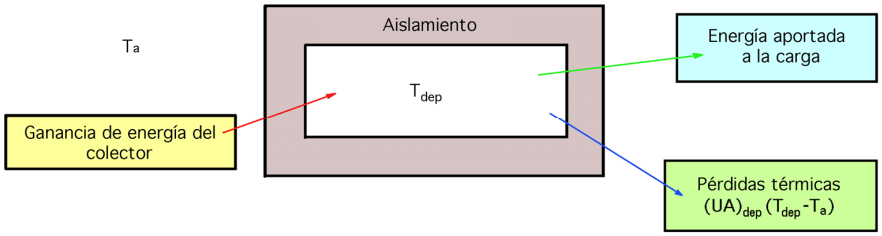


Fig V.3.- Almacenamiento sin estratificación de masa, con el ambiente a T_a

La función de control F proporciona las posiciones de marcha o parada del sistema de control de la bomba, que la acciona cuando T_{C2} es mayor que T_{dep} (es decir, cuando se puede aplicar energía a la unidad de almacenamiento); en estas circunstancias, la velocidad de flujo másico es FG.

Para una carga determinada se pueden presentar relaciones en donde los resultados conforman un sistema de ecuaciones, de forma que Q_{dep} viene determinado por la ecuación del rendimiento del colector y P por las exigencias de la carga. Estas ecuaciones se resuelven para obtener tanto la temperatura T_{dep} como las variaciones de energía en función del tiempo; también se puede incluir la energía auxiliar añadiéndola al depósito o al caudal que sale del mismo hacia la carga.

Depósito estratificado.- Los depósitos de agua pueden funcionar también con diversos grados de estratificación, es decir, cuando el agua no está a una temperatura uniforme, lo que origina densidades distintas estratificadas; ésto hace que según el agua vaya entrando busque su propio nivel de densidad, siempre que entre a baja velocidad.

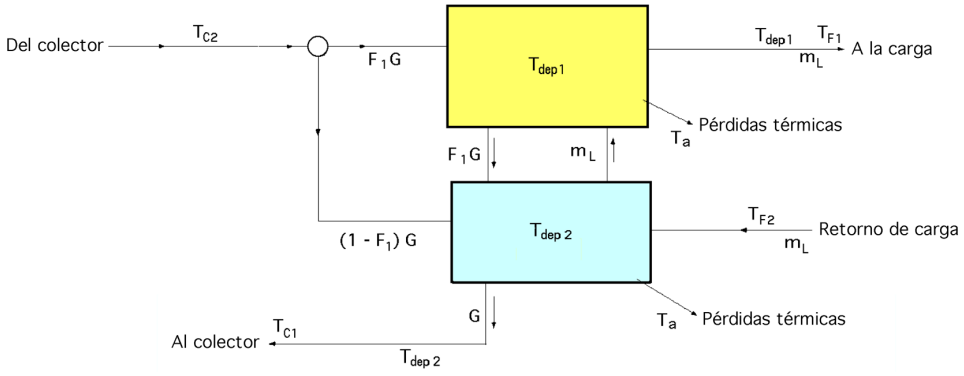


Fig V.4.- Sistema de almacenamiento de agua parcialmente estratificada

Si se considera, en régimen transitorio, un depósito de dos secciones, Fig V.4, para la superior se puede hacer el siguiente balance energético:

$$(m\,c_p)_{dep1}\ \frac{dT_{dep}}{dt} = F_1\ C_{col}\ (T_{C2} - T_{dep1}) + C_L\,(T_{dep2} - T_{dep1}) - (UA)_{dep1}\,(T_{dep1} - T_a)$$

El primer sumando es la ganancia del colector, multiplicada por una función de control F_1 que es:

$$\begin{cases} 1 \text{ cuando } T_{C_2} > T_{dep\,1} \\ 0 \text{ cuando } T_{dep\,1} > T_{C_2} > T_{dep\,2} \end{cases}$$

El segundo sumando representa la carga suministrada por la sección superior del depósito; el retorno de la carga para este sistema de almacenamiento, siempre se hará a la sección inferior.

- La carga suministrada por la sección de arriba, es:

$$(m\,c_p)_L\,(T_{dep1} - T_{dep2}) = C_L\,(T_{dep1} - T_{dep2})$$

- La carga suministrada por la sección de abajo, es:

$$(m\,c_p)_L\,(T_{dep2} - T_{L,ret}) = C_L\,(T_{dep2} - T_{L,ret})$$

siendo: $T_{L,ret} = T_{F_2}$ *, la temperatura de retorno de la masa* m_L

La carga total es:

$$(m\,c_p)_L\,(T_{dep1} - T_{L,ret}) = C_L\,(T_{dep1} - T_{L,ret}) = C_L\,(T_{dep1} - T_{F_2})$$

El término $(U\,A)_{dep1}\,(T_{dep1} - T_a)$ *son las pérdidas desde la sección superior al medio exterior*

Un balance energético para la segunda sección es:

$$(m\,c_p)_{dep2}\ \frac{dT_{dep2}}{dt} = F_1\ C_{col}\,(T_{dep1} - T_{dep2}) + (1 - F_1)\,C_{col}\,(T_{C_2} - T_{dep2}) + C_L\,(T_{F_2} - T_{dep2}) - (UA)_{dep2}\,(T_{dep2} - T_a)$$

V.4.- ALMACENAMIENTO DE N SECCIONES

Lo anteriormente visto se puede generalizar para un almacenamiento de N secciones, si se definen dos funciones de control, una para el lado del colector y otra para el lado de la carga.

Para el colector se puede poner:
$$\begin{cases} F = 1 \ \ ; \ \ T_{i-1} > T_{C_2} > T_i \\ F_i^C = 0, \text{ en otros casos} \end{cases}$$

Para la carga se tiene:
$$\begin{cases} F = 1 \ \ ; \ \ T_i > T_{F_2} > T_{i+1} \\ F_i^C = 0, \text{ en otros casos} \end{cases}$$

y el balance energético:

$$(m\,c_p)_i \frac{dT_i}{dT} = C_i \frac{dT_i}{dT} =$$

$$= C_{col} \{F_i^C (T_{C_2} - T_i) + (T_{i-1} - T_i) \sum_{j=1}^{i=1} F_j^C \} + C_L \{F_i^L (T_{F_2} - T_i) + (T_{i+1} - T_i) \sum_{j=1+1}^{N} F_j^L \} + (U\,A)_i (T_a - T_i)$$

Puede suceder que existan circunstancias en las que el fluido en el colector o en la carga no sea igual al del depósito de almacenamiento, como se presenta en la Fig V.5, en la que se observa un depósito único en el que los circuitos de las placas colectoras y de carga están separadas por intercambiadores.

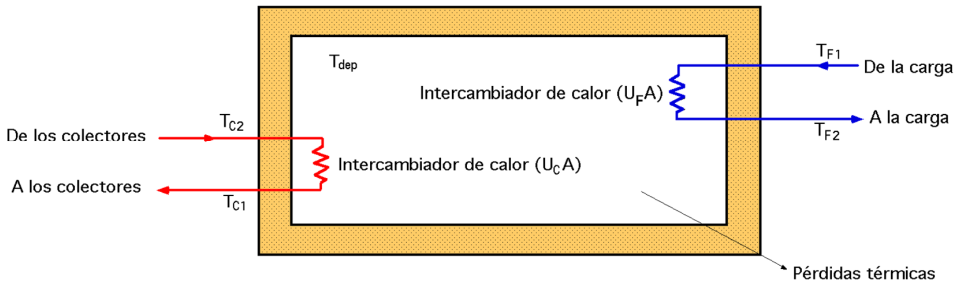


Fig V.5.- Depósito único en el que los circuitos de las placas colectoras y de carga están separadas por intercambiadores

Almacenamiento en lecho de rocas.- Una unidad de almacenamiento en lecho de rocas (guijarros o cantos) Fig V.6, se basa en la capacidad calorífica de ciertos materiales ligeramente compactos, a través de los cuales se hace circular un fluido, generalmente aire.

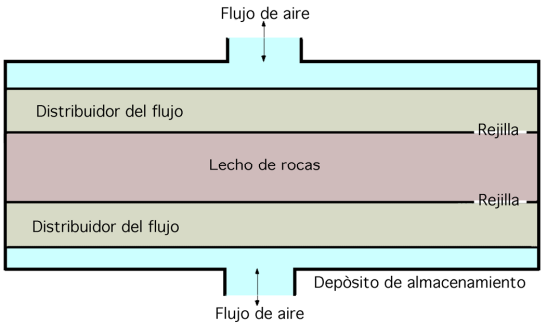


Fig V.6.- Almacenamiento en lecho de rocas

Para las aplicaciones de energía solar, los lechos de rocas bien diseñados, que utilizan la propia roca, tienen varias características interesantes, como:

- *El coeficiente de transferencia de calor entre el aire y el material sólido es alto*
- *El coste del material de almacenamiento es bajo*
- *La conductividad térmica del lecho es baja cuando no circula aire a su través*
-

Las partes que componen una unidad de este tipo de lecho compacto son:

- *Un contenedor*
- *Una estructura porosa para contener y apoyar el lecho*
- *Distribuidores de aire para el flujo en ambas direcciones que reduzcan al mínimo el paso del aire*

Durante el funcionamiento, el flujo pasa a través del lecho en una dirección aportando calor (generalmente hacia abajo) y en dirección contraria al extraer calor. No se puede aportar y extraer calor de esta unidad al mismo tiempo; ésta es una diferencia fundamental con los sistemas de almacenamiento de agua donde es posible aportar y extraer calor simultáneamente.

Las necesidades de aislamiento en la superficie exterior del lecho de rocas son mínimas, si el almacenamiento es para períodos de tiempo cortos, puesto que la conductividad térmica del lecho en las direcciones radiales es baja.

Los intercambiadores de lecho de guijarros tienen una transferencia de calor muy buena entre el aire y los sólidos del lecho, lo que tiende a reducir al mínimo las diferencias de temperatura entre el aire y los sólidos cuando se calienta el lecho y entre los sólidos y el aire cuando se enfría el lecho.

Se han realizado muchos estudios sobre el calentamiento y el enfriamiento de lechos de rocas o guijarros en sistemas químicos con materiales de relleno de tamaño uniforme y forma regular, pero pocos ofrecen un verdadero interés para las aplicaciones en los sistemas termosolares.

Para la determinación del coeficiente de transferencia de calor en lechos de guijarros se puede utilizar la expresión, (Lof y Hawley, 1948),

$$h_v = 650\ \frac{G^{0,7}}{D}$$

en la que:

h_v *es el coeficiente de transferencia de calor en,* $W/m^2°C$

G *es el gasto másico superficial en,* kg/m^2seg

D *es el diámetro equivalente del guijarro, en metros, de la forma:* $D = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}\ \frac{\text{Volumen neto de los guijarros}}{\text{Número de guijarros}}}$

Un lecho bien diseñado debe tener un tamaño de guijarros lo suficientemente pequeño como para que se reduzcan al mínimo los gradientes de temperatura en ellos.

