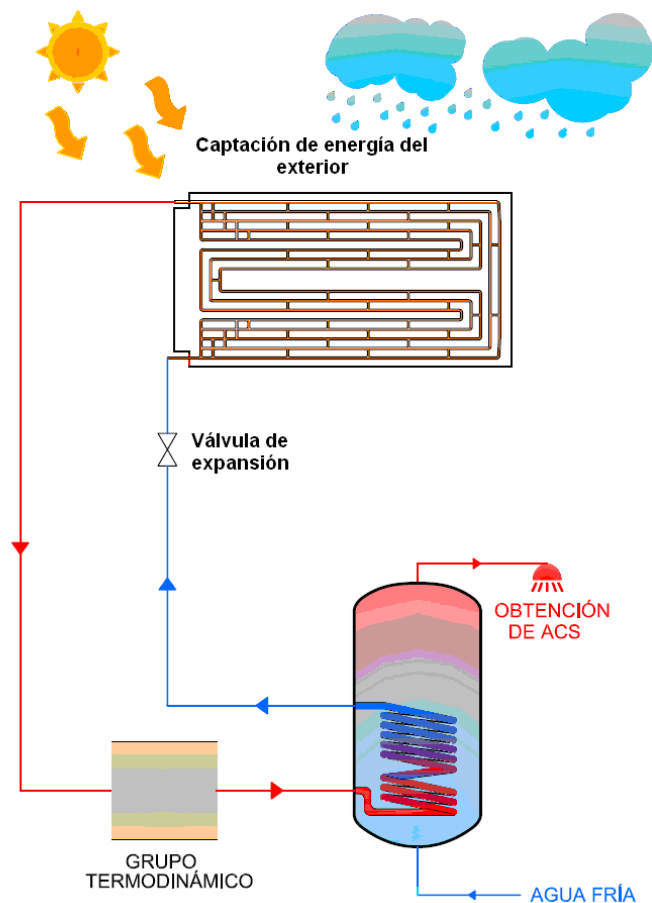


## 2. SISTEMAS SOLARES TERMODINÁMICOS

Se denomina sistemas solares termodinámicos a la combinación de las tecnologías de bomba de calor con las tecnologías de energía solar térmica. Consiste en unos captadores solares denominados paneles termodinámicos que actúan como evaporador del circuito de bomba de calor recogiendo calor del Sol y del ambiente. En la Ilustración 5 puede observarse un esquema simplificado de los sistemas termodinámico, concretamente un sistema solar termodinámico para la obtención de agua caliente sanitaria.



**Ilustración 5.** Esquema simplificado sistema termodinámico para calentamiento de agua caliente sanitaria.

La denominación “sistema solar termodinámico” es de ámbito nacional, introducida por la primera empresa que empezó a comercializarlo en España, Solar PST. También se pueden encontrar como paneles lunares,

[34], ya que funcionan también de noche. Su nombre exacto es “Bombas de calor solar asistidas de expansión directa” que corresponde a la traducción del inglés de **DX-SAHP**, Direct Expansión Solar Assisted Heat Pump. El comienzo de este sistema se remonta a 1955 cuando Sporn y Ambrose, [26], lo propusieron por primera vez en el oeste de Virginia, EEUU. No fue hasta la época de los 70 cuando se retomó esta idea inicial y se llevaron a cabo numerosos estudios con captadores llenos de refrigerante (Chaturvedi et al., 1982; Aziz et al., 1999) entre otros. Los estudios han sido realizados tanto teórica como experimentalmente consiguiendo mejoras, resultados positivos y aumentos del rendimiento con respecto a las bombas de calor tradicionales al elevar la temperatura de evaporación (Morrison, 1994; Chaturvedi et al., 1998; Ito et al., 1999; Hawlader et al., 2001; Chyng et al., 2003; Kuang et al., 2003). Una revisión de los diversos estudios ha indicado que los valores del COP de los DX-SAHP oscilan en un rango de 2 a 9, y la eficiencia del captador varía entre 40% y 98% (o incluso por encima de 1) en condiciones climáticas muy diferentes.

Actualmente hay algunos DX-SAHP calentadores de agua que se comercializan, pero el potencial de estos sistemas está muy lejos de ser realidad, al igual que su aplicación como sistemas de calefacción, a pesar de ser una tecnología muy parecida a las bombas de calor cuyo uso está tan extendido.

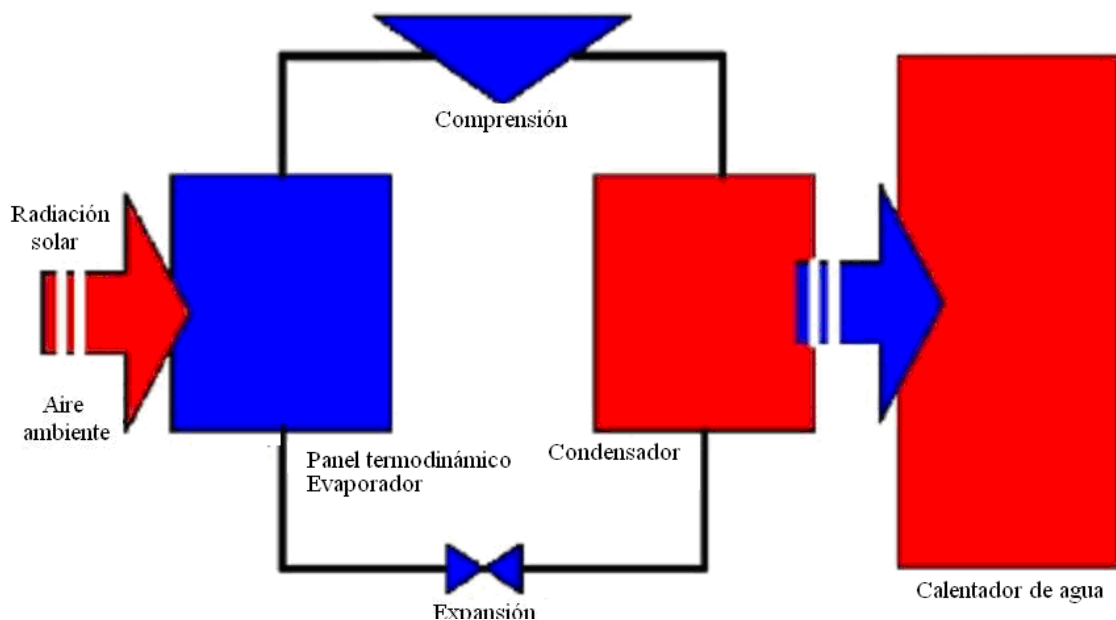
## 2.1 FUNCIONAMIENTO

Los DX-SAHP tienen principalmente tres aplicaciones: calentamiento de agua de consumo, calentamiento de agua de piscina y calefacción. En todos los casos se calienta agua que puede ser usada como ACS, agua caliente sanitaria, agua para piscinas o agua de un circuito cerrado destinada a la calefacción de algún recinto. Ya que su función final es la de calentar agua también se pueden encontrar en las distintas bibliografías como: “bombas de calor calentadoras de agua”, HPWHs, Heat Pump Water Heater. Esta

denominación sirve para todo aquel sistema que calienta agua con un sistema de bomba de calor: geotérmica, con paneles de expansión directa, con unidades condensadoras,...

Las bombas de calor calentadoras de agua son una tecnología prometedora y utiliza los mismos principios mecánicos que los refrigeradores y acondicionadores de aire. Mientras los refrigeradores eliminan el calor del interior y lo descargan al ambiente, las bombas toman el calor del medio ambiente y lo concentran para calentar agua para las diversas necesidades.

La definición exacta de una bomba de calor es una máquina que transfiere calor desde una fuente a otra empleando un ciclo de refrigeración. Aunque el calor fluye normalmente de mayor a menor temperatura, la bomba de calor invierte el flujo y actúa como una “bomba” para mover el calor. Por lo tanto, las bombas de calor pueden ser utilizadas tanto para la calefacción en invierno y refrigeración en verano. En el ciclo de refrigeración, el refrigerante, conocido como el “fluido de trabajo” se comprime (como un líquido) y luego se expande (como un vapor) para absorber y eliminar el calor. Las transferencias de calor van hacia un espacio a calentar durante el período de invierno y se invierte la operación en verano: se absorbe calor del mismo espacio y se enfría.



**Ilustración 6.** Ilustra el esquema de un sistema de bomba de calor calentador de agua simplificado.

El funcionamiento global del sistema se explica a continuación:

A los paneles entra un fluido refrigerante, normalmente R-134a, en forma líquida a baja temperatura. El fluido está en la mayoría de los casos a una temperatura entre 5 y 10 °C por debajo de la temperatura ambiente. Esta diferencia de temperatura origina una transferencia de calor desde el ambiente hacia el panel, la cual se suma al calor que el panel recibe por radiación directa del Sol de manera que el refrigerante del panel se va evaporando conforme avanza por él hasta hallarse en un estado de vapor ligeramente sobrecalentado.

En determinadas ocasiones, la radiación solar es muy elevada y la temperatura de evaporación alcanza valores similares incluso ligeramente superiores a la temperatura ambiente. En este caso la transferencia de calor desde el ambiente hacia el panel sería nula o ligeramente negativa y el calor provendría en su totalidad de la radiación solar.

El refrigerante en estado vapor pasa a ser aspirado por el compresor donde el gas alcanza una alta presión y temperatura. El tramo de tubería entre el compresor y el condensador debe de estar aislado para evitar pérdidas de calor al ambiente.

El refrigerante en estado gas a alta presión y temperatura pasa al condensador consistente en un intercambiador gas-agua donde condensa cediendo el calor latente al agua.

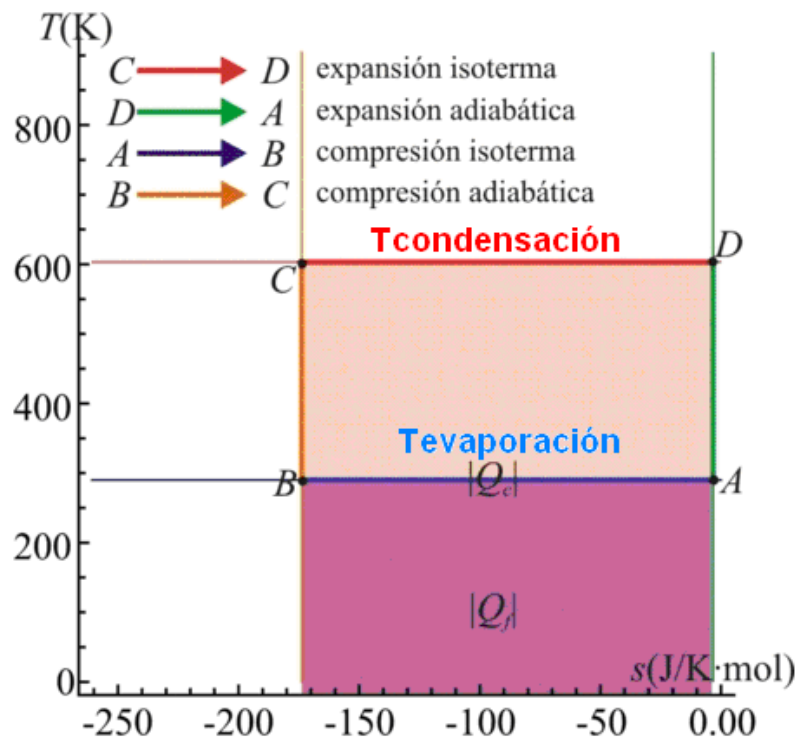
Una vez en estado líquido el refrigerante alcanza la válvula de expansión, donde al expandirse disminuye su presión y su temperatura permaneciendo en estado líquido.

La instalación cuenta con la ventaja de que es posible invertir el ciclo para obtener *frío* durante los meses de verano, de modo que el intercambiador gas agua ejercerían ahora de evaporador, siendo necesario en este caso, la utilización de una unidad condensadora de tiro forzado, que tendría la función de condensador anulando por tanto al panel termodinámico. Existiría la posibilidad de usar el panel como condensador en verano, pero este tendría que ir protegido de la radiación solar ya que actúa negativamente. Para pasar del modo refrigeración al modo bomba de calor, se emplea normalmente una

válvula denominada de 4 vías, que se encarga de cambiar de sentido el fluido refrigerante.

## 2.2 CICLO TERMODINÁMICO

El principio de funcionamiento del sistema, se basa en el ciclo de Carnot inverso en el que, a través del trabajo que realiza el equipo, se consigue captar calor del foco frío (ambiente exterior) para llevarlo al foco caliente (agua caliente). En la figura se representa el ciclo de Carnot.



**Ilustración 7.** Diagrama T-S ciclo de Carnot

La absorción de calor se realiza a temperatura y presión constante al igual que la cesión de calor.

El rendimiento de la bomba de calor se mide a través del COP, *coefficient of performance*, cuyo valor siempre es mayor a la unidad. El máximo COP que se puede obtener con un ciclo termodinámico es el siguiente:

$$COP = \frac{|Q_{cond}|}{|Q_{cond}| - |Q_{evap}|} = \frac{1}{1 - \frac{|Q_{evap}|}{|Q_{cond}|}} = \frac{1}{1 - \frac{T_{evap}}{T_{cond}}} = \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}}$$

Por tanto el COP aumenta cuanto mayor sea la temperatura de evaporación y menor sea la temperatura de condensación.