Aplicando Biot al caso de esferas de radio R y conductividad térmica k, si $Bi = \frac{h_{Cv}\ R}{k} < 0,1$ la resistencia térmica de las partículas y sus gradientes de temperatura se pueden considerar despreciables, (sólidos con resistencia térmica interna despreciable), por lo que el nº de Biot pasa a ser de la forma:

$$Bi = \frac{h_{Cv}\ \frac{V}{A}}{k} < 0,1$$

en la que V es el volumen del lecho y A la superficie de contacto de los guijarros.

Tanto en los lechos de rocas experimentales como en los prácticos, se han utilizado tamaños de roca de aproximadamente 1 a 5 cm. Los tamaños de partículas deben ser bastantes uniformes con el fin de obtener una buena parte de espacios vacíos y así reducir al mínimo la caída de presión.

Si se considera un lecho de rocas de longitud total L dividido en N secciones iguales, de longitud Δx, y suponiendo que los gradientes de temperatura radiales son despreciables, se puede considerar que el material del lecho tiene una temperatura uniforme $T_{lecho,i}$ lo que implica el que el numero de Biot de las partículas del lecho sea inferior a 0,1.

Para valores del coeficiente de transferencia de calor bajos, la temperatura del fluido no es igual a la temperatura del lecho y será necesario hacer dos balances energéticos, uno para el lecho y otro para el fluido.

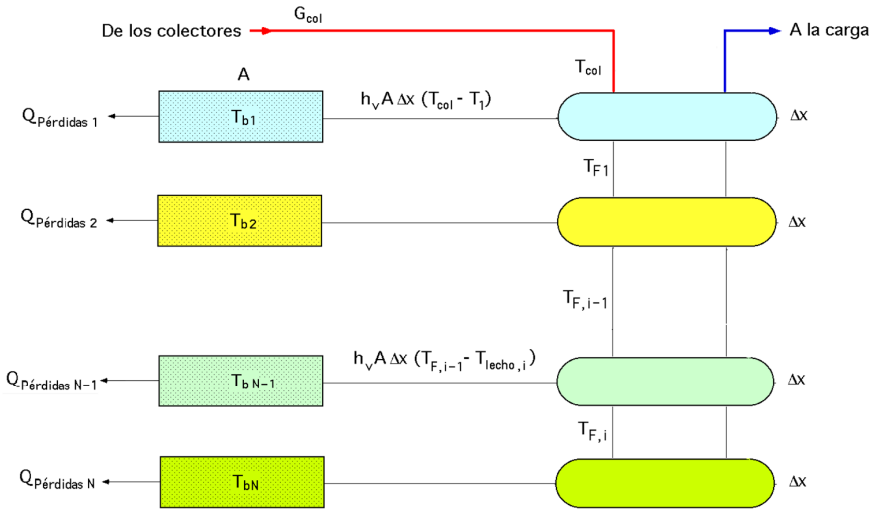


Fig V.7.- Aproximación numérica del lecho de rocas

El balance energético para el calentamiento del lecho (flujo de aire hacia abajo), para la sección **i** del lecho, según se muestra en la Fig V.7, es:

$$(\rho\ c_m\ A\ \Delta x)_{lecho}\ \frac{dT_{lecho,\,i}}{dt} = h_v A\ \Delta x\ (T_{F,\,i\text{-}1} - T_{lecho,\,i}\ ) - Q_{(pérdidas)_i}$$

en la que: $\begin{cases} \text{- } A \text{ es el área de la sección transversal del lecho y } \rho \text{ su densidad} \\ \text{- } c_m \text{ es el calor específico del material que lo compone} \end{cases}$

Las pérdidas al exterior $Q_{(pérdidas),i}$ se pueden representar en función de la temperatura interior y exterior del aire que rodea al lecho.

La temperatura del medio exterior, para el cálculo de las pérdidas de almacenamiento, no coincide con la temperatura del aire exterior, puesto que para algunos sistemas, como los utilizados en

el calentamiento de espacios habitables, la unidad de almacenamiento está situada dentro de la vivienda, por lo que en estos casos, las pérdidas de almacenamiento se convierten en ganancias.

Si la capacidad calorífica del fluido es despreciable en comparación con la capacidad calorífica del lecho, (el fluido es generalmente aire), la temperatura del fluido $T_{F,i}$ de la sección i viene dada por:

$$C_{col}\ (T_{F,\,i-1} - T_{F,\,i}) = h_v\ A\ \Delta x\ (T_{F,\,i-1} - T_{lecho,\,i})$$

$$T_{F,\,i} = T_{F,\,i-1} - \frac{h_v\ A\ \Delta x}{C_{col}}\ (T_{F,\,i-1} - T_{lecho,\,i})$$

lo que implica que en la elección de Δx hay que tomar un valor lo suficientemente pequeño para que secumpla la condición impuesta a las capacidades térmicas: $\frac{h_v\ A\ \Delta x}{C_{col}} < 1$

Las ecuaciones anteriores configuran dos sistemas de N ecuaciones para las N temperaturas desconocidas del lecho y para las N temperaturas también desconocidas del fluido.

Cuando se está extrayendo energía del lecho, se puede obtener un sistema de ecuaciones similar. Hay que tener en cuenta que la velocidad del fluido desde el colector puede que no sea igual a la de la carga, así como que el valor de h_v para el calentamiento del lecho puede no ser el mismo que en el enfriamiento.

Cuando el coeficiente volumétrico de transferencia de calor es grande, pero Bi < 0,1, la diferencia de temperaturas entre el lecho y el fluido se hace pequeña. La temperatura del fluido $T_{F,i}$ a la salida de una sección será entonces igual a la temperatura del fluido local del lecho $T_{lecho,i}$.

Las ecuaciones anteriores se pueden combinar en la forma:

$$(\rho\ c\ A\ \Delta x)_{lecho}\ \frac{dT_{lecho,\,i}}{dt} = C_{col}\ (T_{lecho,\,i-1} - T_{lecho,\,i}) - Q_{(pnrdidas)_i}$$

que representa un sistema de N ecuaciones para las N temperaturas del lecho y del fluido desconocidas.

V.5.- ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON CAMBIO DE FASE

Los materiales que experimentan cambio de fase dentro de un determinado campo de temperaturas, pueden resultar útiles para el almacenamiento de energía si se satisfacen algunos criterios, como que el cambio de fase tiene que ir acompañado por un elevado efecto del calor latente.

El cambio de fase se tiene que producir:

a) Con un superenfriamiento limitado

b) Tiene que haber medios disponibles para contener el material y transferir el calor hacia y desde él

c) El coste del material y de los contenedores tiene que ser razonable

Si se cumplen estos criterios, los sistemas de almacenamiento de energía con cambio de fase pueden llegar a tener unas capacidades de almacenamiento de energía interesantes funcionando dentro de pequeños intervalos de temperatura, con importantes reducciones de peso y volumen.

Una de las primeras unidades de almacenamiento de cambio de fase, que se estudiaron experimentalmente, para aplicaciones en calefacción de edificios fue el compuesto $(SO_4Na_2 \cdot 10\,H_2O)$, que se descompone a unos 32°C con un calor latente de fusión de 243 kJ/kg; la reacción es:

$$SO_4Na_2 \cdot 10\,H_2O + Calor \quad \Leftrightarrow \quad SO_4Na_2 + 10\,H_2O + 243 \ \frac{kJ}{kg}$$

La energía total añadida depende del campo de temperaturas dentro del cual se calienta el material, puesto que admite calor sensible (precalentamiento) para calentar la sal hasta la temperatura de transición, calor latente (fusión) para provocar el cambio de fase y calor sensible (sobrecalentamiento) para calentar el SO_4Na_2 y la solución hasta la temperatura definitiva.

La extracción de energía del almacenamiento es un proceso inverso y la reacción se produce de derecha a izquierda, invirtiéndose los efectos térmicos.

Este sistema plantea una dificultad práctica, que consiste en la disminución del COP cuando se repiten los ciclos, con la consiguiente reducción de la capacidad térmica del sistema; ésto es debido a que por encima del punto de fusión del $(SO_4Na_2 \cdot 10\,H_2O)$ a medida que su temperatura en el sobrecalentamiento aumenta, las fases líquida (solución) y sólida (sal) del SO_4Na_2 se separan, y como la densidad de la sal es más alta que la densidad de la solución, se puede llegar a producir una separación de fases, hecho que no interesa y que hay que evitar.

Una posibilidad que tiende a soslayar este problema, está basada en utilizar materiales con un adecuado punto de fusión; la transición del hielo a agua constituye un buen ejemplo que ha sido muy utilizado como almacenamiento de energía durante siglos; actualmente se consideran las parafinas como posibles medios de almacenamiento de energía.

Tabla V.1.- Mezclas eutécticas de interés para el almacenamiento de energía térmica

Composición	*Punto de fusión ºC*	*Calor latente Kcal/kg*
$Cl_2Ca + Cl_2Mg + H_2O$ (41-10-49)	25	41,7
$\{Mg(NO_3)_2 \cdot 6\,H_2O\} + \{Al(NO_3)_3 \cdot 9\,H_2O\}$ (53-47)	61	35,4
Acido acetamina esteárico (17-33)	65	52
Urea - NO_3NH_4 (45,3-54,7)	46	41
$SO_4Na_2 + 10\,H_2O$	32,5	60,5
$LiNO_3 + 3\,H_2O$	30	70,7
$Mg(NO_3)_2 + 2\,H_2O$	130	
$Mg(NO_3)_2 + 6\,H_2O$	90	38,2

Los compuestos con puntos de fusión congruentes como el $\{Fe(NO_3)_2 \times 6\ H_2O\}$ funden de igual manera que las sustancias puras; también se están considerando eutécticos Tabla V.1.

Otras consideraciones relativas a los materiales de almacenamiento con cambio de fase, tratan sobre la posibilidad del sobreenfriamiento en la recogida de energía; si la materia se sobreenfría puede que no se recobre el calor latente de la fusión o que se pueda recobrar a una temperatura significativa por debajo del punto de fusión. Este problema se ha estudiado desde tres puntos de vista, mediante:

- Una selección de materiales que no tienen una tendencia fuerte al sobreenfriamiento
- La adición de agentes nucleantes
- Medios ultrasónicos de nucleación

Con estas consideraciones, la viscosidad de un material en el punto de fusión es un factor principal a la hora de determinar la capacidad de formación del cristal en la fusión y, por lo tanto, su tendencia al sobreenfriamiento. El fluido que transfiere calor (generalmente el aire) se hace circular sobre los recipientes como en lecho de rocas, por lo que el problema de transferencia de calor por el exterior de los recipientes, es parecido al de un lecho de rocas.

Internamente se pueden considerar dos fenómenos adicionales:

- El calor latente, que aporta una gran cantidad de calor específico en un rango muy pequeño de temperaturas
- La resistencia térmica a la transferencia de calor dentro del material, que es variable con el grado de solidificación si se produce un calentamiento o un enfriamiento del material

A medida que se extrae calor de un material con cambio de fase, se produce una cristalización en las paredes del recipiente; cuando el material solidificado se va calentando, la fusión se produce primero en las paredes y luego se va adentrando hacia el interior del material. Hay que tener en cuenta otros factores prácticos, como la corrosión, pérdidas térmicas laterales, presión de vapor, toxicidad y coste.

V.6.- CAPACIDAD DE LOS MEDIOS DE ALMACENAMIENTO

No se pueden hacer comparaciones entre los medios de almacenamiento sin considerar un proceso solar total, incluyendo las características de los colectores solares asociados, cargas sobre el proceso, ciclos meteorológicos más probables, costes y muchos otros factores. En la Tabla V.2 se muestran algunos datos referentes a las propiedades de los posibles medios de almacenamiento útiles, que no resultan suficientes por sí mismos para poder apreciar las propiedades relativas de los medios, pero sí dan una indicación de sus capacidades, pesos y volúmenes necesarios para el almacenamiento de una cantidad dada de energía para cualquier rango de temperaturas; estos datos pue-

den sacarse de manuales standard. Los datos presentados en la tabla son de medios que podrían utilizarse en aplicaciones para el calentamiento y el enfriamiento de edificios; se aplican consideraciones idénticas en el almacenamiento de energía a altas temperaturas.

El rango de temperatura puede variar desde 90°C hasta 150°C (almace-namiento para un proceso de acondicionamiento de aire), llegando hasta valores de 800°C a 1000°C (en una aplicación de un motor térmico).

Los principales factores que determinan la capacidad óptima de los sistemas de almacenamiento para edificios son:

a) El coste de la unidad de almacenamiento incluye:

- El coste de los recipientes
- El medio de almacenamiento
- El lugar donde se sitúa
- El coste de funcionamiento de la unidad de almacenamiento (costes de desplazamiento del medio que transfiere calor)

b) El efecto que la capacidad de almacenamiento tenga sobre el funcionamiento del resto del sistema y sobre todo sobre el colector.

Una unidad de almacenamiento más pequeña, funcionando a una temperatura media más alta, puede llegar a producir pérdidas grandes a la salida del colector, en comparación con sistemas parecidos con unidades de almacenamiento grandes, matizando el hecho de que el almacenamiento a corto plazo para cubrir cargas para períodos de unos cuantos días, puede resultar el más económico para aplicaciones en la construcción

c) Hay que considerar que las pérdidas térmicas de la unidad de almacenamiento dependen de la diferencia de temperaturas entre el medio de almacenamiento y el ambiente; la transferencia total de energía es también función de su tiempo de almacenamiento.

Tabla V.2.- Calor específico y densidad para medios de almacenamiento de energía, dentro del rango de temperaturas de funcionamiento de colectores de placa plana.

Material	*c_p (kJ/kg°C)*	*Densidad (kg/m³)*
Agua (líquida)	*4,19*	*1000*
Agua (hielo)	*2,2*	
Piedras	*0,84*	*2500 a 3500*
Ferralla (Virutas de hierro)	*0,5*	*7860*
SO_4Na_2 x 10 H_2O (solución)		*1460*
SO_4Na_2	*0,92*	*2700*
CO_3Ca	*0,96*	*2900*
Al_2O_3	*1*	*4000*
Hormigón	*1,13*	*2240*
Ladrillos	*0,84*	*2240*

Si se considera el almacenamiento de energía durante períodos largos, las pérdidas térmicas pueden ser importantes, llegándose a la conclusión de que para calefacción de casas, el almacenamiento durante largos períodos parece no ser muy viable económicamente. Hay que recalcar que en algunas operaciones, sobre todo en calefacción de viviendas, la unidad de almacenamiento se puede situar dentro del espacio al cual va a aplicarse calor; en estas condiciones, las pérdidas de la unidad al ambiente no se pueden considerar como tales, ya que se trata de una transferencia de energía incontrolada desde el almacenamiento al espacio a calentar. La situación puede resultar crítica en los sistemas de refrigeración de viviendas, si las pérdidas térmicas del almacenamiento se añaden a la carga de enfriamiento.

Métodos alternativos de almacenamiento.- Se pueden considerar otras formas de almacenamiento de energía para aplicaciones específicas, como:

a) La conversión de energía mecánica en potencial y recobrar la energía potencial cuando se desee; de esta forma se tiene un almacenamiento energético para sistemas mecánicos. Estos sistemas pueden bombear agua a una reserva elevada durante los períodos en que existe radiación solar disponible y recobrar la energía haciendo circular el agua a través de una turbina cuando hiciese falta la energía.

Este método añade dos ineficiencias al sistema total, como son la bomba y la turbina, siendo la eficiencia del sistema de almacenamiento el producto de las dos.

b) Se pueden concebir procesos en los que la radiación solar produzca una descomposición fotoquímica; un ejemplo de ésto es la composición fotoquímica del, $NOCl$, de la forma:

$$2\ NOCl + fotones \rightarrow 2\ NO + Cl_2$$

pudiéndose llevar a cabo la reacción inversa para recobrar la energía de los fotones que entran en la reacción. En este caso, el almacenamiento en el sistema sería debido a los productos químicos y la unidad de almacenamiento consistiría en recipientes para cada uno de los productos.

c) Los productos que generan energía eléctrica a partir de energía química, la pueden almacenar en baterías eléctricas; se pueden considerar varios tipos de baterías o sistemas de almacenamiento de células energéticas que incluyen baterías de Pb, Ni-Fe y Ni-Cd.

Las eficiencias de estos sistemas varían del 60% al 80%, para cifras de descarga bajas y cifras de carga moderadas; también es posible descomponer electrolíticamente el agua con energía eléctrica generada mediante técnicas solares, almacenando oxígeno e hidrógeno y volverse a combinar en una célula energética para recuperar la energía eléctrica.

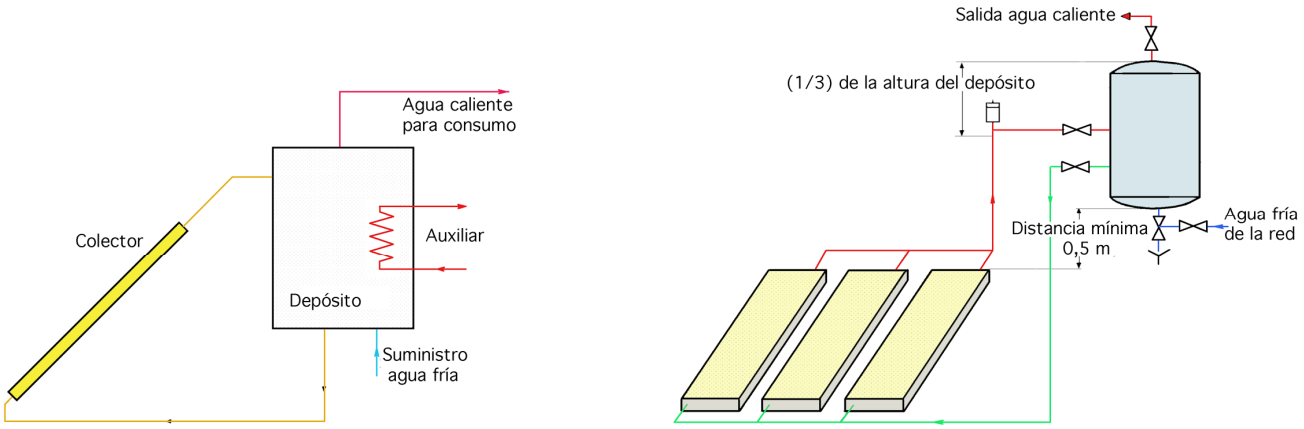
Estos sistemas de almacenamiento tienen un coste elevado por (kW/hora) almacenado y se pueden aplicar a situaciones de baja capacidad, como el suministro de potencia auxiliar para vehículos

espaciales, suministros de potencia para repetidores telefónicos aislados, suministros de potencia para instrumentación, etc.

La cuestión del almacenamiento de energía no se puede separar completamente de la de utilización del suministro de energía auxiliar; para determinar el tamaño óptimo del colector y de la unidad de almacenamiento en una aplicación concreta, se puede realizar un análisis del COP de los sistemas, costes del equipo solar y costes de la energía auxiliar (convencional) y así hallar las cantidades relativas tanto de energía solar, como de energía auxiliar, que se deben suministrar.

V.7.- SISTEMAS DE CALEFACCION SOLAR

Las consideraciones planteadas en el diseño de sistemas de calentamiento de agua, se pueden ampliar a sistemas de calefacción y refrigeración solar. Los elementos constructivos básicos de los calentadores de agua solares más corrientes son el $\begin{cases} \text{- } \textit{colector de placa plana} \\ \text{- } \textit{depósito de almacenamiento} \end{cases}$.



a) Con aporte de energía auxiliar al depósito de almacenamiento *b) Con el depósito por encima del colector*

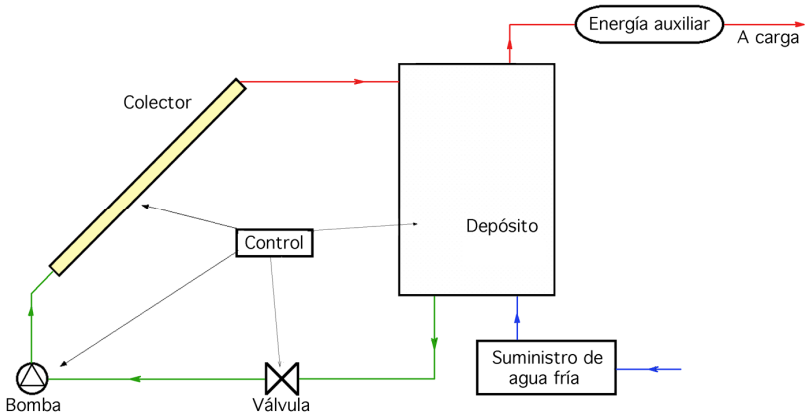
Fig V.8.- Calentador de agua con circulación natural.

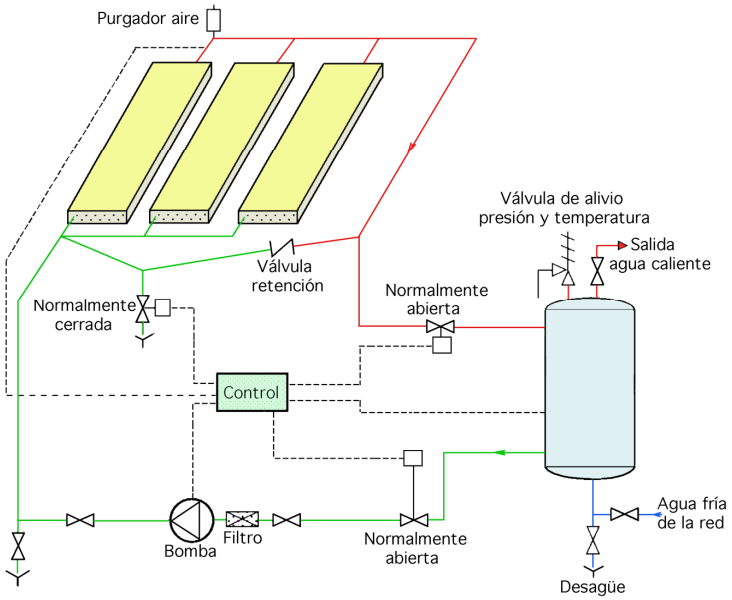
Los colectores se conectan para cubrir una carga, (generalmente se dispone de energía auxiliar), y se tienen que incluir los medios para la circulación de agua y el control del sistema; un esquema práctico de un ejemplo de un sistema de circulación natural se muestra en la Fig V.8.