La expresión anterior es la del COP cuando la máquina esté trabajando como bomba de calor. En caso de que actúe como refrigerador, el efecto útil es el calor retirado del recinto caliente. Por tanto la expresión del COP sería la siguiente:

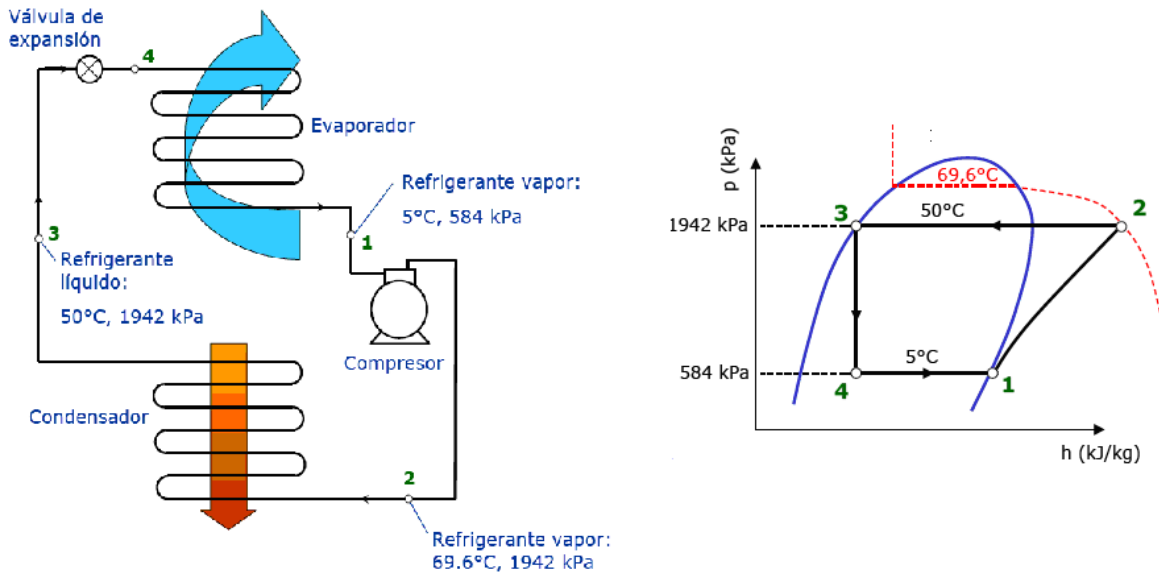
$$COP = \frac{|Q_{evap}|}{|Q_{cond}| - |Q_{evap}|} = \frac{1}{\frac{|Q_{cond}|}{|Q_{evap}|} - 1} = \frac{1}{\frac{T_{cond}}{T_{evap}} - 1} = \frac{T_{evap}}{T_{cond} - T_{evap}}$$

El ciclo estándar de compresión de vapor es el más aproximado al funcionamiento real de las máquinas de climatización y aire acondicionado reales por compresión. También se puede encontrar en muchas bibliografías como ciclo de Rankine inverso, lo cual puede llevar a confusión ya que no es un ciclo de Rankine convencional recorrido en el sentido contrario. A partir de ahora se designará únicamente como ciclo de compresión de vapor.

### **Ciclo estándar de compresión de vapor**

Sigue siendo un ciclo ideal pero está mucho más cerca de lo técnicamente posible que el ciclo de Carnot.

- Proceso 1-2 (Compresor): Compresión isentrópica desde vapor saturado a la presión de evaporación hasta la presión de condensación.
- Proceso 2-3 (Condensador): Evacuación de calor a presión constante (enfriamiento sensible condensación).
- Proceso 3-4 (Válvula de expansión): Expansión adiabática e irreversible (isoentálpica) desde líquido saturado hasta la presión de evaporación.
- Proceso 4-1 (Evaporador): Absorción de calor a presión constante hasta vapor saturado (evaporación).



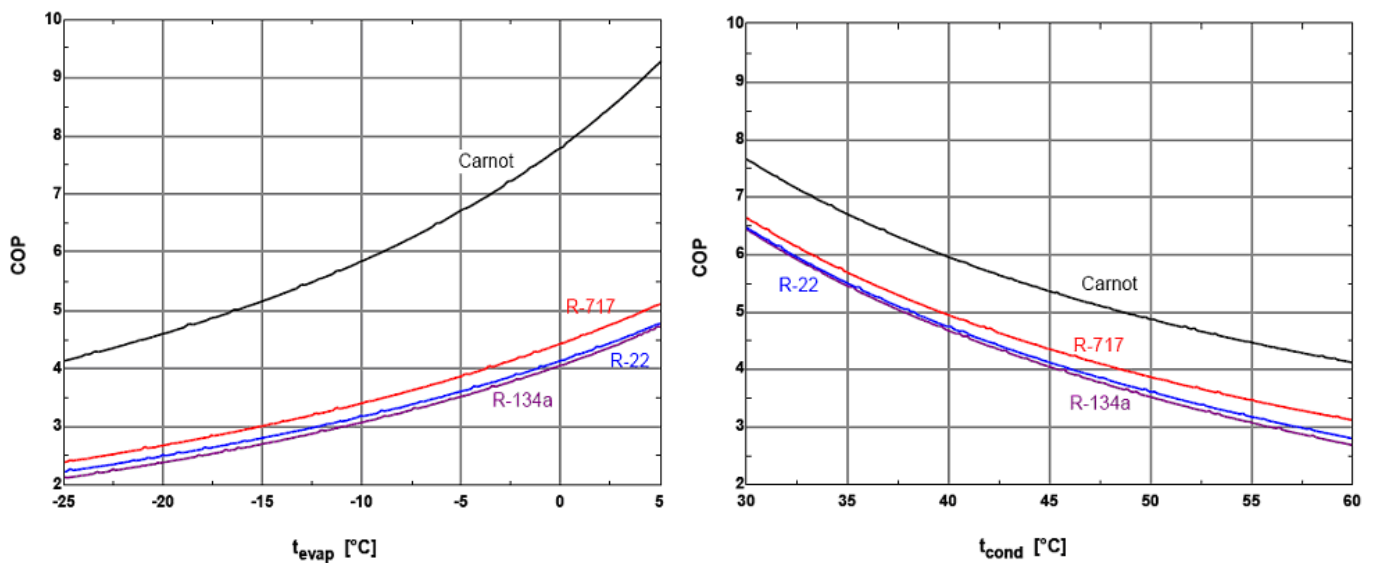
**Ilustración 8.** Esquema y ciclo del ciclo de compresión de vapor estándar, [35].

La adición de energía se produce en la fase 1-2, donde el compresor consumirá trabajo para recircular el fluido y aumentar la presión y temperatura de este. El calor puesto en juego, como se ha indicado antes se produce en las fases, 2-3 y 4-1.

Existe la posibilidad de sustituir la válvula de expansión por un elemento mecánico, tipo turbina, que permita la expansión del gas y que además aproveche la energía de esa expansión para realizar un movimiento mecánico. Utilizar una turbina presenta como ventaja que la expansión es prácticamente adiabática isentrópica, cosa que no ocurre en los procesos que utilizan válvula. Además la proporción de extracción de calor aumenta. Sin embargo este método no es muy utilizado por el elevado coste que conlleva la inclusión de esta turbina en la máquina así como el escaso trabajo mecánico que se obtiene de este elemento.

Si se compara el COP del ciclo de Carnot con el del ciclo de estándar de compresión de vapor se observa que existe una diferencia de eficiencia. Ya que el COP del ciclo estándar no sólo depende de las temperaturas de evaporación y condensación, también depende de las propiedades del refrigerante usado.

A continuación se muestran unas gráficas en las que el COP está en función de la temperatura de evaporación y condensación respectivamente y aparece para distintos refrigerantes comparándolo con el COP máximo de Carnot. Estos COP han sido obtenidos de una bomba de calor tipo.



**Ilustración 9.** Variación del COP con la temperatura de evaporación y condensación, [35]

La temperatura de evaporación tiene mayor influencia en el ciclo que la de condensación.

En los ciclos reales tras la evaporación queda un vapor sobrecalentado ligeramente, lo cual difiere del punto de vapor saturado representado en el gráfico anterior. De igual forma en la condensación se lleva a cabo un subenfriamiento del líquido cuyas ventajas se explican más abajo.

### **Subenfriamiento del líquido y recalentamiento del vapor**

**Recalentamiento del vapor**, proceso 6-1 en Ilustración 10

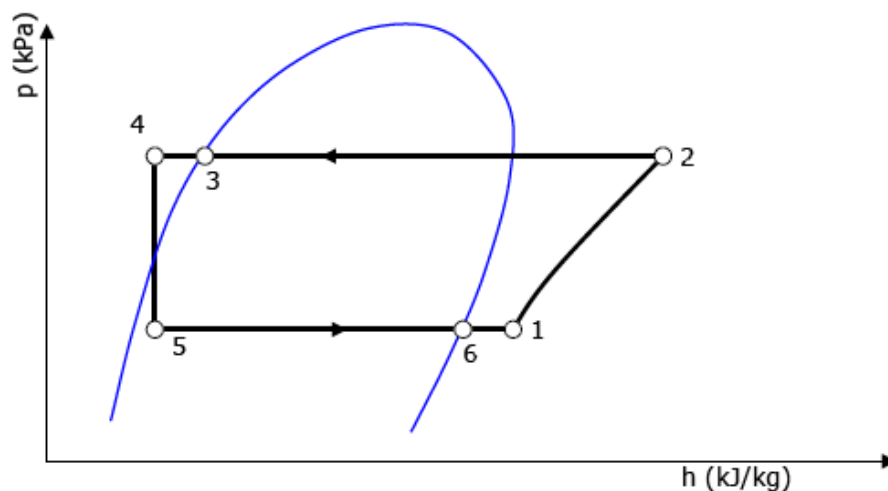
- Proteger el compresor asegurando compresión seca (golpe de líquido)



- Posible calentamiento en la línea de aspiración, diferencia si es dentro o fuera del local.
- Evaporador sobredimensionado puede recalentar.
- El COP suele bajar

**Subenfriamiento del líquido**, proceso 3-4 en Ilustración 10

- Enfriamiento en la línea de líquido (bajo salto térmico), garantizando que el líquido entre frío en la válvula de expansión.
- Condensador sobredimensionado
- COP sube ligeramente.



**Ilustración 10.** Diagrama de presión y entalpía del ciclo de compresión de vapor con subenfriamiento y recalentamiento.

**Ciclo real de compresión de vapor**

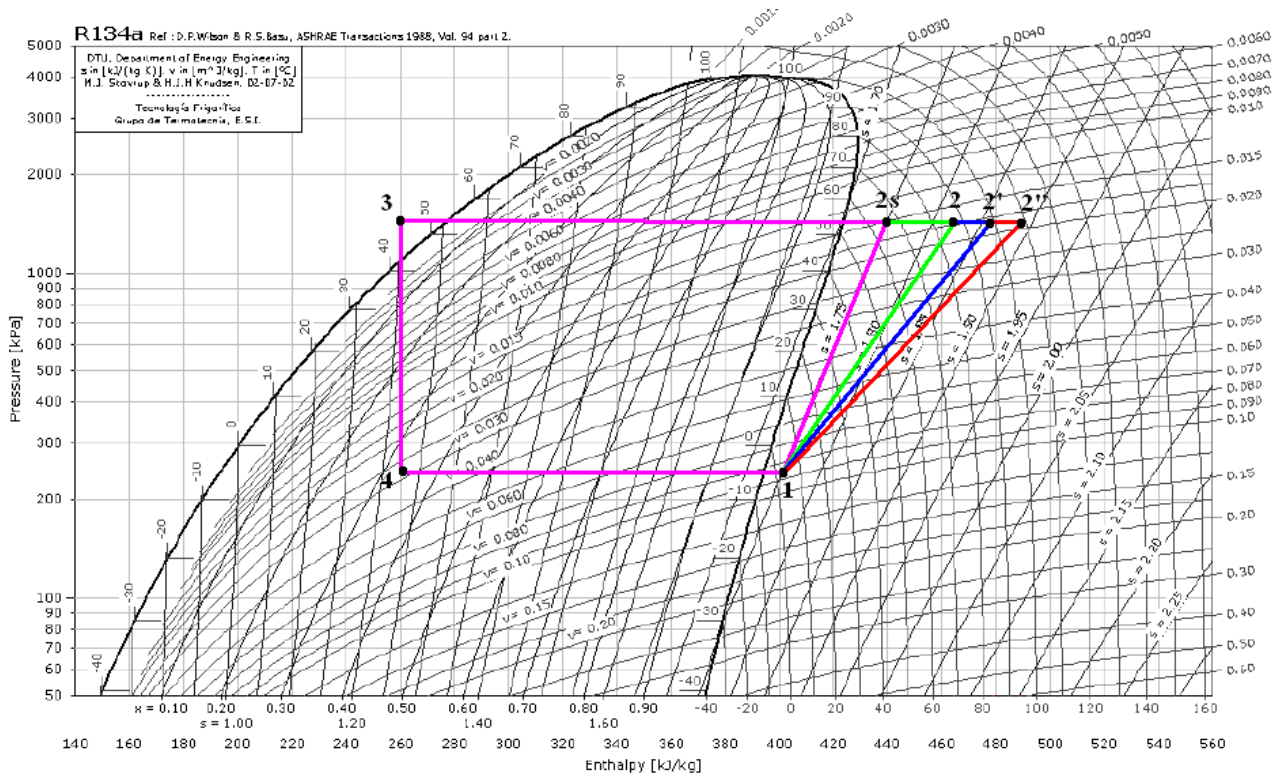
Los ciclos reales tienen un cierto grado de irreversibilidad, debido fundamentalmente a limitaciones de los materiales, constructivas y físicas. Se enumerarán a continuación las principales irreversibilidades que aparecen en este ciclo y que se puede observar en cualquier instalación real.

- La temperatura de evaporación debe ser menor que la temperatura del medio del que se retira calor, cuanto menor depende del dimensionado del evaporador. La

temperatura de condensación debe ser mayor que la temperatura del medio al cual se evacua calor (depende de nuevo del dimensionado del condensador).

- Pérdidas de carga en el evaporador, condensador y líneas de refrigerante (típico en un evaporador 15-20 kPa). En la Ilustración 11 no se han representado las pérdidas de carga previstas en el evaporador y condensador para una mayor claridad.
- Recalentamientos y subenfriamientos en las líneas de refrigerante y depósitos.
- Compresor no isentrópico

Del diagrama presión-entalpía del refrigerante R134a se obtiene el trabajo reversible específico ( $W_r$ ). En la Ilustración 11, el ciclo ideal queda representado en color rosa. En este tipo de compresores, todos los componentes, incluido el motor eléctrico, son refrigerados por el propio refrigerante. Las pérdidas por compresión quedan representadas en verde hasta 2; por rozamiento, en azul hasta 2'; y por efecto Joule, en rojo hasta 2''. Con un compresor convencional se perdería el calor de la envolvente, pero con el sistema patentado "recuperador de calor del compresor" en la página 36, también se recuperaría este calor útil en el condensador.



**Ilustración 11.** Pérdidas por compresión en el diagrama presión entalpía.

Para el correcto funcionamiento del sistema y alcanzar el máximo de efectividad se ha de controlar una serie de valores. El sistema podrá trabajar dentro de unos rangos de establecidos y el salirse de estos puede conllevar el mal funcionamiento del equipo o el cese del funcionamiento. El sistema de control deberá mantener los parámetros característicos dentro unos márgenes establecidos y parará en caso contrario. Los principales factores que influyen sobre las características y el funcionamiento del ciclo son:

### Temperatura de evaporación

La temperatura de evaporación es variable y depende principalmente del tipo de compresor que se use y las condiciones del medio de evaporación. Tiene un valor mínimo de  $-15^{\circ}\text{C}$  y un valor máximo de  $25^{\circ}\text{C}$ . Temperaturas de evaporación por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$  tienen el riesgo de la producción de hielo en el evaporador y, puesto que el

hielo es mal conductor de calor, la resistencia a la transferencia de calor aumenta resultando un rendimiento menor. El control se realiza mediante los presostatos correspondientes. Esta temperatura suele ser inferior a la temperatura ambiente, de manera que se puedan absorber energía del aire ambiente, agua de lluvia,... pero no siempre tiene que ser así.

Durante los periodos de funcionamiento sin energía solar, días nublados y durante las noches, la temperatura de evaporación está entre unos 8-10°C por debajo de la temperatura exterior.

Durante los periodos de trabajo con una radiación solar elevada, la temperatura de evaporación puede llegar a ser igual o superior a la temperatura exterior. Como es el caso de las horas centrales del día con radiación solar máxima, la temperatura exterior puede aumentar hasta unos 5°C sobre la temperatura exterior.

### **Temperatura de condensación**

La temperatura de condensación depende de la aplicación final. Cuanto mayor sea la temperatura de condensación menor será el COP del sistema como bomba de calor. La temperatura de condensación debe de estar en torno a 10°C por encima de la temperatura deseada final:

- Para calentamiento de piscinas la temperatura de condensación está entre 35-40 °C
- Para ACS es deseable mantener una acumulación entre 45-50°C por lo que la temperatura de condensación está en un rango de 55-60°C. Esta es la misma temperatura para aplicaciones de calefacción.

Para acumulación en grandes instalaciones, como puede ser gimnasios, hoteles,... es necesario cumplir el R.D. 865/2003 para la prevención y control de la legionelosis que dicta que la acumulación será de 60°C y que la temperatura del agua en el circuito de agua caliente estará por encima de 50°C en el punto más alejado del circuito ó en la

tubería de retorno del acumulador. La instalación permitirá que el agua alcance una temperatura de 70°C en momentos puntuales para llevar a cabo una desinfección.

Para cumplir con el R.D. 865/2003, los sistemas termodinámicos necesitarían apoyo de otro sistema para alcanzar temperaturas mayores de 50°C, lo cual no significa que el sistema no pueda alcanzarlas sino que el rendimiento cae bruscamente perdiendo efectividad.

Si la temperatura de condensación es muy alta puede causar una diferencia de presiones grande entre la  $P_{\text{cond}}$  y la  $P_{\text{evap}}$ . Esto puede conllevar los siguientes **efectos negativos**:

- Temperatura de descarga del compresor elevada lo que puede provocar la descomposición del aceite.
- Compresor funcionando con una mayor relación de compresión lo que implica un menor rendimiento isentrópico y volumétrico.
- La potencia de compresión aumenta más que proporcionalmente.
- Altas presiones de condensación lo que hace necesario una mayor resistencia mecánica.

## 2.3 DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS DE UN EQUIPO TERMODINÁMICO BÁSICO

Los sistemas termodinámicos pueden tener varias aplicaciones, y su dimensionamiento varía según los requerimientos de la aplicación en cuestión. A continuación se enumeran los elementos básicos del sistema termodinámico básico. En este caso se describe el sistema termodinámico compacto como sistema general, puesto que todos tienen el mismo principio de funcionamiento variando el tamaño de los componentes finales.

Un sistema termodinámico general consta de los siguientes componentes:

- Captador solar termodinámico (función de evaporador)
- Compresor
- Sombrerete
- Separador de aceite
- Presostato de alta y de baja
- Intercambiador de placas (función de condensador)
- Recipiente de líquido
- Filtro deshidratador
- Visor de líquido
- Válvula de expansión térmica
- Separador de líquido.
- Depósito de acumulación de acero inoxidable.
- Control eléctrico
- Tubos de impulsión y de aspiración de cobre recocido.
- Distribuidor de impulsión
- Distribuidor de aspiración

A continuación pasan a describirse los componentes novedosos respecto a un sistema convencional:

### **2.3.1 El panel evaporador**

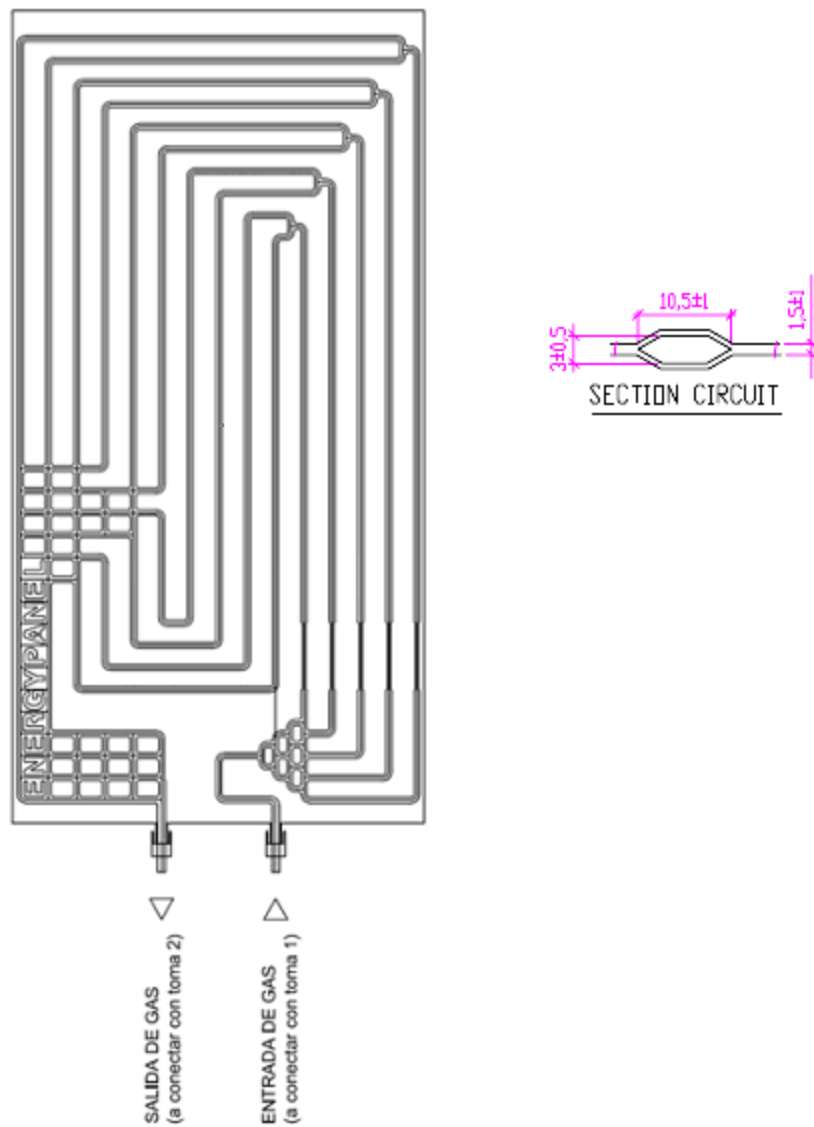
En este elemento se va a producir la evaporación del gas refrigerante pasando a estado vapor ligeramente sobrecalentado. Su diseño puede adquirir muy diversas formas y ser de distintos materiales, pero tiene que tener unas características básicas:

1. Distribución uniforme de la carga térmica. De esta manera se consigue que todo el panel esté a una misma temperatura y sea igual de efectivo por todas sus partes.
2. Minimización de las pérdidas de carga. El diseño del circuito tiene que reducir en lo posible las pérdidas de carga y así disminuir el trabajo del compresor.
- 3.

### **Descripción**

Este panel es de aluminio y tiene una canalización densa. Su diseño permite distribuir la carga térmica en toda la superficie del intercambiador y por tanto obtener una temperatura en la superficie muy uniforme, muy próxima a la temperatura del fluido circulante. De esta manera se puede obtener un gran intercambio térmico comparado con el que se pueden obtener con un evaporador de una bomba de calor convencional. Los paneles están equipados lateralmente, con dos tuberías soldadas de aluminio/cobre, con el fin de permitir la unión de los tubos. El número de paneles a instalar dependerá de la demanda térmica y podrá adaptarse a las necesidades según las disposiciones que se consideren. Las características principales son:

- Dimensiones: 1912 x 917 x 0.5 mm
- Superficie útil de captación: 3,50 m<sup>2</sup>.
- Peso en vacío: 5.07 kg.
- Diámetro circuito impreso: 5/16".
- Material panel: Aluminio pulido con revestimiento absorbedor negro.



**Ilustración 12.** Panel termodinámico y sección transversal del circuito.

### **Funcionamiento**

El refrigerante entra al panel por la toma de entrada de gas (Ilustración 12). Una misma línea se divide en un total de cinco a través del colector de entrada. De esta manera se consigue que el refrigerante se distribuya homogéneamente por las cinco líneas. Cada una de estas líneas se divide a su vez en dos. De forma que se cuenta con diez líneas que barren el panel de tal manera que se puede considerar que la temperatura es constante a lo largo de este.



Finalmente se cuenta con un colector de salida en el que las líneas convergen en una sola. El panel tiene que estar bien dimensionado con el resto de la instalación para su correcto funcionamiento. En su funcionamiento ideal entra líquido saturado, de manera que se evapora en el panel hasta llegar al estado de vapor saturado. Este es el estado óptimo para la entrada en el compresor. Sin embargo el vapor se somete a un recalentamiento, desde el estado de saturación hasta la zona de vapor recalentado, no obstante el recalentamiento se limita a unos 4-5 °C ya que conlleva una pérdida del rendimiento. Este recalentamiento puede tener lugar en los siguientes sitios:

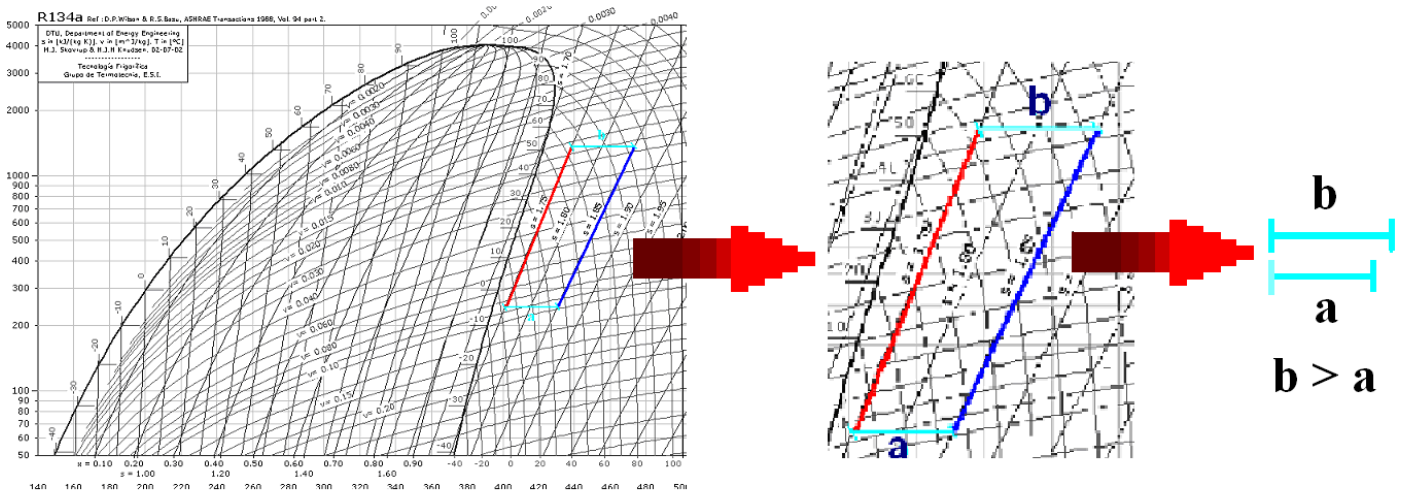
- En el mismo intercambiador (panel termodinámico), en el cual todo el líquido pasa a vapor y sufre además un recalentamiento posterior antes de su salida del equipo. Este recalentamiento se llama útil pues se produce por adición de calor desde la carga almacenada.
- En el trayecto de aspiración del compresor, desde la salida del evaporador hasta la entrada del compresor. Si el recalentamiento se efectúa en el ambiente externo a la zona a climatizar sigue siendo un recalentamiento útil, pero si tiene lugar en esta se considera un recalentamiento menos útil.