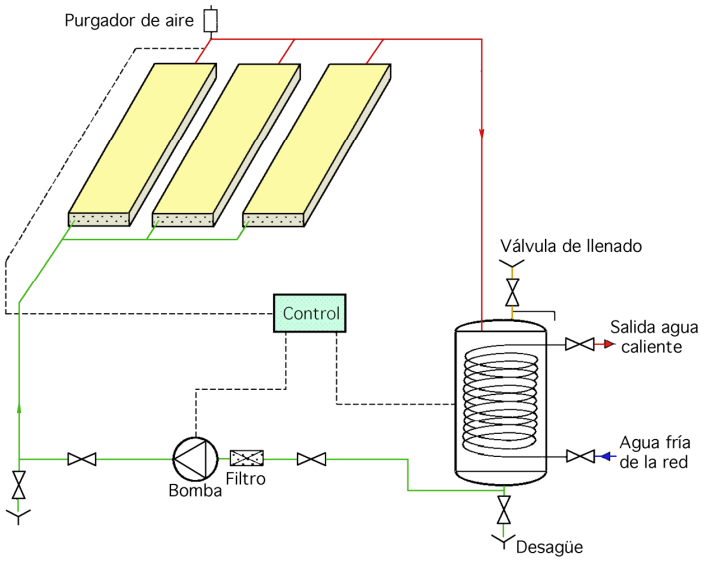
En este dispositivo el depósito está situado por encima del colector, y el agua circula por convección natural siempre que la energía solar en el colector aporte la suficiente energía al agua que asciende por el mismo, estableciéndose así un gradiente de densidades que provoca el movimiento del fluido por convección natural.

La energía auxiliar se aplica en la parte superior del depósito, y tiene como misión mantener el agua caliente en esta zona del depósito, a un nivel de temperatura mínimo, necesario y suficiente para cubrir las cargas y mantener la circulación. En las Fig V.9 se muestran otros esquemas, con agua en circulación forzada, en los que no es necesario colocar el depósito por encima del colector,

aunque sí es necesaria una bomba que, generalmente, va controlada por control diferencial que la acciona y pone en marcha cuando la temperatura detectada por un sensor colocado a la salida del colector está varios grados por encima de la temperatura del agua en la parte inferior del depósito.







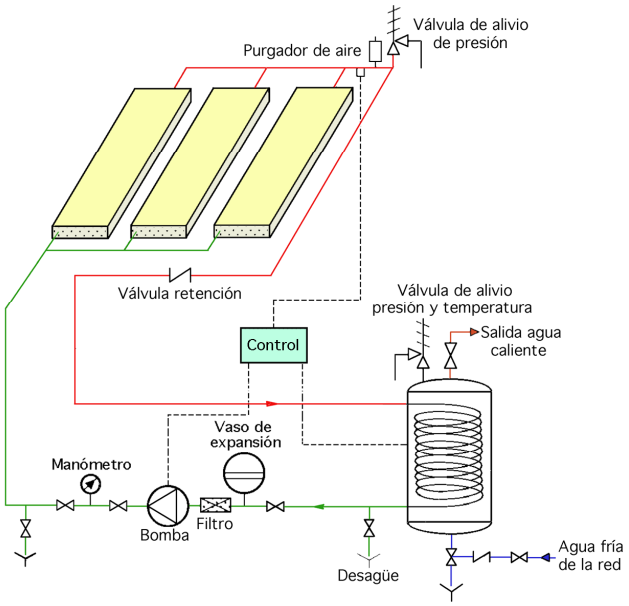


Fig V.9.- Calentadores de agua con circulación forzada

V.8.- COLECTORES Y DEPÓSITOS DE ALMACENAMIENTO

El tipo de colectores de placa más comúnmente utilizado se muestra esquemáticamente en la Fig V.10, en la que se observa que los tubos captadores por cuyo interior circula el agua a calentar, están dispuestos paralelamente y tienen diámetros comprendidos entre 1,2 cm y 1,5 cm con una separación entre 12 y 15 cm y van soldados o embutidos tanto a la placa colectora como a los tubos colectores distribuidores, que tienen un diámetro de 2,5 cm aproximadamente.

Las placas colectoras se construyen generalmente de cobre, aunque existen sistemas que utilizan placas colectoras de hierro galvanizado; las placas de absorción se montan en una caja de metal, o de cemento, con un aislamiento de 5 a 10 cm de espesor en la cara posterior de la placa y con una o dos cubiertas de cristal, de forma que para la cámara de aire se deje una separación entre las mismas del orden de 2,5 cm.

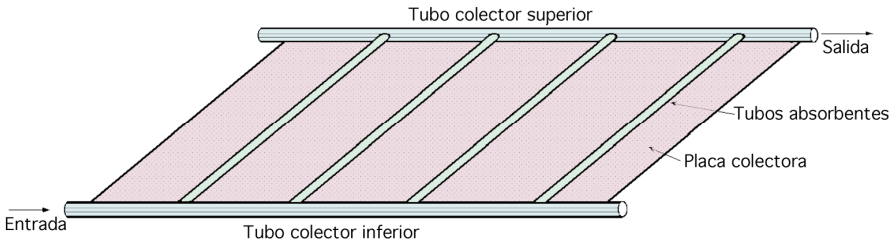


Fig V.10.- Placa colectora y tubos en un colector convencional

Las dimensiones de un colector pueden ser, normalmente, de (1,2 x 1,2) m^2, pudiéndose utilizar en la instalación grupos de colectores montados en serie, en paralelo o en otras disposiciones.

Se pueden utilizar otros tipos de tubos para transferir la energía captada en la placa colectora al fluido que circula, como un tubo único en forma de serpentín en lugar de los tubos paralelos, con lo

que se eliminan los colectores extremos, o un conjunto formado por una placa plana y otra ondulada unidas por soldadura eléctrica por resistencia, de tal forma que a través de las ondulaciones entre placas circula el agua, como se muestra en la Fig V.11.

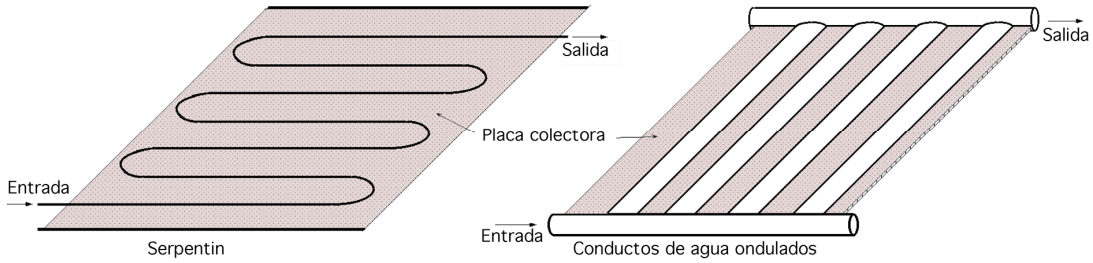


Fig V.11.- Alternativas para calentadores de agua de placas, a) Tubo único; b) Tubo de placa ondulada.

Los depósitos de almacenamiento tienen que estar aislados térmicamente; por regla general se puede utilizar un aislamiento de lana mineral en los costados, en la parte superior, y en la inferior, de unos 20 cm de espesor; también hay que aislar térmicamente las tuberías que van desde el colector al depósito, por lo que se tienen que diseñar y calcular muy bien, para reducir al mínimo las pérdidas de carga y las caídas de presión; en unidades domésticas se utilizan tuberías de 2,5 cm de diámetro o más, con tramos de longitud tan corta como sea posible. Es necesario que la estratificación se pueda mantener en los depósitos de almacenamiento dentro de unos límites, por lo que tanto su situación y posición, como el diseño de las conexiones de los depósitos es muy importante.

V.9.- CARGAS Y DIMENSIONADO DE SlSTEMAS

El dimensionado óptimo de un calentador solar de agua que cubra un determinado servicio de agua caliente, depende de una serie de factores, como:

- *Las inversiones necesarias para el proyecto y construcción del sistema de energía solar*
- *Los costes de la energía auxiliar*
- *La latitud del lugar que influye en la orientación del colector, el clima, horas de sol, etc*
- *La temperatura del agua fría a suministrar*

Para el caso de suministros domésticos de agua caliente se dispone de un gran número de experiencias a partir de las cuales se han desarrollado muchos diseños y proyectos, tendentes a producir agua a 65°C y un consumo medio de 45 kg por persona y día; en estos casos, si se utilizan sistemas totalmente solares en regiones en las que el clima es muy soleado y los combustibles convencionales costosos, se sugieren capacidades de almacenamiento del orden de 2,5 veces la necesidad diaria, mientras que si se va a utilizar una fuente auxiliar de energía, el tamaño del depósito que se recomienda es de unas 1,5 veces la necesidad media diaria.

Así para una familia de cuatro personas en un clima soleado, se sugiere una superficie del colector de unos 4 m^2 orientada al Sur, con una inclinación respecto a la vertical del orden de 0,9 l para

que la captación de energía solar anual sea lo más óptima posible.

La magnitud y la dependencia temporal de las cargas en edificios institucionales son más fáciles de predecir que en residencias particulares, quedando garantizado el diseño de los sistemas haciendo una mayor inversión en los mismos.

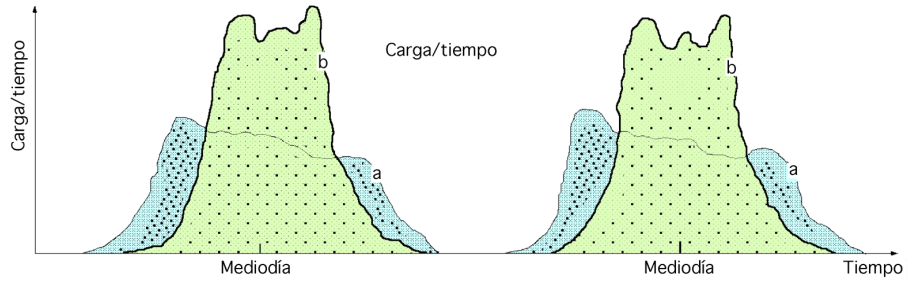


Fig V.12.- Esquema de la dependencia en el tiempo de las cargas energéticas en un sistema de agua caliente: a) residencia; b) laboratorio u oficina

En la Fig V.12 se muestra un esquema de las necesidades de agua caliente de dos edificios, en función del tiempo, como pueden ser una residencia (a) y un laboratorio o bloque de oficinas (b).

Los sistemas de circulación forzada se utilizan en grandes instalaciones, siendo los colectores en estos casos más grandes que los módulos individuales descritos anteriormente.