En caso de recalentamiento de vapor, la entrada al compresor está en un nuevo estado asegurando la ausencia de líquido en el compresor y por tanto la imposibilidad de golpes de líquido. Por otra parte, al ser los refrigerantes sustancias disolventes, cuando entran en estado líquido en el compresor tienden a remover la capa de aceite lubricante de las superficies metálicas, lo cual puede causar problemas de lubricación.

Por otra parte el recalentamiento implica el aumento de la temperatura antes de la compresión, por tanto también será mayor la temperatura de los vapores al finalizar dicha compresión. Este aumento será progresivo debido al incremento de la inclinación de las isoentrópicas a medida que se adentran en la zona de vapor recalentado, este efecto produce en algunos refrigerantes unas temperaturas finales de compresión elevadas las cuales son peligrosas para la vida del equipo. En efecto, si se considera comportamiento perfecto para el refrigerante y transformación adiabática:

$$\frac{T_f}{T_i} = \left[ \frac{p_k}{p_0} \right]^{\left( \frac{n-1}{n} \right)} \quad \text{siendo} \quad n = \frac{c_p}{c_v}$$

De la ecuación anterior deducimos que la temperatura de salida del compresor será tanto mayor cuanto mayor sea la tasa de compresión y la relación de calores específicos.



**Ilustración 13.** Diagrama de Mollier y detalle de la compresión según la entrada al compresor.

En el detalle de la Ilustración 13 se observa que el segmento *a* es menor que el segmento *b*. Esto es debido a la mayor inclinación de la isentrópica al aumentar la temperatura del vapor recalentado.

El recalentamiento a la entrada del compresor se hace principalmente para la protección del compresor asegurando así una compresión seca. Esto da lugar a un descenso del COP, principalmente por los siguientes motivos:

- Aumento del volumen específico en la aspiración, con el descenso consiguiente del caudal másico movido por el compresor, por lo que baja el rendimiento.
- Aumento de la temperatura final en descarga del compresor. El recalentamiento debe de estar controlado ya que un recalentamiento excesivo puede provocar malfuncionamiento y averías.

- Aumento en las pérdidas de carga tanto en la línea de líquido como en la línea de aspiración.
- Posible trampa para el retorno del lubricante, en caso de que los paneles estén en posición horizontal.

### **Colocación de los captadores**

Los captadores se colocan preferentemente con orientación sur y con la inclinación aproximada de la latitud del lugar, de manera que capturen la mayor radiación solar; sin embargo pueden posicionarse en un amplio rango de ángulos que van desde los 10° hasta los 90° con la consiguiente pérdida de captación solar.

Si existe la posibilidad se colocará de forma paralelo a las corrientes de aire habituales para favorecer la transferencia por convección. A la hora de instalarlos en paredes u otras zonas donde quede unido a una superficie, es recomendable dejar una distancia para que pueda circular el aire.

También estarán separados entre ellos la distancia necesaria para que no se produzcan sombras los unos a los otros. Esto va a depender de la colocación de los paneles, sea en vertical o en horizontal.

Su disposición puede ser cualquiera, tanto en vertical como en horizontal. Se fija aquella que permite que no haya sombras entre los paneles y que se puedan airear adecuadamente. Tanto en la colocación horizontal como en la vertical es importante que la entrada del refrigerante en el panel sea por la parte inferior. La colocación horizontal puede favorecer que el lubricante y el aceite queden atrapados dentro del panel lo cual puede ocasionar una avería en el compresor.

### **Proceso de fabricación**

Este panel también es conocido como Roll-Bond debido a su proceso de fabricación. Roll-Bond es un proceso de producción destinado a la fabricación de muchos tipos de canalizado.

Estos tienen una técnica de unión especial consistente en un sándwich de dos hojas de aluminio fabricado por un proceso de laminación en caliente y en frío.

La forma y tamaño de los canales de flujo se obtienen por la impresión- con un proceso de serigrafía-del patrón deseado sobre la superficie interior de una de las hojas que forman el sándwich de aluminio. Esta serigrafía se hace con una tinta cuya función es impedir la soldadura.

La unión de las dos superficies internas del sándwich es en realidad una soldadura autógena que combina los efectos de la temperatura mediante el precalentamiento y de la presión mediante la laminación en caliente. También se sueldan mediante colaminado. La soldadura de las superficies interiores no se produce cuando se aplica la tinta especial con el fin de obtener un patrón de áreas sin soldar.

La canalización por la que pasará el fluido refrigerante se eleva la introducir aire a una presión muy alta (150-250bar) creando uno canales de circulación sin necesidad de soldar. Para la fabricación de paneles de una sola cara, es necesario, que en el momento de la expansión de los canales, una de las caras del panel se deforme más fácilmente que la otra. Por consiguiente, para las dos caras de la banda compuesta se utilizan dos aleaciones diferentes, una más resistente que forma la cara plana, y otra menor solidez que se deforma en el momento de la expansión para formar los canales del circuito.

Una composición tipo para la cara plana sería una banda hecha de una aleación que contiene hierro y manganeso como la aleación 8006 de composición: Si: < 0,40 Fe: 1,2-2,0 Cu: < 0,30 Mn: 0,30-1,0 Mg: < 0,10 Zn: < 0,10. La banda de aleación de hierro y manganeso se elabora de preferencia mediante colada continua de bandas, y en particular por colada continua entre dos cilindros enfriados. Este procedimiento está protegido bajo la patente ES 2 204 356 T3.

Los paneles llevan un revestimiento negro selectivo de baja emisividad para aumentar su capacidad de absorción de la radiación solar.

Estos paneles, una vez que están terminadas las conexiones y pintados se utilizan como componentes para circuitos de refrigeración, evaporadores, tanto exteriores como para frigoríficos,...

### 2.3.2 Recuperador de calor del compresor

Los equipos termodinámicos compactos llevan incorporado recuperador de calor del compresor, denominado “intercambiador para refrigeración de compresores herméticos” patente número U200602566, de manera que se hace pasar el gas de la salida del evaporador alrededor del compresor, aumentándose su recalentamiento y refrigerando el compresor. Con este sistema se logra aumentar la eficiencia global del ciclo, al sumar esa ganancia térmica; así como evitar que el compresor alcance altas temperaturas, lo que también beneficia a su vida útil.



Se compone de 1,25 metros de tubería de cobre medida 3/8 enrollado en una curvadora eléctrica sobre un molde que imita la forma del compresor unido por dos laminas de cobre de 6 x 23 centímetros de ancho soldado de lado a lado con varilla de plata.

## 2.4 MODELO MATEMÁTICO.

La principal ventaja del uso de bombas de calor de expansión directa frente a las bombas de calores normales cuyo evaporador es una batería de condensadores con un ventilador, es la energía absorbida a través del evaporador. Mientras que en un

evaporador convencional absorbe energía del ambiente a través de una convección forzada, los paneles solares de expansión directa absorben energía tanto por convección como por la radiación directa del Sol.

Se puede evaluar el aumento de rendimiento que proporcionan estos sistemas mediante un balance de energía del sistema:

$$MC_p \cdot (T_{wf} - T_{wi}) = \alpha_e \cdot H_t \cdot A + U_e \cdot \Delta t \cdot (T_a - T_e) + W_{comp}$$

Donde,

M= masa total de agua a calentar (Kg.).

C<sub>p</sub>=Calor específico (KJ/Kg °C)

T<sub>wf</sub>= Temperatura final del agua (°C)

T<sub>wi</sub>=Temperatura inicial agua (°C).

a<sub>e</sub>=Coeficiente absorción del evaporador

H<sub>t</sub>=Radiación solar que capta el panel en el tiempo de calentamiento.

A<sub>e</sub>= Superficie de evaporador (m<sup>2</sup>).

T<sub>a</sub>= Temperatura ambiente media (°C).

T<sub>e</sub>= Temperatura de evaporación (°C).

W<sub>comp</sub>= Energía consumida por el compresor (KJ).

El primer miembro de la igualdad es la energía cedida al agua que sería igual a la ganancia solar más la ganancia ambiental más la energía consumida por el compresor.

La diferencia principal con la bomba de calor convencional es que el término de la ganancia solar,  $\alpha_e \cdot H_t \cdot A$ , es nulo en las bombas de calor convencionales.

El COP de la DX-SAHP quedaría de la siguiente forma:

$$COP = \frac{MC_p \cdot (T_{wf} - T_{wi})}{W_{comp}} = \frac{\alpha_e \cdot H_t \cdot A + U_e \cdot \Delta t \cdot (T_a - T_e)}{W_{comp}} + 1$$

Por tanto, cuanto mayor sea la ganancia solar mayor será el COP. Este término depende de 3 factores: El área de captación, la intensidad de radiación solar y la capacidad de

absorción del panel. Para aumentar la absorptividad de la superficie el panel se pinta de negro. Toda variación respecto a este color iría contraindicada para el rendimiento del equipo.

Por otra parte en el término  $U_e \cdot \Delta t \cdot (T_a - T_e)$  se observa que cuanto mayor sea la temperatura ambiente mayor será el COP, y cuanto menor sea la temperatura de evaporación menor será el COP.

Según el término  $\alpha_e \cdot H_i \cdot A$ , a mayor radiación solar mayor será la energía captada y por tanto mayor será el COP.

### **Resultados**

De los resultados derivados de las pruebas en laboratorio que se realizaron en la primavera de 2009 se obtuvieron los siguientes resultados como media.

	<b>Ganancia Solar</b>	<b>Ganancia ambiental</b>	<b>COP</b>
<b>DÍA</b>	31%	47%	4,5
<b>NOCHE</b>	0%	67%	3

**Tabla 1.** Porción de contribución al calentamiento de un depósito de agua.

Estas pruebas se realizaron con el serpentín interno lo que contribuye a una mayor transferencia de calor. La ganancia solar es mayor en los meses de verano, mientras que la ganancia ambiental llega a ser puntualmente nula al conseguir una temperatura de evaporación igual a la temperatura ambiente en momentos de gran radiación solar.

Sin embargo la ganancia ambiental es mucho más constante a lo largo del año y su valor medio supera al de la ganancia solar.

### **Conclusiones**

Este sistema tiene mayor rendimiento a una bomba de calor convencional debido a que aprovecha la radiación solar. Estos incrementos del COP se manifestarán más durante el día así como en los meses de verano que es cuando más radiación solar hay. Es por ello

que el rendimiento del colector puede ser mayor a la unidad. Definimos rendimiento del colector como:

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{A_c \cdot I_T}$$

Cuanto mayor sea la temperatura ambiente, mayor será el rendimiento del sistema lo que conlleva un mayor COP en los meses de calor.

El sistema aumenta su rendimiento a una menor temperatura de evaporación, ya que el compresor reduce su consumo al trabajar en unas condiciones más favorables.

Este sistema ha dado resultados de un COP mayor que 2, luego siempre es rentable frente a un sistema de calentamiento de agua mediante resistencias eléctricas.

## **2.5 ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS SOLARES TERMODINÁMICOS**

Los sistemas solares termodinámicos (bomba de calor solar asistida de expansión directa) fueron propuestos por primera vez por Sporn en 1955 [26]. Su idea consistía en utilizar un captador solar como evaporador en un ciclo de bomba de calor. No fue hasta finales de los 70 cuando comenzaron los estudios sobre el tema, impulsados en parte por la crisis del petróleo. Desde entonces se han llevado a cabo numerosos estudios usando como base la bomba de calor y con diversas configuraciones. Estos estudios han sido realizados por diversas universidades (ver referencias). Fuera del ámbito científico no hay documentación sobre este tipo de sistemas, de hecho no existe ninguna bibliografía formal de este sistema. Es a partir de estos últimos de donde se ha recabado la información que aparece a continuación.

Las bombas de calor solar asistidas admiten muchas configuraciones: Si la expansión del gas refrigerante se realiza dentro del captador solar se denominan bombas solar asistidas de expansión directa, y si la expansión se realiza en otro circuito independiente del circuito del captador solar se clasifican como bombas de calor solar asistidas; También se pueden clasificar según la fuente de calor para el evaporador que puede ser agua o aire más radiación solar.



Estos sistemas pueden combinarse con otros sistemas en pro de mejorar el rendimiento global y las prestaciones del sistema. Este es el caso del sistema solar asistido combinado con la bomba de calor geotérmica o el sistema multifuncional que combina el sistema solar termodinámico con bombas de calor.

En los siguientes apartados se van a describir las distintas configuraciones que pueden tener los sistemas combinados de bombas de calor con energía solar térmica y los resultados de las pruebas realizadas sobre las distintas configuraciones.

### **2.5.1 Bomba de calor solar asistida sin expansión directa**

Los sistemas de bomba de calor solar asistida, **SAHP** (Solar assisted heat pump), pueden clasificarse en dos tipos: con expansión directa, **DX-SAHP** (direct expansion solar assisted heat pump), y sin expansión directa, SAHP. El sistema de bomba de calor solar asistida sin expansión directa está formado por dos circuitos cerrados: el circuito del captador solar, por el que circula agua, y el circuito de la bomba de calor agua-agua. La diferencia fundamental con respecto a la bomba de calor solar asistida de expansión directa, DXSAHP es que necesita de un intercambiador entre los dos circuitos con la consecuente pérdida de eficiencia.

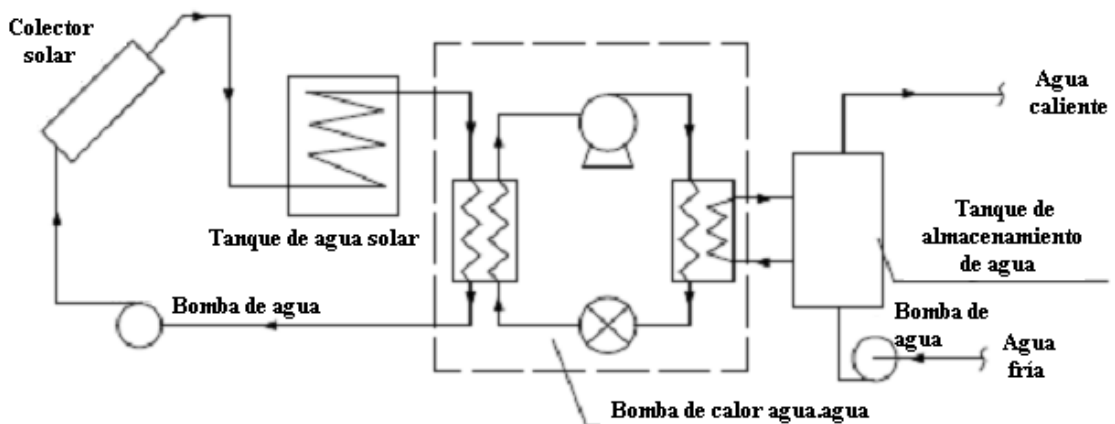
Dentro del grupo de SAHP se pueden distinguir varios tipos atendiendo al la fuente de calor que usan:

#### **2.5.1.1 Bomba de calor calentadora de agua con agua como fuente de calor.**

Este sistema tiene como fuente de calor para el evaporador de la bomba de calor agua del circuito del captador solar, tal y como sugiere la descripción de su nombre: Bomba de calor solar asistida con agua como fuente de calor, **SA-WSHP** (Solar assisted water source heat pump).

En el esquema que aparece en la Ilustración 14, la parte térmica (captador solar + tanque de agua solar) y la parte de bomba de calor (compresor + evaporador + condensador + válvula de expansión termostática) están conectados en serie, de forma que el agua se calienta en el captador solar, cede parte de ese calor en el tanque de almacenamiento de agua y luego cede el resto del calor en el evaporador del circuito de bomba de calor, volviendo al captador solar.

En este sistema siempre entra el funcionamiento el bloque de la bomba de calor ya que la parte térmica no tiene una conexión directa con el tanque de almacenamiento de agua. Cuando la radiación solar es baja, días nublados o durante la noche, el agua de circulación del circuito del captador toma calor del tanque de agua solar donde está la energía acumulada durante los momentos de radiación solar.



**Ilustración 14.** Modelo típico de una bomba de calor solar asistida sin expansión directa (SAHP), [8]

### 2.5.1.2 Bomba de calor calentadora de agua con aire como fuente de calor.

Este sistema tiene como fuente de calor para el evaporador de la bomba de calor el aire, de ahí su nombre: Bomba de calor solar asistida con fuente de aire, **SA-ASHP** (Solar assisted air source heat pump).

Este sistema está compuesto por un circuito del captador solar y una bomba de calor conectados en paralelo. Cuando hay una gran radiación solar, el circuito del captador

solar puede cubrir la carga de agua caliente, sin embargo, los días nublados o durante la noche el circuito solar no puede suplir la demanda. Es entonces cuando se pone en marcha el sistema de bomba de calor. En este caso la bomba de calor es aire-agua. A continuación aparece un esquema del sistema:

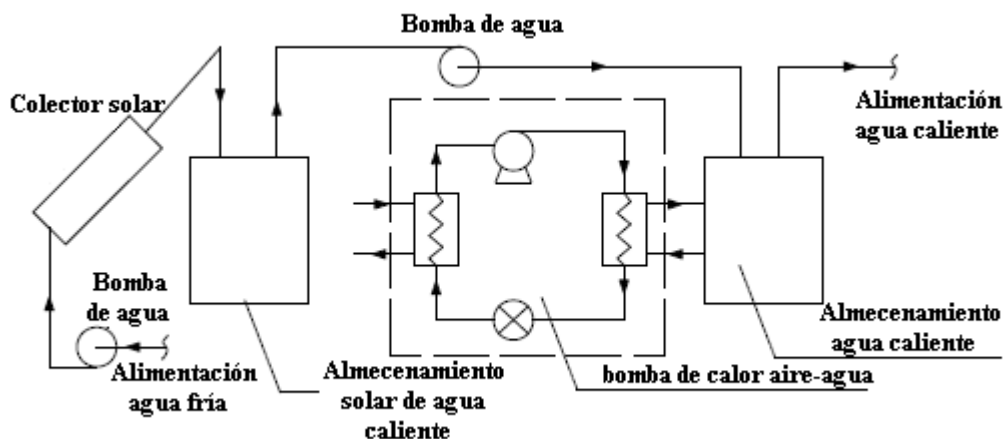


Ilustración 15. Esquema del sistema SA-ASHP, [8]

### 2.5.2 Bomba de calor solar asistida de expansión directa integrada

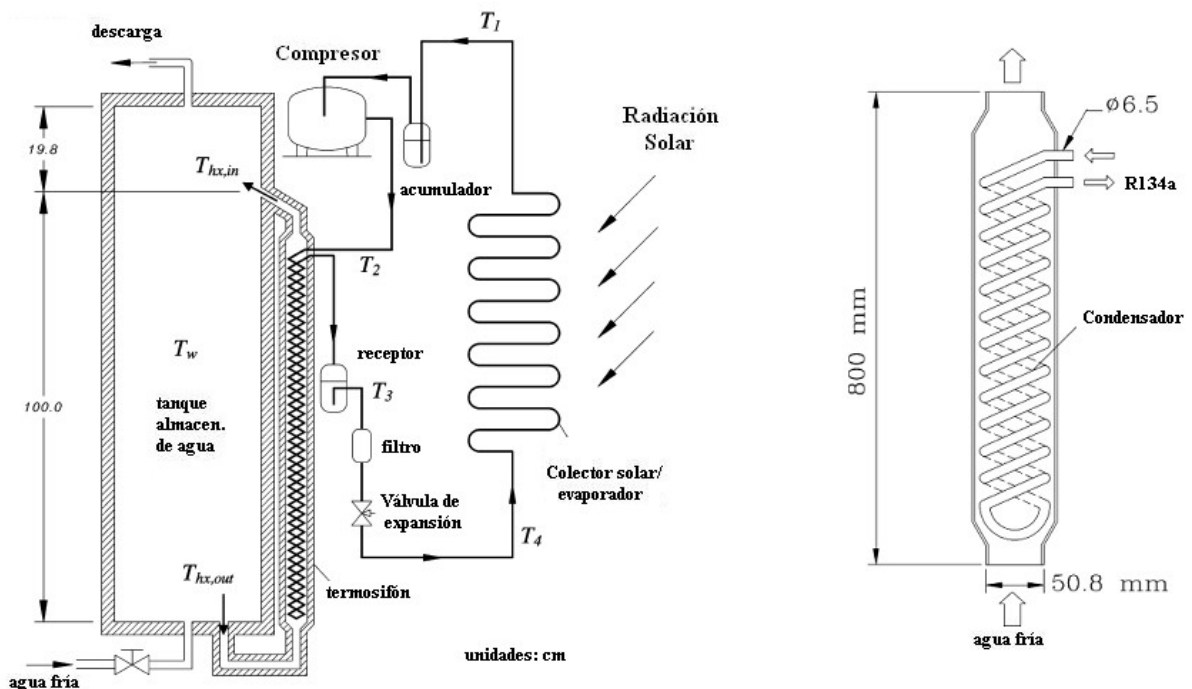
La denominación original de este sistema es **ISAHP** (Integral Solar Assisted Heat Pump), traducido como bomba de calor solar asistida integral. Huang y Chyng [7] propusieron el diseño de una bomba de calor solar asistida integrada, en la que se integran en una unidad compacta el captador solar, el tanque de almacenamiento de agua y la bomba de calor, formándose así una unidad fácil de instalar y de fabricación sencilla. El montaje de consiste solo en las conexiones a las tuberías de agua (toma fría y toma caliente) y una conexión eléctrica. El ISAHP absorbe calor simultáneamente de la radiación solar y del aire ambiente. Aunque no se indique específicamente en su denominación, es una bomba solar asistida de expansión directa.

A continuación se presentan dos estudios independientes sobre este sistema. El primero consiste en las pruebas y resultados obtenidos a partir de la unidad experimental

desarrollada por los investigadores Huang y Lee, [6]. En segundo lugar se describe el equipo desarrollado y comercializado por la empresa Energy Panel.

### 2.5.2.1 Bomba de calor calentadora de agua integral experimental desarrollada por la universidad de Taiwan.

En este estudio aparecen los resultados de las pruebas realizadas por los investigadores Huang y Lee, [66], sobre la bomba de calor solar asistida integral durante el año 2003.



**Ilustración 16.** A la izquierda esquema del ISAHP. A la derecha esquema detallado del termosifón en el que está el condensador, [6]

### Diseño del ISAHP

El ISAHP consiste en una unidad que sigue el ciclo de Rankine inverso formada por: un captador/evaporador, un intercambiador de calor/condensador diseñado como un termosifón. Fuera del circuito de Rankine se tiene un tanque de almacenamiento que recibe el calor transportado mediante el ciclo de Rankine. Para aumentar fiabilidad y reducir costes, el intercambiador de calor/condensador es diseñado como un termosifón

para transportar calor desde la condensación hasta el tanque de almacenamiento de agua. En la Ilustración 16 aparece un detalle del termosifón. Usando este mecanismo se permite una circulación natural del flujo en el termosifón. El compresor es el único elemento con movimiento en este sistema.

En la Ilustración 16 aparece un esquema sencillo del sistema para entender su funcionamiento. La unidad compacta se montó en la Universidad nacional de Taiwan tal y como se puede observar en la Ilustración 17. Las placas de cobre cubren solo una parte del bloque. Este bloque se sitúa de manera que la placa frontal (la de mayor tamaño) esté orientada hacia el Sur.



**Ilustración 17.** Prototipo del ISAHP, [6]

## **Resultados**

Como resultado de probar el sistema se comprobó que el sistema funciona incluso en aquellos días nublados y lluviosos, alcanzando en dichas condiciones una temperatura de hasta 61°C en el acumulador de agua y el COP es siempre mayor a 2.

De los resultados también se puede obtener la siguiente información:

- El COP es mayor si la temperatura de entrada se fija en un valor bajo.
- El COP aumenta cuando aumenta la radiación solar.
- En las estaciones cálidas, el equipo funciona menos horas (a igualdad de demanda). Luego el COP aumenta cuando aumenta la temperatura del ambiente.

Este sistema en concreto estuvo funcionando continuamente durante unas 13000 horas sin parar y un total de 20000 horas de funcionamiento, sin ningún fallo mecánico. Esto es debido a que el ISAHP tiene solo un elemento móvil que es el compresor. El sistema es altamente fiable si todos sus componentes están bien dimensionados.

### **2.5.2.2 Bomba de calor calentadora de agua integral experimental desarrollada por Energy Panel.**

Este equipo es un equipo termodinámico compacto cuya comercialización comenzó en noviembre del año 2009. Su nombre comercial es “Thermboil”. Está basado en los sistemas de bomba de calor con ganancia solar, en los que el evaporador es un panel metálico que se encuentra expuesto directamente al sol y a las condiciones climatológicas exteriores, captando la energía disponible. Esta energía es transmitida al agua a calentar a través de un intercambiador de calor o condensador. En la Ilustración 18 se puede ver el aspecto final de este equipo.



**Ilustración 18.** Equipo Therboil modelo TB200

El therboil se comercializa en tres tamaños: TB100, de 100 litros; TB200, de 200 litros y TB300, de 300 litros.

### **Características técnicas**

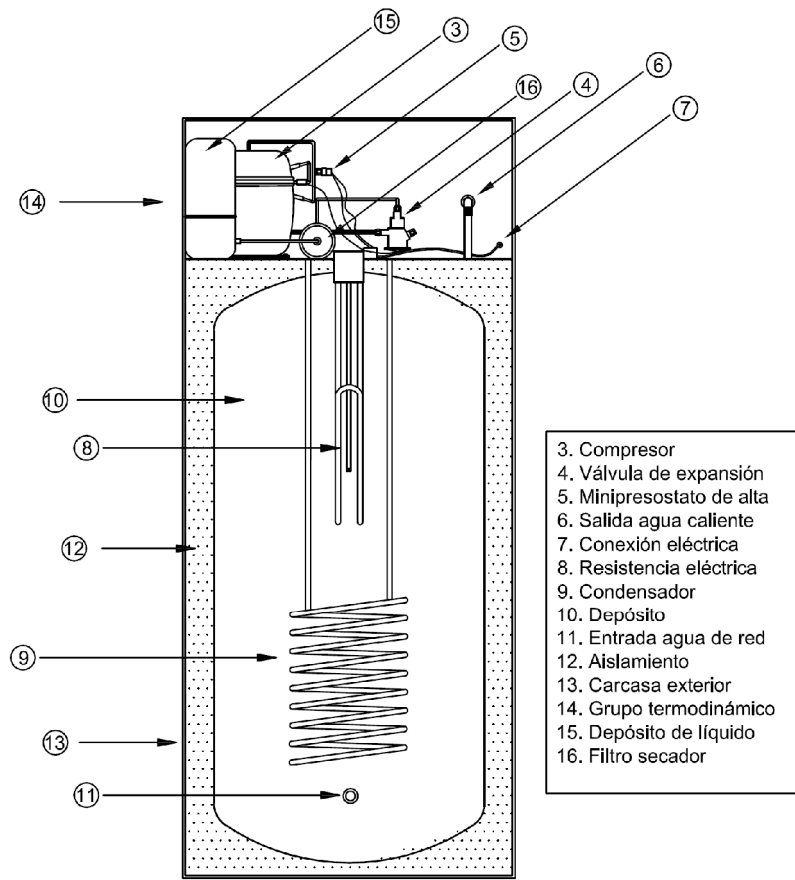
El Therboil cuenta con un depósito acumulador de acero inoxidable y un condensador a modo de serpentín también de acero inoxidable, ambos de calidad alimentaria. La distribución del condensador hace que se caliente la parte inferior del depósito, donde se encuentra el agua más fría, lo que favorece el rendimiento global del equipo. El conjunto va recubierto de poliuretano inyectado, minimizándose las pérdidas térmicas hacia el ambiente. El grupo termodinámico va ubicado en la parte superior del equipo, y todo el conjunto va protegido por una carcasa envolvente metálica.