V.10.- ENERGÍA AUXILIAR

En un proceso de calentamiento de agua por energía solar se puede obtener un grado de fiabilidad óptimo que cubra una carga determinada, teniendo en cuenta el tamaño correcto de las unidades de almacenamiento y el de una fuente de energía auxiliar.

En zonas de muy alta disponibilidad de energía solar, donde pocas veces haya nubes con una permanencia significativa, resulta práctico cubrir las cargas totales mediante sistemas de paneles termosolares; sin embargo, en climas de baja disponibilidad de radiación, (típico de los climas templados), es necesario disponer de un sistema auxiliar de alta fiabilidad para así evitar un sobredimensionamiento excesivo del sistema de paneles para la captación de energía solar, y evitar inversiones innecesarias.

La energía auxiliar se puede disponer de tres formas:

- *Mediante el aporte de energía al depósito como se indica en la Fig V.8*
- *Aportando energía al agua a la salida del depósito, tal como se muestra en la Fig V.9*
- *Suministrando energía directamente al agua de alimentación, a la entrada, realizando un by-pass en el depósito*

Los dos primeros métodos son los de uso más corriente; teniendo en cuenta diferentes condiciones de temperatura ambiental, hora del día, y magnitud de las cargas, se ha calculado la fracción

relativa de las cargas alimentadas y cubiertas por energía solar y por la energía auxiliar, y se ha encontrado que cuando los colectores funcionan en márgenes de temperaturas ligeramente por encima de las temperaturas ambientales, el método de aportación de energía auxiliar no resulta práctico mostrando el método (*b)* ligeras ventajas sobre los demás.

No obstante, si se eleva la temperatura mínima del agua en 20°C, el método (*b)* presenta ventajas significativas sobre el método (*a)* que, a su vez, es superior al método *(c)*. Las razones que originan los cambios en el COP cuando se modifica el método de aportación de energía auxiliar, conciernen directamente a la temperatura de funcionamiento del colector.

El suministro de energía auxiliar en la parte superior del depósito, método (*a)*, da como resultado una temperatura media mas alta, peor rendimiento del colector, y unas necesidades mas grandes de energía auxiliar.

El método *(c)* que hace un by-pass en el depósito cuando su parte superior no está lo suficientemente caliente, desaprovecha parte de la energía solar captada en el colector.

El método *(b)*, con un calentador auxiliar modulado, maximiza la utilización del colector solar en cuanto al funcionamiento y minimiza las pérdidas del colector, funcionando éste a una temperatura media más baja que en cualquiera de los otros casos.

V.11.- DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO EN LOS COLECTORES

Un diseño standard y los cálculos de rendimiento de colectores se basan en el supuesto de una distribución uniforme del flujo ascendente de agua para cualquier tipo de colector; si éste flujo no es uniforme, las partes del colector que se corresponden con las subidas y que tienen un flujo de agua bajo, pueden llegar a alcanzar temperaturas significativamente más elevadas que aquellas otras que tengan velocidades de flujo más altas, por lo que el diseño de la disposición de los tubos colectores, tanto en los sistemas de colectores individuales como en los sistemas de colectores múltiples con circulación forzada es muy importante, ya que de ello depende la obtención de un buen rendimiento del colector. Los colectores con circulación natural tienden a corregir el flujo ellos mismos y en estos casos el problema es menor.

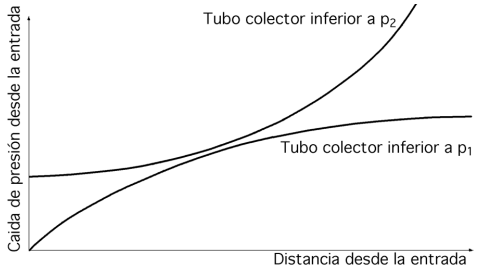


Fig V.13.- Distribución de presión en los tubos colectores de un banco isotérmico de absorbedores

Los experimentos realizados en diversos bancos de colectores solares, han proporcionado en los tubos colectores superior e inferior una distribución de presiones, tal como se indica en la Fig V.13, en la que se observa que las implicaciones de estas distribuciones de presión son evidentes; las caídas de presión de abajo hacia arriba resultan mayores en los extremos que en la parte central, dando lugar a flujos altos en las subidas extremas y flujos bajos en las subidas centrales.

Por lo que respecta a las temperaturas en las placas absorbentes, los datos obtenidos en diversas experiencias muestran, del centro a los extremos, diferencias de temperaturas entre 10°C y 20°C, lo que constituye una falta de uniformidad bastante significativa; éste problema se puede minorar:

- *Conectando en serie unidades de baterías en paralelo*
- *Conectando en paralelo múltiple baterías en serie*

tal como se muestra en la Fig V.14, obteniendo como resultado una distribución del flujo y de las temperaturas más uniforme.

Se recomienda que los colectores se diseñen con tubos lo suficientemente grandes, de forma que la caída principal de presión se origine en las subidas:

- *Los bancos de hasta 24 subidas son interesantes para la circulación natural y para la forzada*
- *Los bancos de circulación forzada de más de 24 subidas no se deben conectar en paralelo con más de 16 subidas*
- *Para series de bancos mayores se pueden usar conexiones en paralelo de baterías en serie*

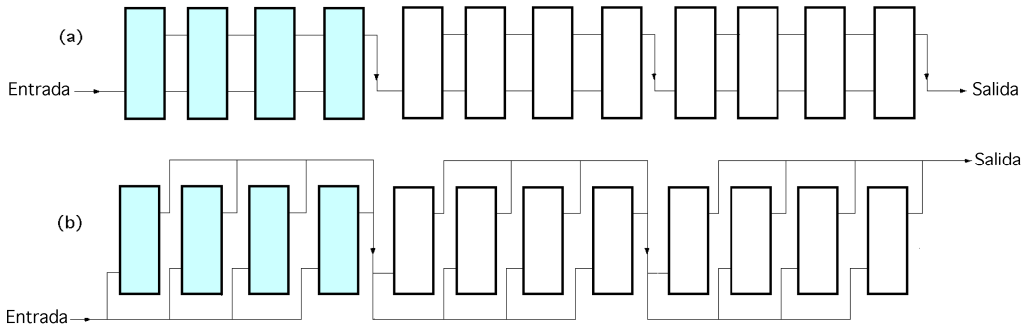


Fig V.14.- Métodos de conectar bancos de colectores: a) Conexión en serie de unidades de baterías en paralelo; b) Conexión en paralelo múltiple de baterías en serie

V.12.- TEMPERATURAS AMBIENTALES BAJO CERO

La temperatura del medio ambiente por debajo de 0°C impone problemas especiales en los sistemas de calentamiento de agua, ya que los colectores pueden estar expuestos a condiciones ambientales sin que haya radiación solar, durante largos períodos de tiempo; en estas circunstancias se pueden considerar tres tipos de soluciones posibles:

- *Los colectores se diseñan de forma que se vacíen durante los períodos en que no estén funcionando, o cuando exista la posibilidad de congelación*

- En los colectores y en el intercambiador se pueden utilizar soluciones anticongelantes

- Los colectores se pueden diseñar para resistir ocasionalmente pequeñas congelaciones utilizando técnicas especiales, como tubos colectores superiores de goma butílica

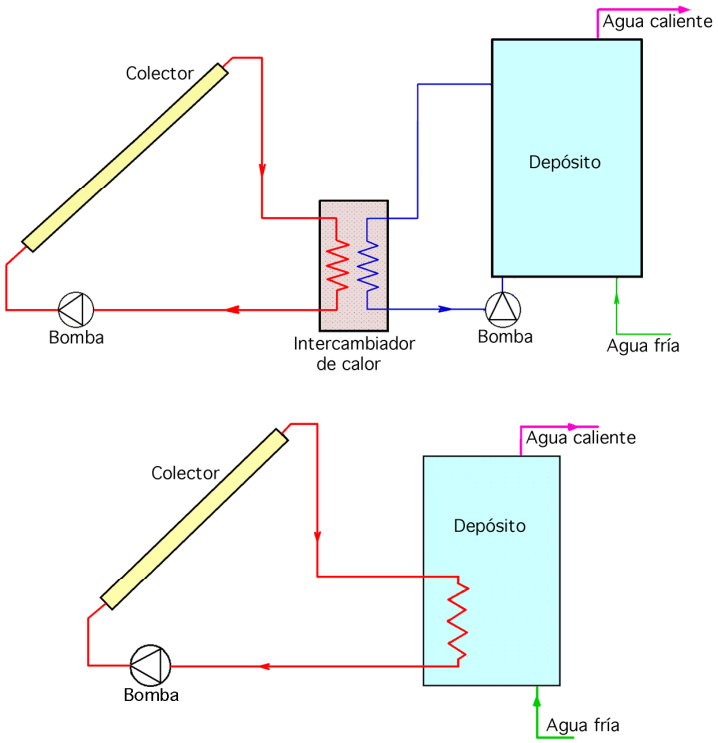


Fig V.15.a.b.- Utilización de líquidos anticongelantes en colectores solares para calentamiento de agua

La mayoría de las aplicaciones de calentadores de agua se hacen en condiciones en las que la congelación no constituya ningún problema; el uso de un líquido anticongelante impone el uso de un intercambiador adicional entre el colector y el depósito de almacenamiento, con disposiciones tales como las que se indican en las Fig V.15. Estos intercambiadores aumentan la temperatura de funcionamiento del colector en una cantidad que se corresponde con la caída de temperatura a través del cambiador; como regla empírica aproximada, cada °C de caída de temperatura en el cambiador implica un colector correspondientemente mayor.

V.13.- CALEFACCIÓN SOLAR

El calor necesario para el acondicionamiento de edificios se puede suministrar mediante técnicas de energía solar con sistemas que, conceptualmente, no son más que versiones mayores de los utilizados en el calentamiento de agua.

Los fluidos utilizados más corrientemente para la transferencia de calor son, el agua y el aire. En los climas templados, se tiene que disponer de una fuente energética auxiliar convencional y el problema de diseño se reduce a decidir la combinación óptima entre la energía solar y la energía auxiliar.

Las *casas solares* que se han construido son edificios con grandes ventanas orientadas al Sur, concebidas para captar la radiación solar cuando el Sol esté bajo, durante el invierno.

Las ganancias térmicas que se pueden lograr con ventanas debidamente orientadas son significativas, aunque en los climas fríos es muy importante controlar las pérdidas térmicas durante los períodos de baja radiación solar, sobre todo durante la noche y tiempo nublado, para así poder conseguir ganancias adecuadas.