El evaporador está constituido por un panel de aluminio con revestimiento absorbedor, lo que favorece la absorción de radiación solar, y comprende un circuito interior para la circulación del gas. El panel va conectado al equipo mediante dos tomas laterales soldadas.

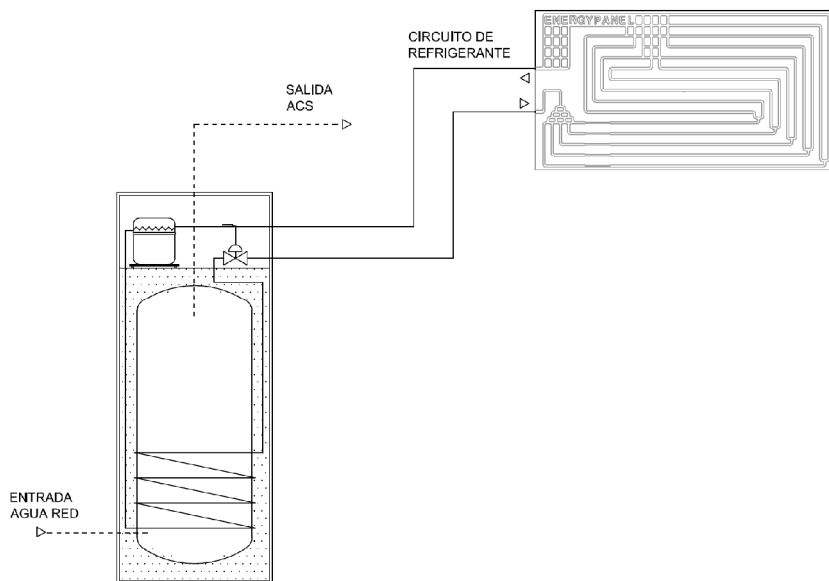
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS THERMBOIL TB200	
Capacidad térmica media (solo termodinámica)	2000 W
Potencia consumida media (termodinámica)	500 W
Potencia consumida máxima (termodinámica + resistencia)	2000 W
Tensión / frecuencia	230 V / 50 Hz
Rango de temperatura ambiente	5°C-45°C
Rango COP	2-7
Fluido refrigerante	R134a
Volumen del acumulador	200 l
Rango de temperatura ACS	45-55°C
Dimensiones (alto x ancho x profundo)	1350 x 600 x 590 mm
Presión máxima de trabajo	4 bar
Peso vacío / lleno	85 / 285 kg
Conexiones entrada / salida de agua fría / caliente	1/2"
Tipo de aislamiento	PUR 40kg/m <sup>3</sup>
Material del depósito	Acero inoxidable AISI 304
Dimensiones panel termodinámico (alto x ancho x profundo)	1560 x 800 x 1.5 mm
Peso panel termodinámico	5.07 kg
Conexiones panel termodinámico	3/8"
Dimensiones embalaje (alto x ancho x profundo)	1360 x 650 x 680
Clase de protección	IP 20

**Tabla 2.** Características técnicas del TB200





**Ilustración 19.** Sección transversal del TB200



**Ilustración 20.** Esquema de principio del TB200

### **Instalación**

Una de las mayores ventajas de este equipo es su fácil instalación. Para el grupo solo se necesita una toma eléctrica y las conexiones hidráulicas para un termo convencional.

Entre el grupo termodinámico y los paneles no debe existir una distancia superior a los 15 m en vertical ni a los 25 m en horizontal.

### **Resultados pruebas**

Los resultados que a continuación se muestran son los llevados a cabo para un equipo compacto termodinámico solar de 200 litros.

Las pruebas se han realizado para un calentamiento del agua desde 25°C hasta 50°C aproximadamente, y bajo diversas circunstancias climáticas.

Prueba	Irradiación solar (MJ/m <sup>2</sup> )	Temperatura ambiente media (°C)	COP
1	0 (noche)	10	2,4
2	0 (noche)	13,1	2,7
3	26,9	21,3	4,3
4	28,6	24	4,5
5	30	26,1	5,3
6	26,2	34,7	6,5

**Tabla 3.** Resultados de eficiencia del Thermboil bajo distintas condiciones ambientales.

De esta forma se comprueba que a temperaturas ambiente no elevadas y en ausencia de radiación solar, el rendimiento del equipo es próximo a 2,5 y que bajo condiciones climáticas favorables puede alcanzar valores superiores a 6.

Como resultado de todas las pruebas realizadas, se han obtenido valores aplicables a los distintos meses del año, según la temperatura ambiente media y la radiación solar incidente, consiguiéndose un COP medio anual de 3.8 (en Córdoba).

MES	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
H energía(MJ/m <sup>2</sup> día)	7,2	10,1	15,1	18,5	21,8	25,9	28,5	25,1	19,9	12,6	8,6	6,9
Tagua red (°C)	12	13	14	16	18	20	22	22	20	17	15	13
Tambiente* (°C)	11	13	16	18	21	26	30	30	26	21	16	12
COP	2	2,3	3,1	3,7	4,3	5,2	6,2	5,9	4,6	3,4	2,5	2

**Tabla 4.** Resultados del COP del Thermboil a lo largo del año

### Comparación bombas de calor solar asistidas simples con las bombas de calor solar asistidas de expansión directa

El sistema de expansión directa (DX-SAHP) conlleva una serie de ventajas frente al sistema simple, SAHP que se enumeran a continuación:

- **Mejora de la eficiencia.** La evaporación directa del refrigerante en el evaporador (el captador solar) conduce a mayores coeficientes de transferencia de calor.
- **Ahorro costes.** El uso del captador solar como el evaporador reduce el coste global del sistema porque la necesidad de un intercambiador adicional en el sistema tradicional es SAHP eliminada.
- **Mínima corrosión.** La corrosión que pueden ocurrir en los captadores de agua es eliminada debido a la utilización de refrigerantes como fluido de trabajo, lo que conlleva una mayor vida del sistema.
- El captador, incluyendo la placa plana desnuda, trabaja con un alto rendimiento basado en la baja diferencia de temperatura entre el captador y el ambiente, lo que también reduce coste del captador.
- **Problemas de congelación.** Usando directamente el refrigerante en el captador no existe problemas de congelación debido a la baja temperatura de congelación del refrigerante, evitando así el uso de anticongelantes.

- **Reducción de pérdidas.** Al circular refrigerante por el captador, disminuye la temperatura del captador estando esta por debajo de la temperatura ambiente. Esto mejora el rendimiento ya que reduce la temperatura entre el captador y el ambiente convirtiéndose en una ganancia lo que en el SAHP es una pérdida.

### **Mejora técnica**

Los equipos theriboil de 300 litros tienen un recuperador de calor para intercambiar calor con el aire caliente de la parte superior. Este equipo está pensado para aquellos sitios con un ambiente caldeado donde se produce una gran acumulación de calor en la parte superior, como pueden ser peluquerías, restaurantes,...

### **2.5.3 Sistemas termodinámicos en España**

Los sistemas solares termodinámicos tienen un mercado muy limitado de momento, su comercialización ha sido prácticamente nula hasta hace 6 años a pesar la gran cantidad de estudios que han sido realizados por todo el mundo desde los años 90.

Las principales empresas productoras están en España, no conociéndose hasta el momento fabricantes en otros países. Los componentes principales son comprados a distintos proveedores y las empresas son las encargadas del montaje y en ocasiones también pueden encargarse de la instalación final.

Fuera de España esta tecnología no es usada todavía. Esto puede ser debido al poco conocimiento de ella y a sus limitaciones cuando la temperatura exterior es muy baja.

Muchas de las instalaciones de las empresas que suministran los productos están acogidas a subvenciones por parte de las administraciones por eficiencia energética.

Las principales empresas productoras de los equipos son:

### **Energy Panel**

Energy Panel es una empresa dedicada al desarrollo y fabricación de sistemas de ahorro y eficiencia energética. Nace a partir de una idea innovadora de su fundador Antonio Marín Moscoso: El sistema solar Térmico-Termodinámico, descrito con anterioridad.

Desde sus comienzos Energy Panel se ha dedicado al desarrollo de sistemas para el aprovechamiento solar termodinámico. Para ello cuenta con un laboratorio solar donde se ha realizado diversos ensayos, que han conducido al perfeccionamiento y mejora continua de la eficiencia de los equipos.

Estos tres años y medio de Investigación y Desarrollo, la empresa se ha posicionado en un lugar muy ventajoso respecto de la competencia, al disponer de unos sistemas únicos con múltiples aplicaciones y resultados garantizados, como son las instalaciones de frío calor y el thermboil. Los principales productos de la empresa son:

- Equipos solares compactos termodinámicos para ACS: Thermboil
- Climatización de piscinas e instalaciones deportivas.
- Climatización mediante energía solar termodinámica.

### **Solar PST**

Solar PST fue la primera empresa en España que se dedicó a los sistemas de expansión directa con ganancia solar. Introdujeron el producto como novedoso rebautizándolos como sistemas termodinámicos, aunque esta tecnología lleva mucho tiempo propuesta. Gracias a esta empresa se han popularizado estos sistemas hasta entonces desconocidos para la gran mayoría.

Las críticas hacia esta empresa también han sido muchas debido a una publicidad engañosa, ya que inicialmente se anunciaban como sistemas con COP en torno a 9. Actualmente esta empresa está asociada a la empresa portuguesa Energie que fabrica los paneles termodinámicos.

Su sede está en la Coruña. Sus datos de contacto:

Laura Marín Lara

Nombre: Solar PST

Dirección: Calle Parroquia de Rois, nave F1. Polígono Industrial de Bergondo. 15165 Bergondo, La Coruña (España)

Página Web: [www.solarpst.com](http://www.solarpst.com)

Se dedican a las siguientes líneas de trabajo:

- Calentamiento de ACS.
- Calefacción de viviendas.
- Calentamiento de agua de piscinas.

Entre la multitud de instalaciones desarrolladas por esta empresa cabe destacar:

- Calentamiento de ACS en hoteles:
- Hotel Grand Beach las Palmas, España.
- Hotel Melia América, Madrid.
- Hotel en Kenia
- Hospital oncológico de Galicia "José Antonio Quiroga y Piñero".

Esta empresa ha conseguido la certificación de industria así como el Solar Keymark

### **Capsolar**

Esta empresa es más reciente, y su volumen de instalaciones es menor a las anteriores que llevan más tiempo en el mercado.

Su sede está en Tres Cantos, Madrid. Sus datos de contacto son:

Nombre: CAPSOLAR CST

Dirección: Ronda de Valdecarrizo, 45 (Nave B15), Tres Cantos, 28760, Madrid, España.

Página Web: [www.capsolarcst.com](http://www.capsolarcst.com)

Laura Marín Lara

Capsolar ofrece los siguientes equipos:

- Equipos solares termodinámicos para Agua caliente sanitaria (ACS).
- Calefacción solar termodinámica para viviendas y piscinas

Las instalaciones realizadas por Capsolar son principalmente viviendas a particulares.

### **Delta Leioa Solar**

Delta Leioa Solar S.L. es el único fabricante en España de paneles solares termodinámicos, comercializa, distribuye e instala equipos solares termodinámicos.

Nace en el año 2.007 tras realizar varios estudios de investigación con la empresa Neiker - Tecnalia perteneciente al Gobierno Vasco, se llega a la conclusión que el sistema es y se pone en marcha el proyecto Delta Leioa Solar.

Sus datos de contacto son:

Nombre: DELTA LEIOA SOLAR, S.L.

Dirección: Polígono Industrial El Campillo I, Nave 45. CP: 48.500 Abanto y Zierbana  
Bizkaia - España

Página Web: [www.solartermodinamica.es](http://www.solartermodinamica.es)

En cuanto al volumen de instalaciones de esta empresa es menor a las otras del mismo sector.

Las empresas anteriores compran los paneles termodinámicos a otras empresas a excepción de Delta Leioa Solar que fabrica sus propios paneles. Los paneles termodinámicos se fabrican en multitud de sitios, ya que pese a lo novedoso del nombre, esto paneles han estado siempre presentes en el mercado para otras aplicaciones, principalmente la de panel evaporador en frigoríficos. En la Ilustración 21 se pueden apreciar los paneles evaporadores convencionales que forman parte de los circuitos frigoríficos.



**Ilustración 21.** Paneles evaporadores de equipos de refrigeración

La relación de usos para los paneles Roll-Bond es:

- Panel solar
- Evaporador para frigoríficos
- Panel radiante para la climatización
- Intercambiadores de combustible (industria automovilística)
- Panel radiante para la industria naval y aeronáutica
- Circuito de refrigeración para los motores grandes y transformadores

Por tanto se puede afirmar que se trata de un elemento fiable y muy probado y extendido, ya que los paneles evaporadores para frigoríficos están en la mayoría de los frigoríficos del mundo

Los paneles evaporadores termodinámicos reciben un tratamiento superficial especial para aumentar la captación solar. Este es un proceso de anodizado, descrito anteriormente, cuyo resultado es un panel de color negro, de esta forma se calienta más y evapora más cantidad de refrigerante. Este tratamiento superficial es alternativo. En ocasiones se prescinde del anodizado por la estética final del panel cuando este queda a la vista. En este último caso disminuiría el rendimiento de la instalación ya que la ganancia solar será menor pudiéndose compensar esta disminución del rendimiento con mas paneles.