Sistemas de calefacción solar.- Los componentes principales de los sistemas solares de calefacción son:

- *El colector*
- *El sistema de almacenamiento*
- *La fuente de energía auxiliar convencional*

Para estos sistemas resulta útil considerar cuatro modos operativos básicos de funcionamiento, según sean las condiciones existentes en un momento determinado:

- *Si hay energía solar disponible y no hace falta calor en el edificio, la ganancia energética procedente del colector se añade al sistema de almacenamiento*
- *Si hay energía solar disponible y hace calor en el edificio, la ganancia energética se utiliza para cubrir otras necesidades del edificio*
- *Si no hay energía solar disponible, y hace falta aplicar calor en el edificio y la unidad de almacenamiento tiene cierta cantidad de energía almacenada, se utiliza dicha energía almacenada para cubrir las necesidades del edificio*
- *Si no hay energía solar disponible, y hace falta calor en el edificio, y la unidad de almacenamiento se ha agotado, entonces hay que utilizar la energía auxiliar convencional para cubrir las necesidades del edificio*

Hay que tener en cuenta una quinta situación según que la unidad de almacenamiento pueda estar totalmente calentada, sin cargas que cubrir, y con el colector en situación de ganar energía; en estas circunstancias no hay forma de utilizar ni almacenar la energía recogida y ésta no se puede aprovechar, por lo que tiene que desperdiciarse.

Sistema de calefacción de aire.- La Fig V.16 muestra el esquema de un sistema básico de calentamiento de aire con una unidad de almacenamiento en lecho de guijarros y un sistema de energía auxiliar; el medio de almacenamiento (guijarros) está contenido en la unidad de almacenamiento, mientras que el aire es el fluido utilizado para trasvasar la energía desde el colector al almacenamiento del edificio.

Los modos de funcionamiento se pueden conseguir mediante una adecuada disposición de las válvulas de distribución; con este sistema no es posible aportar y extraer energía al mismo tiempo; la utilización del sistema auxiliar se puede cambiar con el de suministro de energía al edificio desde

el colector, o desde el almacenamiento, si dicho suministro es inadecuado para cubrir las cargas.

El ventilador-compresor está en el lado de la corriente ascendente al colector, lo que permite que los colectores funcionen a presiones ligeramente superiores a la atmosférica; también se puede situar el ventilador de forma que la presión en los colectores sea inferior a la presión atmosférica, lo que puede resultar ventajoso para controlar los escapes.

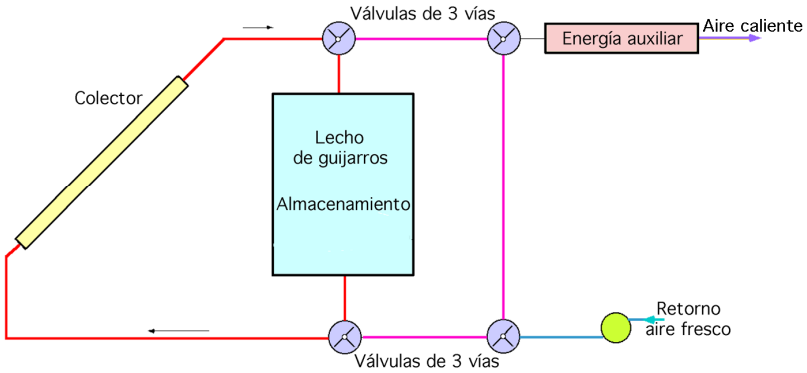


Fig V.16.- Esquema del sistema básico de aire caliente

Los sistemas que se basan en este procedimiento, cuando se les compara con los que utilizan agua como medio de transferencia de calor, tienen varias *ventajas* como:

- No existen problemas de congelación en los colectores

- Los problemas en el diseño se reducen al mínimo para los casos de sobrecalentamiento durante los períodos en los que no se extraiga energía

- Los sistemas de calefacción de aire son de uso corriente

- Los problemas de corrosión se reducen al mínimo

- En estos sistemas se utilizan equipos de control convencionales

Los *inconvenientes* son:

- El coste relativamente alto del bombeo del fluido, sobre todo si no se diseña con cuidado la unidad de almacenamiento

- Unos volúmenes relativamente grandes de almacenamiento

- La dificultad de añadir acondicionadores de aire a los sistemas por absorción convencionales

Para calcular el COP de un edificio por energía solar, equipado con sistemas para calentamiento de agua doméstica, calefacción de espacios y acondicionamiento de aire, se pueden utilizar modelos de uno o varios componentes cuyo estudio permite determinar el rendimiento térmico y cómo estas predicciones del rendimiento se pueden utilizar para llegar a sistemas con un mínimo coste total. En la Fig V.17 se muestra esquemáticamente un sistema de calefacción sin aire acondicionado; la mayoría de los parámetros de diseño como son el área del colector y su superficie óptima, se seleccionan de acuerdo con la climatología del lugar.

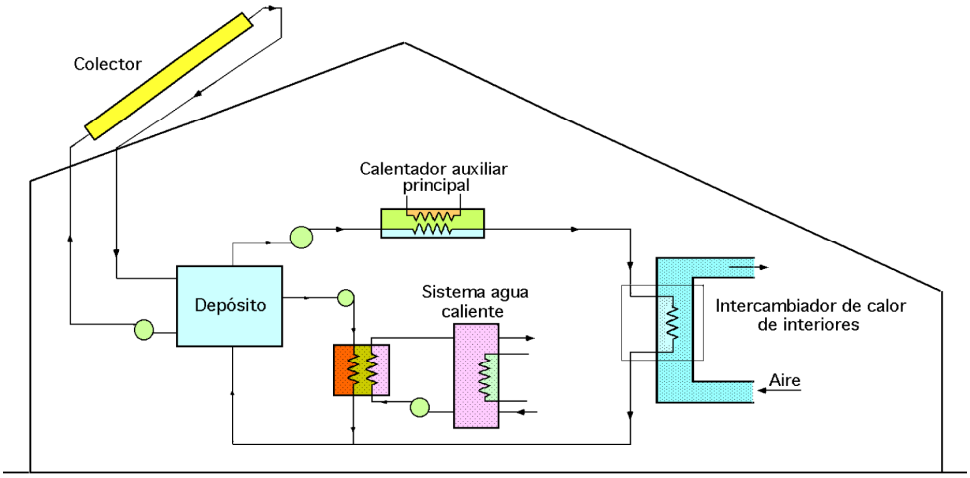


Fig V.17.- Esquema de calefacción solar

Los componentes principales del sistema, y la forma en que se pueden modelizar, se resumen como sigue:

- *El colector solar es un calentador de agua de placa plana con características determinadas, en el que se puede despreciar su capacidad calorífica. Se puede suponer que tanto el colector, como el resto del sistema, funcionan a una presión máxima del orden de dos atmósferas absolutas; la temperatura máxima del colector se puede limitar a 110°C; el exceso de energía se elimina mediante un sistema que permite mantener las condiciones de salida del fluido del colector por debajo de los límites de temperatura supuestos*

- *El depósito de almacenamiento puede ser un depósito de agua y su tamaño viene fijado por la superficie del colector. Se puede diseñar como un depósito de tres secciones, parcialmente estratificado, o como un depósito uniforme; las pérdidas térmicas del depósito van al interior del edificio*

- *El servicio de agua caliente sanitaria se puede suponer compuesto de varios elementos, basados en la idea de que se podría utilizar un calentador convencional de gas o de electricidad, con aportación de energía solar como medio de suministro de energía; la energía solar se podría suministrar entre el depósito principal de almacenamiento y el depósito de agua caliente doméstica a través de un intercambiador de calor*

- *Si el depósito no está estratificado, se puede considerar que el agua se encuentra a una temperatura uniforme; cuando su temperatura no se pueda mantener a la temperatura mínima de control, se puede hacer un aporte de energía auxiliar al depósito, transfiriéndole energía mediante un intercambiador de calor*

- *Un intercambiador de agua-aire constituye un medio por el cual se transfiere energía desde el depósito al edificio; se puede modelizar teniendo en cuenta su NTU*

- *El sistema de suministro principal de la energía auxiliar es un calentador de dos etapas, en serie con el depósito de almacenamiento y con el intercambiador de agua-aire; teniendo en cuenta las condiciones de diseño, esta disposición proporciona, en algunas circunstancias, resultados en los que el aporte de energía por el calentador auxiliar es mayor que la carga sobre el intercambiador, añadiendo así energía auxiliar al depósito de almacenamiento, lo que hace al colector menos eficaz que si fuese de otra forma*

- Se puede suponer que las paredes del edificio son de construcción standard, con buen aislamiento y con un 15% de su superficie destinada a ventanas. El colector se puede instalar de forma que no afecte al balance energético de la casa.

El cálculo de las ganancias y pérdidas térmicas, así como los efectos de la capacidad calorífica de la estructura, se determinan mediante una red térmica instalada en el edificio; la estructura interior y el mobiliario influyen en la temperatura sobre la que se basa el control, función también de los efectos de filtración de humedades y de la generación de energía dentro del edificio

- El control del colector se basa en dos temperaturas, en la existente dentro del depósito de almacenamiento cuando éste sea uniforme o en la del fondo del depósito en caso de almacenamiento estratificado y en la temperatura calculada a la salida del colector. Siempre que ésta última temperatura sea mayor, es decir, cuando se puede ganar energía útil, el colector entra en funcionamiento poniéndose en marcha la bomba que hace circular el agua; este control es idéntico al de un sistema basado en la medida de las temperaturas del tubo colector superior y del depósito de almacenamiento

- El control del sistema de calefacción se basa en la temperatura existente en el interior del edificio; el control de la calefacción se puede hacer mediante un sistema de cuatro temperaturas de control, tal como se indica el funcionamiento en la Tabla V.3.

Tabla V.3.- Esquema de un tipo de control y modos de funcionamiento de un sistema de calefacción

Temper. de calefacción		*Auxiliar alto*	*Auxiliar bajo*	*Calentador de espacios*
Temperatura baja	↑	*Apagado*	*Apagado*	*Se apaga*
T(caliente),0	↑	*Apagado*	*Se apaga*	*Encendido*
T(caliente),0	↓	*Apagado*	*Apagado*	*Se enciende*
T(caliente),1	↑	*Se apaga*	*Encendido*	*Encendido*
T(caliente),1	↓	*Apagado*	*Se enciende*	*Encendido*
T(caliente),2	↓	*Se enciende*	*Encendido*	*Encendido*

↑ *indica que la temperatura de la habitación está por encima de la temperatura de control*

↓ *indica que la temperatura de la habitación está por debajo de la temperatura de control*

V.14.- SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA

La Fig V.18 muestra el esquema de un sistema básico de calentamiento de agua sanitaria, con almacenamiento en depósito de agua y una fuente de energía auxiliar; este sistema permite un control independiente de la sección de colector solar, almacenamiento del sistema por una parte, y de la sección de {almacenamiento-fuente auxiliar-carga del sistema} por otra, puesto que se puede añadir al almacenamiento agua calentada por energía solar, al mismo tiempo que se está bombeando agua caliente del almacenamiento para cubrir las carga en el edificio.

En el sistema representado se ha dispuesto un *by-pass* de la unidad de almacenamiento para evitar calentar el depósito con energía auxiliar.

Las *ventajas* del calentamiento de agua incluyen:

- La utilización de un medio de almacenamiento y de transferencia de calor común, evitándose así las caídas de temperatura al transferir energía dentro y fuera del almacenamiento

- Un volumen de almacenamiento más pequeño

- Una adaptación del suministro de energía a los acondicionadores de aire por absorción relativamente fácil

- El bombeo del fluido que transfiere calor precisa de un aporte energético relativamente bajo

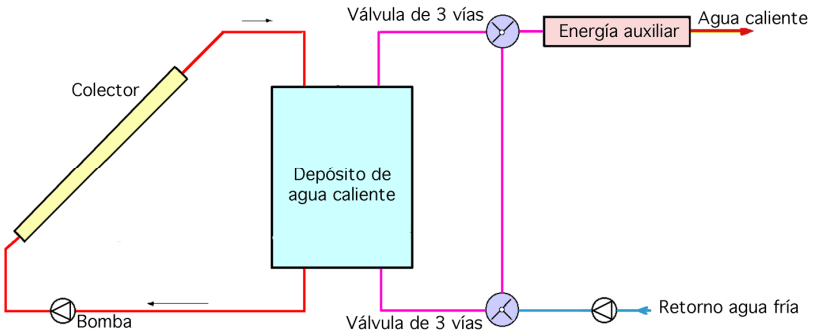


Fig V.18.- Esquema de un sistema básico de agua caliente

El uso de agua implica *inconvenientes* como:

- Los sistemas solares de calentamiento de agua funcionan a temperaturas inferiores a las de los sistemas de agua convencionales, por lo que precisan de una superficie de transferencia de calor adicional

- Puede darse el caso de que los calentadores de agua funcionen a temperaturas excesivamente altas, sobre todo en la primavera y en el otoño, por lo que estos sistemas tienen que disponer de un medio de eliminación de energía y evitar así la ebullición del agua y el exceso de presión

- También hay que tener en cuenta la eliminación de los problemas de corrosión

V.15.- REFRIGERACIÓN SOLAR POR ABSORCIÓN

Para el funcionamiento de enfriadores de absorción, por energía solar, se pueden utilizar técnicas como las que se proponen a continuación utilizando enfriadores:

*- **Continuos**, similares en su construcción y funcionamiento a las unidades convencionales de gas o de fluidos condensables; la energía se suministra al generador desde el sistema {colector solar-almacenamiento auxiliar}, siempre que las condiciones dentro del edificio indiquen la necesidad de refrigeración*

*- **Intermitentes**, similares a los empleados en la refrigeración de alimentos, comercializados desde hace años en zonas rurales, antes de que se extendiese la refrigeración por compresión y la electrificación. No se utilizan enfriadores intermitentes para acondicionamiento de aire, ni tampoco se han hecho grandes estudios que aconsejen su posible aplicación al acondicionamiento de aire por energía solar*

Es posible adaptar colectores de placa plana para funcionar con ciclos frigoríficos de absorción, Fig V.19; la influencia de los límites de temperaturas sobre el funcionamiento de los colectores de placa plana, hace que sólo se consideren máquinas comerciales con sistemas de *bromuro de litio-a-*

gua, Li-Br-H_2O, que requieren agua de refrigeración para enfriar el absorbedor y el condensador, por lo que su empleo puede llegar a requerir el uso de una torre de refrigeración.

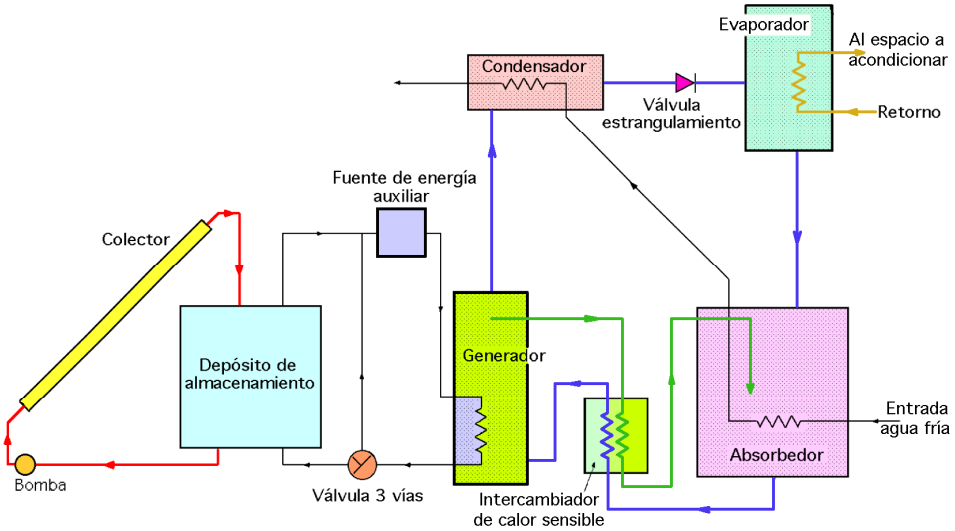


Fig V.19.- Esquema de un sistema de acondicionamiento de aire por absorción, funcionando con energía solar

La utilización de enfriadores *amoniaco-agua* en la forma en que actualmente están comercializados, resulta difícil debido a las altas temperaturas que necesita el generador, que precisaría de colectores cilíndrico parabólicos. El utilizar enfriadores diseñados para funcionar con energía solar implica generadores con temperaturas de funcionamiento inferiores, lo que supone mejores niveles de entrada de energía al generador desde el colector y mejor funcionamiento dentro de un determinado rango de temperaturas.

Si las exigencias de la refrigeración, más que las cargas de calefacción, fijan el tamaño de la superficie colectora, resulta ventajoso diseñar enfriadores con un COP más alto de lo acostumbrado; por ejemplo, para disminuir las exigencias de entrada de energía se pueden utilizar evaporadores de doble efecto, lo que implica que tanto las condiciones como las restricciones para el funcionamiento con energía solar, pueden dar lugar a diseños de refrigerantes distintos a los utilizados para funcionar con combustibles en sistemas convencionales. Un cálculo de costes indica que el funcionamiento de estos sistemas resulta competitivo con el clásico de compresión que funciona eléctricamente.

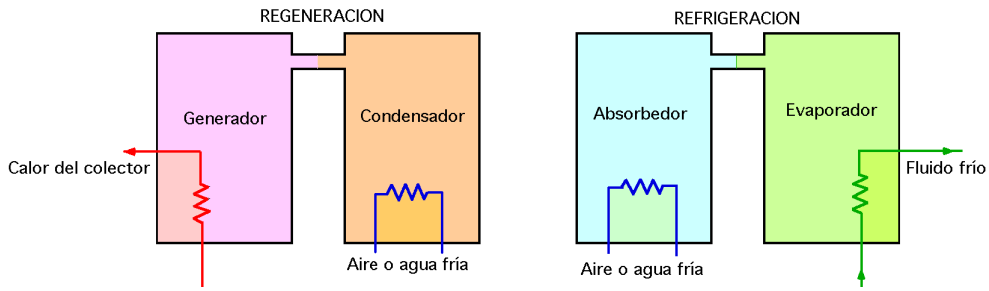
Estudios realizados con energía solar en una serie de enfriadores de *amoniaco-agua*, que utilizan colectores de placa plana, sin almacenamiento, han demostrado que el rango de temperaturas para el suministro del agua al generador tiene que estar comprendido entre 60°C y 90°C, no especificándose la temperatura del agua del condensador.

Las concentraciones del amoniaco en el absorbedor y en el generador están comprendidas entre el 58% y el 39% según el suministro de energía.

El enfriamiento por absorción intermitente constituye una alternativa a los sistemas continuos;

los trabajos realizados sobre estos ciclos se han dirigido principalmente a la refrigeración para la conservación de alimentos, más que a los sistemas de climatización.

En los ciclos de acondicionamiento de aire, la destilación del refrigerante del absorbente se realiza durante la etapa de regeneración, condensándose y almacenando el refrigerante; durante la etapa de enfriamiento del ciclo, el refrigerante se evapora y queda reabsorbido.



A la izquierda, el ciclo de regeneración. A la derecha, el ciclo de refrigeración. El generador-absorbedor es un único recipiente que realiza ambas funciones
Fig V.20.- Esquema de un ciclo de enfriamiento intermitente por absorción.

El almacenamiento en forma de absorbente y refrigerante separado se muestra en el esquema de la Fig V.20; variantes de este ciclo utilizan pares de evaporadores y condensadores, así como otros dispositivos, lo que proporciona una capacidad de enfriamiento esencialmente continua y un COP mejorado.

Los sistemas *refrigerante-absorbente* utilizados en ciclos intermitentes son mezclas NH_3-H_2O y NH_3-NaSCN; en este último, el absorbente es una solución de (NaSCN) en NH_3, actuando el NH_3 como refrigerante, sistema que presenta buenas propiedades termodinámicas para ciclos destinados a la fabricación de hielo, mediante un enfriador intermitente de NH_3-H_2O, utilizando para la regeneración un colector de concentración cilíndrico parabólico.

También se han desarrollado experiencias de máquinas intermitentes funcionando con NH_3-H_2O en las que el aporte energético se realiza mediante colectores de placa plana, y en las que el absorbedor y el generador están separados. El generador forma parte del colector de placa plana; el fluido que circula por los tubos es una solución del *refrigerante-absorbente* mediante una combinación de termosifón y bomba de burbujas.

V.16.- SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE CALOR EN MUROS

Una característica interesante del almacenamiento de energía solar que se utiliza en edificios, es la combinación *colector-almacenamiento*, en una única parte estructural del mismo, como puede ser un muro orientado al sur. Los muros son verticales, mientras que el ángulo de incidencia θ_s de la radiación solar sobre ellos, resulta alto en invierno y bajo en verano, por lo que son sistemas adecuados para funcionar en invierno.

Una estructura experimental de este tipo consiste en una serie de pequeños cubículos a lo largo de la fachada orientada al Sur, compuesta por un cristal doble y una pared detrás de los cristales hecha de un material idóneo para el almacenamiento de calor. Para el aislamiento se pueden usar sombrillas y para la circulación del aire ventiladores que controlen las pérdidas y aumenten la velocidad de transferencia de calor desde el muro de almacenamiento hasta la habitación.

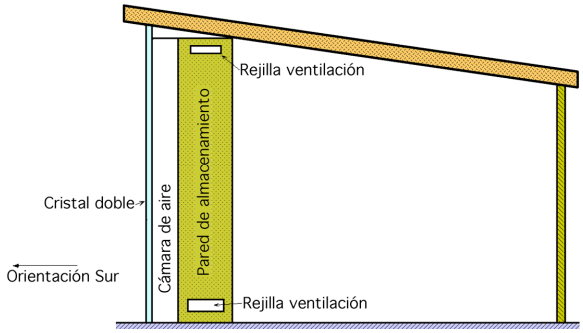


Fig V.21- Esquema de una casa con calentamiento del muro Sur por energía solar

En la Fig VI.21 se muestra una sección transversal de un muro orientado al Sur que tiene una cubierta con dos cristales; a una distancia de 10 a 20 cm de la cubierta hay un muro de hormigón de unos 20 cm de grosor, pintado de negro, que sirve tanto como absorbedor de radiación, como de medio de almacenamiento de calor.

En la parte alta y baja del muro de hormigón hay unas aberturas o rejillas, de forma que el aire circula por convección natural, a través del espacio comprendido entre el cristal y el muro de hormigón, no precisando de ningún elemento exterior.