Las principales empresas fabricantes de paneles evaporadores son:



### **Delta lamiako**

Esta empresa fue fundada en 2004 a partir de la empresa Earcanal S.A., una de las cinco empresas europeas dedicadas a la fabricación de paneles evaporadores para frigoríficos, tanto doméstica como industrial.

Se dedican a la fabricación de paneles evaporadores independientemente de su destino final. El proceso de fabricación es el roll-bond.

Datos de contacto

Nombre: DELTA LAMIAKO.

Dirección: C/ Langileria, s/n. CP: 48940 Leioa-Bizkaia - España

Página Web: [www.deltalamiako.com](http://www.deltalamiako.com)

### **BORANAGROUP**

Empresa india cuya trayectoria en los paneles evaporadores data desde 1979. Están especializados en la tecnología Roll-Bond, y sus evaporadores son compatibles con el gas R-134a.

Datos de contacto:

Nombre: Compagnie generale alluminio

Dirección: Dist. Nagpur, India

Página Web: <http://www.boranagroup.com/roll-bond.html>

### **GREATCOOL**

Compañía china dedicada a la fabricación de todo tipo de evaporadores.

Datos de contacto:

Nombre: Greatcool

Dirección: Room 414,Zhongdu Office North Building, Linping, Hangzhou, China, 311100

Laura Marín Lara

Página Web: <http://www.chinagreatcool.com>

La oferta de paneles termodinámicos no se limita solo a las principales empresas que fabrican los grupos termodinámicos antes mencionadas. Multitud de empresas instaladoras, la mayoría de ellas especializadas en instalaciones solares, son clientes de las cuatro empresas españolas dedicadas a la producción de estos sistemas.

Progresivamente va aumentando el número de tiendas especializadas en energía solar y climatización que incorporan a sus productos los sistemas solares termodinámicos. A continuación se hace mención de algunas de las empresas que venden sistemas solares termodinámicos:

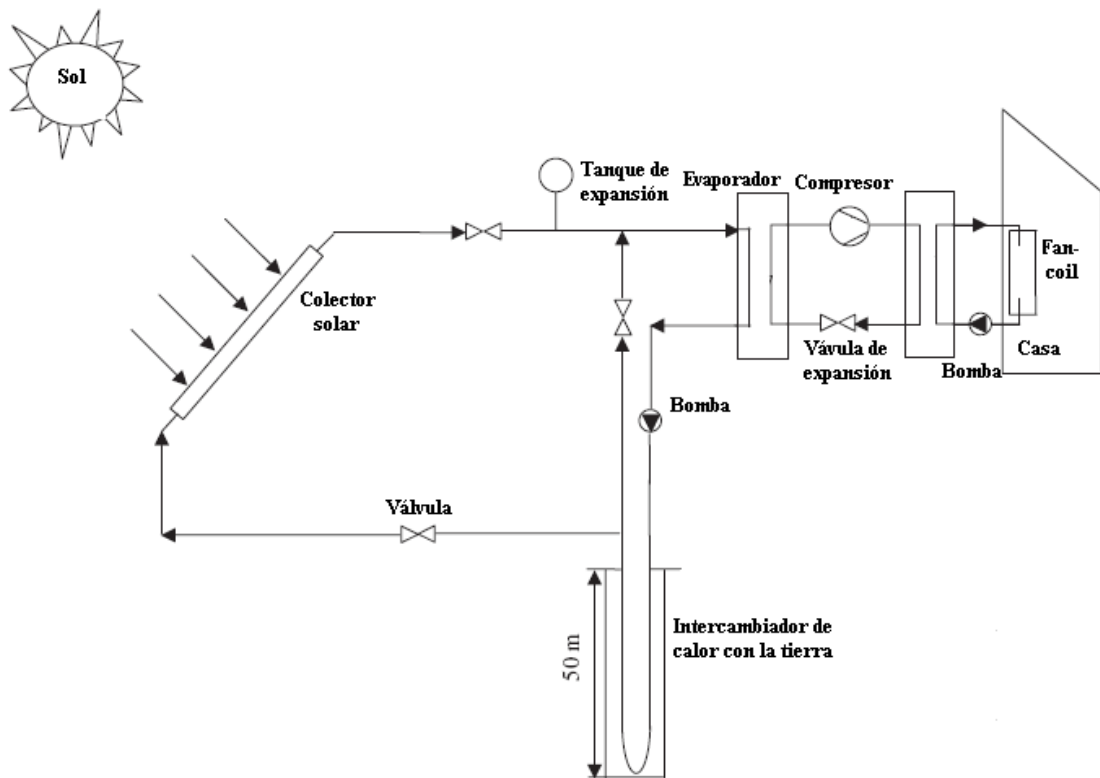
- **Lito**  
<http://www.instalacioneslito.com/>  
San Vicente de la Barquera, Cantabria
- **Natural Energy**  
<http://www.naturalenergy.es/>  
Alcorcón, Madrid
- **Cinasco Sol Proyectos**  
<http://www.cinascosolproyectos.com/>  
Sonseca, Toledo
- **OSCASOLAR Energías renovables**  
<http://www.oscasolar.com/>  
Binéfar, Huesca
- **Elinte Solar**  
<http://www.elintesolar.net/>  
Terrassa, Barcelona

## 2.6 COMBINACIÓN DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS CON CAPTADORES.

Los sistemas de bombas geotérmicas se pueden combinar con el sistema de captadores solares de expansión indirecta. De esta manera se conseguiría un sistema fiable a lo

largo de todo el año con una gran mejora de la eficiencia en verano ya que es la época en que más ventajosos son los captadores solares frente a la fuente geotérmica. Este sistema sería más similar a las SAHP (de expansión indirecta), ya que por los captadores pasa agua o una mezcla de agua.

El sistema quedaría por tanto formado por tres partes: El circuito geotérmico acoplado a los captadores solares por los que circula agua con anticongelante, el circuito refrigerante y por último el sistema de fan-coil. Este último sistema varía según el tipo de sistema que se quiera instalar en el hogar, pudiendo ser sustituido por suelo radiante o radiadores. La Ilustración 22 refleja un esquema de como quedaría el sistema.



**Ilustración 22.** Esquema básico de la bomba de calor solar asistida y geotérmica, [9]

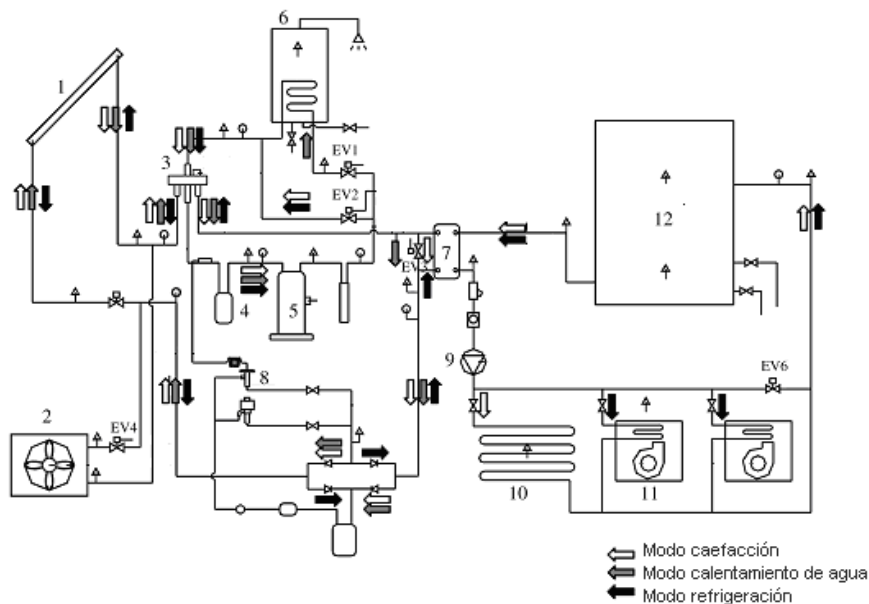
En invierno y en los días fríos en los que el captador no aporta energía el fluido caloportador (agua+anticongelante) circularía exclusivamente por en intercambiador de calor con la tierra. Cuando el captador tenga ganancias se abriría la válvula y el fluido caloportador tomaría calor tanto de la tierra como de la radiación solar.

## 2.7 SISTEMA MULTIFUNCIONAL

Como se ha mencionado con anterioridad, los sistemas de expansión directa tienen multitud de aplicaciones; calentamiento del agua, calefacción del ambiente,... En esta sección se muestran dos sistemas que enfrían el ambiente además de llevar a cabo el calentamiento de agua o del ambiente. El primer apartado consiste en un experimento llevado a cabo por la Universidad de Hong Kong, y tiene tres modos de funcionamiento. El segundo apartado describe una instalación diseñada y ejecutada por la empresa Energy Panel en Cartagena.

### 2.7.1 Sistema multifuncional de una vivienda en Hong Kong.

Entre las posibles aplicaciones del DX-SAHP se destaca el siguiente sistema multifuncional para uso doméstico. Este sistema tiene la capacidad tanto de refrigerar como de calentar un recinto.



1-Evaporador, 2-Intercambiador de calor aire, 3-Válvula reversible, 4-Acumulador, 5-Compresor, 6-Tanque de agua caliente  
 7-Intercambiador de placas, 8-Válvula de expansión, 9-Bomba de agua, 10-Circuito de suelo radiante, 11-Fan coil,  
 12-Tanque de almacenamiento de calor

**Ilustración 23.** Esquema general sistema multifuncional, [10]

## **Modos de operación**

Este sistema puede tener 3 modos de operación:

1. Calefacción del espacio.
2. Calentamiento de agua solo.
3. Refrigeración del espacio.

Tanto para calentamiento como para el enfriamiento del espacio se puede producir agua caliente.

### **1. Modo calefacción del espacio**

Este modo es para el invierno cuando es necesario calentar las habitaciones. El refrigerante de los captadores/evaporadores se evapora en el campo de captadores solares, mientras que el intercambiador de calor de placas actúa como condensador. El vapor de refrigerante proveniente del compresor entra en el intercambiador de calor de placas directamente sin pasar a través del condensador inmerso en el depósito de agua caliente. El sistema de suelo radiante se usa para disipar el calor hacia el ambiente de la habitación.

En el modo de calefacción del sistema no existe producción de agua caliente y el COP máximo obtenido en este modo de funcionamiento es de 3.

### **2. Modo calentamiento de agua**

Este modo se usa solo para la producción de agua caliente. En este modo, la válvula de cuatro vías está colocada como antes y el captador también sirve como evaporador. La bobina de cobre que actúa como condensador está inmersa en el agua del depósito de manera que disipa calor al agua. El compresor se para una vez que la temperatura del agua alcanza los 50 °C. Cuando el DX-SAHP continúa funcionando, la temperatura de trabajo del depósito de agua condensador sube y la eficiencia del sistema desciende en consecuencia.

En este sistema el COP varía sensiblemente con el cambio de la temperatura del agua. El COP máximo alcanzado en este modo es de 3,5.

## **2. Modo refrigeración del espacio**

En verano el DX-SAHP puede actuar como sistema de refrigeración. Invertiendo el sentido del flujo a través de la válvula de cuatro vías, el captador actúa como condensador, el cuál rechaza el calor de condensación a los alrededores aprovechando el frío nocturno. Durante el día no funcionaría dada la gran disminución de eficiencia al tratar de condensar recibiendo la radiación solar. Durante el día se corta el paso del refrigerante al captador y se le hace pasar a través de la unidad condensadora, evitando usar el captador como condensador. Las unidades de fan-coil se usan como evaporador y enfrían el ambiente.

### **2.7.2 Sistema multifuncional de una piscina en Cartagena.**

La siguiente instalación fue realizada en Cartagena, Murcia en el año 2007. La instalación cuenta con un sistema de aprovechamiento de energía solar termodinámica para la climatización de una piscina, así como la refrigeración de un vestíbulo, empleándose un sistema de alto rendimiento como sistema principal de suministro energético.

#### **Descripción del edificio**

La piscina climatizada tiene una superficie de 20,0 x 16,5 m. El vestíbulo que se desea refrigerar cuenta con unas dimensiones de 50,00 x 40,00 x 6,00 m. En la cubierta del recinto se ubicaron todas las placas necesarias para llevar a cabo la instalación.

Antes de la colocación del sistema solar termodinámico la instalación contaba con una caldera de gas natural para calentamiento del vaso de la piscina y recinto exterior, sin embargo no disponía de medios de climatización del vestíbulo mencionado. La caldera ha quedado como apoyo de la instalación termodinámica para situaciones en las que fuese necesario.

## **Modos de funcionamiento**

### **Función calor**

El control continuo de la instalación en esta función se realizará de la siguiente manera:

1. Los grupos termodinámicos (1, 2, 3,4) se pondrán en funcionamiento cuando la temperatura del agua de las piscinas descienda de 26°C. Los grupos trabajarán en cascada, disponiendo de una sonda de temperatura en la salida del secundario de modo que cuando se alcance la temperatura de consigna para a la salida del grupo 1 y 2 (50°C, por defecto), dejará de funcionar el grupo siguiente.
2. La caldera entrará en funcionamiento cuando la temperatura del agua de la piscina baje de 24,5°C.
3. La bomba del circuito de fancoils del vestíbulo arrancará cuando la temperatura ambiente del recinto sea superior a la temperatura que se le marque (20° C, por defecto).