V.17.- SISTEMAS DE COLECTOR RADIADOR Y ALMACENAMIENTO

En zonas áridas, en las que los tejados son planos y horizontales, se pueden combinar un colector-radiador y un medio de almacenamiento, en forma de capa de agua de unos 25 cm de profundidad, en bolsas de plástico negro, apoyadas en la estructura del tejado, sobre las que se dispone un aislamiento móvil que, al retirarse a un lado, permite que el agua y el plástico puedan absorber la radiación durante el día en la temporada de calefacción, o radiarla al cielo nocturno durante la temporada de refrigeración.

Para evitar pérdidas de energía nocturnas o absorción durante el día, en las temporadas de calefacción y refrigeración se puede situar el aislamiento sobre el tejado, o por debajo del mismo, de forma que controle las transferencias de calor por radiación y convección, entre el medio de almacenamiento y el hábitat interior.

V.18.- SISTEMAS CON BOMBA DE CALOR Y RADIADOR COLECTOR

Para suministrar calefacción o refrigeración a edificios existen sistemas que utilizan colectores

sin cubiertas, como colectores diurnos y radiadores nocturnos, depósitos de almacenamiento de agua fría y caliente, y bombas de calor, que aseguran unas adecuadas diferencias de temperatura entre ellos.

Para edificios de una sola planta con tejados orientados al Sur, en lugares en los que la radiación solar es alta, con poca lluvia, veranos cálidos, inviernos suaves, y pequeñas velocidades del viento, se pueden cubrir éstos con planchas de cobre con tubos embutidos, pintados de un color oscuro, que funcionan como colectores de energía solar para calentar agua, y como radiadores para radiar calor al cielo nocturno. Un depósito de agua vertical, dividido en su punto medio por un deflector térmico, proporciona el almacenamiento tanto de agua caliente en la sección superior, como de agua fría en la sección inferior; además se puede disponer de una bomba de calor para la transferencia de calor desde la sección fría del depósito a la caliente; el serpentín del condensador tiene que estar en la sección superior.

En la Fig V.22 se muestra un diagrama esquemático del sistema de funcionamiento, que puede ser de:
- *Sólo calefacción*
- *Sólo refrigeración*
- *Calefacción y refrigeración*

a) Para el funcionamiento de sólo calefacción, la energía solar se colecta cuando sea posible, y se hace circular el agua que se ha calentado a la parte inferior del depósito; cuando el termostato de la habitación pida calor, el agua caliente almacenada en la parte superior del depósito se conduce al panel de radiación de calor. La bomba de calor funciona en el sentido de bombear calor desde la parte inferior hasta la parte superior del depósito, con el fin de elevar la temperatura, en la parte superior del mismo, a niveles en los que se puedan satisfacer las necesidades de calor del edificio.

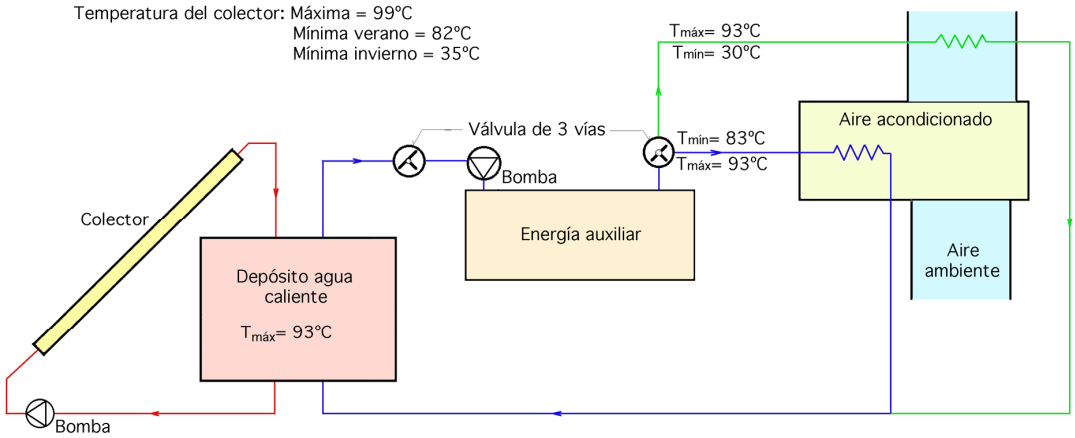


Fig V.22.- Sistema de calefacción-refrigeración

b) Para el funcionamiento de sólo refrigeración, el agua del depósito superior se enfría con la radiación nocturna del colector-radiador; se retira el agua de refrigeración de la parte inferior del depósito para enfriar el edificio, y cuando las necesidades del mismo lo exijan, la bomba de calor hace descender la temperatura del

agua en la sección inferior

c) Para el funcionamiento como calefacción y refrigeración, en primavera y otoño, el agua calentada por energía solar se almacena en la parte superior del depósito, y el agua enfriada por la radiación en la parte inferior del mismo; tanto la calefacción como la refrigeración del edificio se obtienen a partir de la sección del depósito correspondiente, superior o inferior.

La bomba de calor funciona en el sentido de elevar la temperatura en la sección superior, o de descender la temperatura en la sección inferior, de acuerdo con las necesidades del edificio.

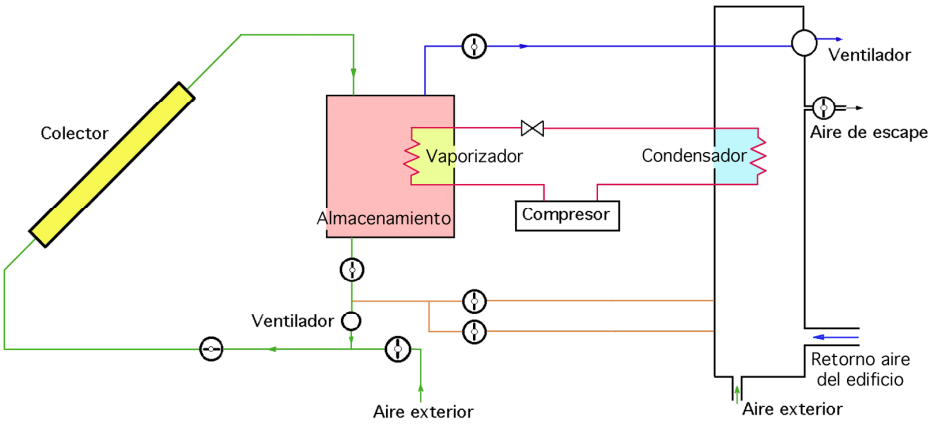


Fig V.23.- Esquema de bomba de calor por energía solar para calefacción y refrigeración

Con los sistemas utilizados en la refrigeración del edificio por medio de paneles radiantes, no es posible conseguir una buena deshumidificación, ya que estos sistemas extraen el calor del aire de la habitación, a temperaturas muy por encima de las temperaturas a que se encuentran los evaporadores de los acondicionadores de aire normales, por lo que su uso queda restringido a ser utilizados sólo en climas secos, si es que no se les dispone de los correspondientes deshumidificadores. El COP de los colectores solares es más alto a temperaturas bajas, siendo el COP de las bombas de calor más alto cuando la temperatura del evaporador es más alta, por lo que se ha considerado la utilización de los colectores solares como fuentes térmicas para las bombas de calor.Un esquema de un sistema de este tipo se presenta en la Fig V.23, mostrándose el almacenamiento en el lado del evaporador de la bomba de calor de una sola fase.

También se puede disponer el almacenamiento de calor en el lado del condensador; en este caso, hay que adaptar la capacidad de la bomba de calor a la máxima energía disponible en el colector, en lugar de a las máximas cargas de calefacción de la casa, siendo posibles otras variantes. El COP y el coste del colector y de la bomba de calor se mejoran cuando los dos elementos funcionan unidos en vez de por separado; a la hora de comprar los dos componentes hay que tener en cuenta que ésto puede representar una mayor inversión, así como la desventaja de tener que utilizar energía eléctrica, que podría ocasionar una distribución desfavorable de cargas en las plantas generadoras.

En el esquema presentado en la Fig VI.24 se puede ver el funcionamiento de una instalación mixta a base de bomba de calor industrial apoyada con colectores de caucho para calefactar el edificio objeto de estudio. La energía solar captada por el campo de colectores se almacena en un tanque enterrado. La bomba de calor industrial utilizada permite bombear la energía del tanque, que se mantiene a un nivel térmico bajo, hasta el nivel de utilización de la calefacción.

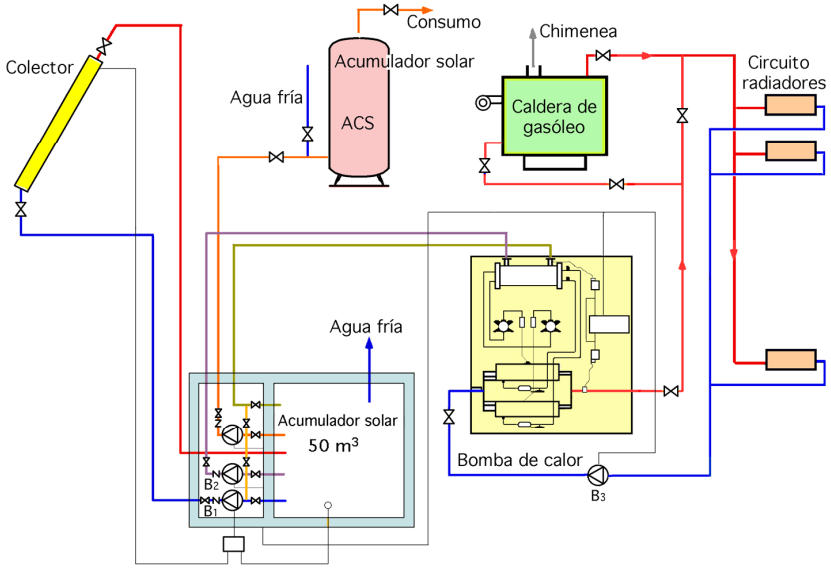


Fig V.24.- Instalación mixta bomba de calor industrial apoyada con colectores solares-caldera de gasóleo

Tal y como se puede ver en el esquema, la bomba de calor se ha colocado en serie con la caldera, lo que permite, en períodos de una demanda energética alta, trabajar con una temperatura del condensador inferior a la de entrada al circuito de calefacción que repercute en una mejora del COP de la máquina.

La bomba de circulación B_1 del circuito colectores-acumulador se pondrá en funcionamiento en cuanto el termostato diferencial detecte una diferencia de temperatura entre la salida de los colectores y la parte inferior del acumulador superior a 2ºC, parándose al reducirse esta diferencia a 0,2ºC.

Al diseñar la instalación se ha previsto la posibilidad de alimentar los colectores directamente con el agua de retorno del evaporador, con lo que dichos colectores trabajarán con una mejor eficiencia debido a la menor temperatura del fluido caloportador. La bomba B_2 está comandada por las necesidades energéticas del circuito de calefacción manteniéndose en funcionamiento siempre que la bomba de calor lo esté. Cuando la temperatura de la parte superior del acumulador sea igual o inferior a 9ºC la bomba B_2 se parará y la instalación funcionará únicamente con la caldera de gasóleo.