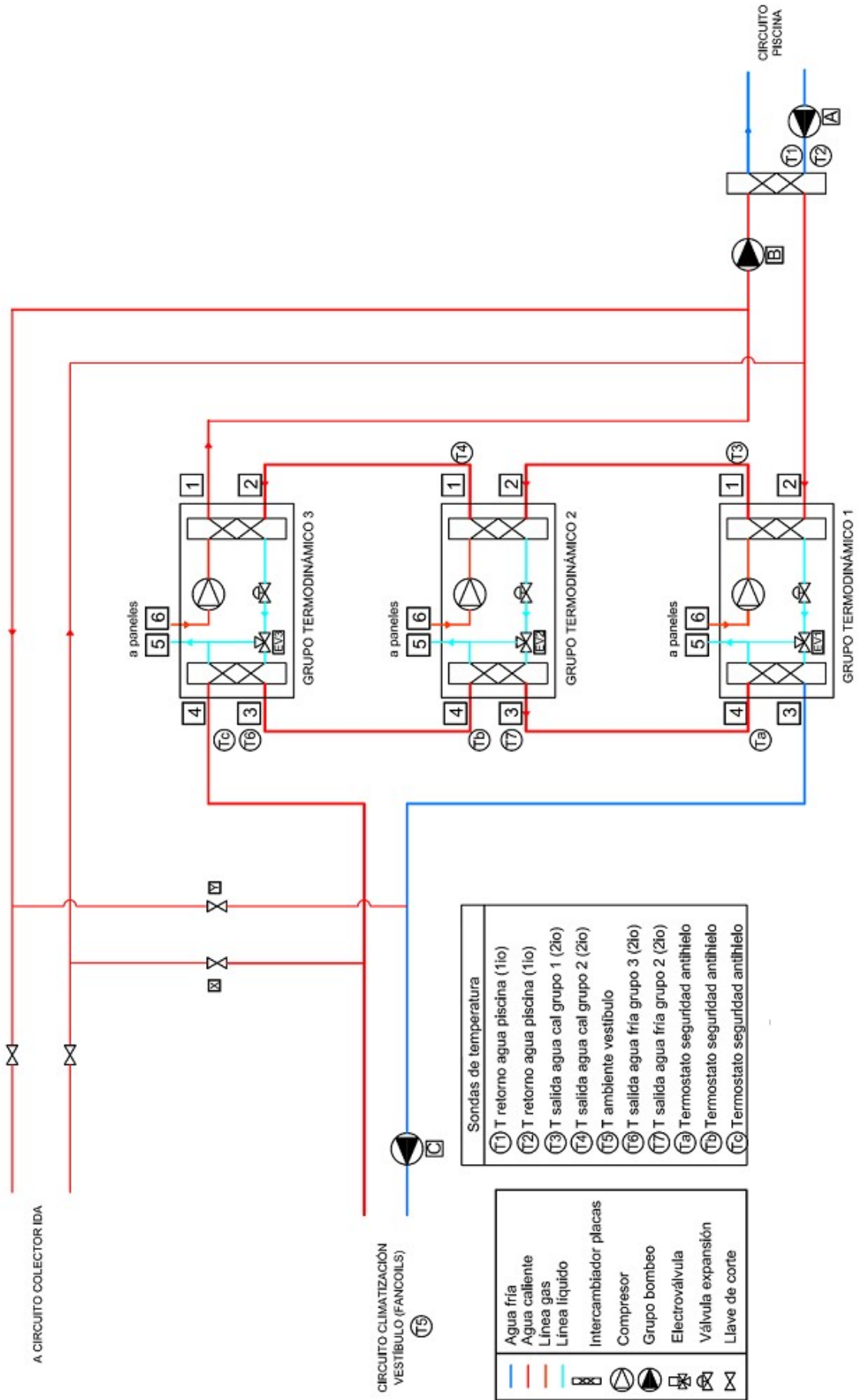
### **Función frío**

Se elegirá esta función cuando se desee utilizar la instalación únicamente para refrigeración del vestíbulo, de modo que el calor extraído se disipará en la piscina (aunque ésta no esté siendo utilizada). Esta función hará arrancar los grupos y la bomba (bomba C) cuando la temperatura del vestíbulo suba por encima del valor prefijado.

De igual modo, los grupos irán arrancando en cascada de modo que hasta que no se alcance en la corriente de salida de agua fría de los grupos el valor de 10°C (fijado por defecto), los grupos correspondientes no dejarán de funcionar.

## **Esquema de principio**

Sistemas solares termodinámicos: Estado del arte y aplicación práctica.





**Ilustración 24.** Esquema instalación Piscina de Cartagena.

**Resultados derivados de esta instalación**

Esta instalación está en funcionamiento desde finales del año 2007. Los resultados aportados por el cliente desde su puesta en servicio hasta la fecha son satisfactorios, siendo el COP medio anual de 5,5, (COP calculado a partir del consumo eléctrico y del consumo de gas natural del año anterior a la instalación del sistema termodinámico).

## **2.8 ESTUDIO RECIENTE BOMBA DE CALOR SOLAR ASISTIDA DE EXPANSIÓN DIRECTA**

El estudio que se lleva a continuación usa como refrigerante el R-22 aunque puede ser también aplicado a sistemas de bombas de calor que usen otro refrigerante distinto al R-22, [3]. El R-22 todavía está permitido en China.

El sistema probado en este estudio es una bomba de calor solar asistida con expansión directa típica cuyos resultados y conclusiones son un buen escaparate de las ventajas de este sistema.

En la Ilustración 25, se muestra el esquema de este sistema.

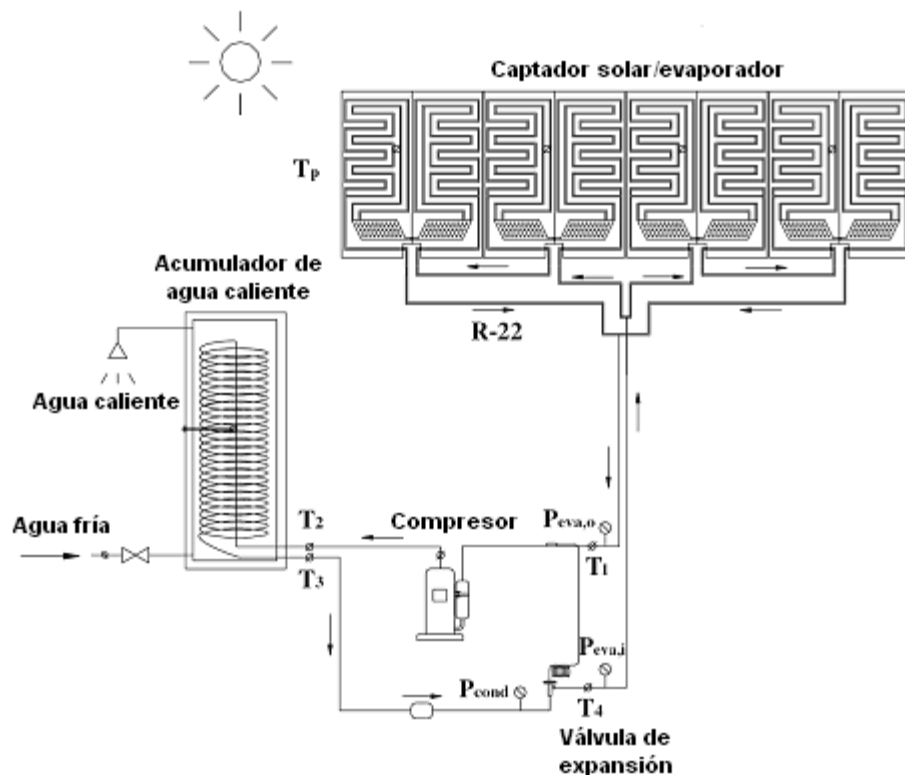


Ilustración 25. Esquema del DX-SAHPWH propuesto por la Universidad de Shanghai [3]

## Resultados

- **COP máximo.** Los resultados obtenidos indican que el COP del DX-SAHPWH de este sistema puede alcanzar el valor de 6,61 cuando la temperatura de entrada del tanque de almacenamiento va desde 13,4°C hasta 50,5°C en un tiempo de 94 minutos con una temperatura ambiente de 20,6°C y una radiación solar media de 955 W/m<sup>2</sup>.
- **A mayor T<sub>0</sub> mayor es el COP.** Se puede concluir que el COP también mejora con el incremento de la temperatura ambiente, T<sub>0</sub>. Esto es debido a que al subir T<sub>0</sub> disminuyen las pérdidas de calor hacia el ambiente y aumenta la temperatura de evaporación, T<sub>evap</sub>. Pero cuando la radiación solar es mayor, el incremento de T<sub>0</sub> no tiene tanta influencia sobre el COP debido a que la ganancia del captador debido al aumento de la radiación solar es mucho más grande que las pérdidas de calor que se pudieran producir desde el panel al ambiente.

- **El rendimiento mejora con  $T_{\text{evap}}$  y  $T_{\text{cond}}$  cercanas.** Ya que el consumo del compresor depende fuertemente de las presiones de entrada y salida, cualquier método que ahorrará energía si pone la temperatura de evaporación,  $T_{\text{evap}}$  y la temperatura de condensación,  $T_{\text{cond}}$ , lo más próximo posible. Por tanto la alta radiación solar, la alta temperatura ambiente y la baja temperatura del agua de entrada son ventajosas para aumentar el rendimiento del sistema. Es por esto que se sugiere que el periodo de funcionamiento del sistema esté cercano al medio día y que la temperatura final del agua no debería ser fijada mayor a  $60^{\circ}\text{C}$ , siendo recomendable fijarla en un rango de  $45 - 50^{\circ}\text{C}$ .
- **Elección de la temperatura de evaporación.** La  $T_{\text{evap}}$  puede estar por debajo o por encima de la  $T_0$ . Esto depende de la elección del diseño del sistema. Chaturvedi [2], opinaba que el uso de un panel desnudo en un SAHP con un compresor tiene un rendimiento óptimo basado en la maximización de la eficiencia energética siempre que la temperatura del evaporador esté comprendida entre un rango de  $5-10^{\circ}\text{C}$  sobre la temperatura ambiente. Este sistema sólo funcionaría los días con alta radiación solar. Sin embargo, Huang [1] consideraba que un SAHP operando con una  $T_{\text{evap}}$  inferior a la temperatura ambiente presentaba la ventaja de una temperatura menor en el escape del compresor y además se tienen dos fuentes de calor: la radiación solar y el ambiente. En este estudio experimental, la  $T_{\text{evap}}$  se diseña de modo que quede unos  $5^{\circ}\text{C}$  por debajo de la temperatura. Para controlar la  $T_{\text{evap}}$  sería necesario un compresor de frecuencia variable y una válvula de expansión termostática electrónica. En este caso se podrían reducir las principales pérdidas de exergía producidas tanto en el compresor como en el evaporador.
- **Aislamiento adecuado del acumulador.** Las pérdidas de calor entre en tanque de almacenamiento de agua caliente y el aire de alrededor, y la diferencia de temperatura existentes entre el refrigerante en el condensador y el agua caliente del tanque conllevan a unas pérdidas energéticas. Estas pérdidas pueden ser reducidas mejorando el aislamiento del acumulador de agua y optimizando la configuración y la posición del condensador dentro del tanque de almacenamiento de agua.

- **Pérdidas por expansión.** La única manera para eliminar las pérdidas producidas en la expansión sería reemplazar la válvula de expansión por una pequeña turbina. Este dispositivo sería muy costoso y conllevaría un ahorro muy pequeño por lo que a efectos prácticos es inviable económicamente. Merece la pena destacar que el uso de una válvula electrónica puede resultar más adecuado para el control del vapor sobrecalentado y también más fiable.

## **2.9 RESUMEN ESTUDIOS Y RESULTADOS DE LAS BOMBAS DE CALOR CALENTADORAS DE AGUA**

Los estudios llevados a cabo de los sistemas de bombas de calor calentadoras de agua no son muy numerosos. En este apartado se ha tratado de reflejar una muestra de los distintos tipos de estudios llevados a cabo, así como los resultados de algunos de ellos. En la siguiente tabla aparecen una enumeración de distintos análisis experimentales y/o teóricos de las bombas de calor empleando distintas fuentes de calor, así como los resultados de estos.

Sistemas solares termodinámicos: Estado del arte y aplicación práctica.

CLASE	Año	Investigadores	TIPO DE ESTUDIO		TIPO DE SISTEMA		APLICACIÓN		RESULTADOS
			Teórico	Experimento	Calentamiento	Enfriamiento	Calentador de agua	A/A	
Bomba de calor geotérmica	2001	Swardt and Meyer [12]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Simulación/Experimental: COP <sub>calentamiento</sub> = 3,32/3,31; COP <sub>enfriamiento</sub> = 3,19/3,05; COP <sub>calentadorAgua</sub> = 2,4.
	2003	Hepbasli [13]	✗	✓	✓	✗	✓	✓	COP <sub>calentamiento</sub> = 1.656; COP <sub>sistema</sub> = 1.339
	2008	Biaou and Beriner [14]	✓	✗	✓	✓	✓	✓	Bomba de calor calentadora de agua: COP = 2.4
Bomba de calor con fuente de calor aire	1979	Sloane et al. [15]	✓	✓	✓	✗	✓	✗	COP = 2.0–2.8 (18–35 °C temperatura ambiente, 27 - 4.4 °C fuente agua)
	2000	Ito and Miura [16]	✓	✓	✓	✗	✓	✗	COP = f(Te)Te: T <sub>emp evap.</sub> Run 1 T <sub>aire</sub> = 20 °C; COP = 4.0. Run 2 T <sub>aire</sub> = 10 °C; COP = 3.68
	2003	Ji et al. [17]	✗	✓	✓	✓	✓	✓	3 modelos de funcionamiento—M1: enfriador espacio y calentador agua; COP <sub>calen-agua</sub> = 4.02, COP <sub>enfria</sub> = 2.91.M2: solo calentamiento agua; COP <sub>calen-agua</sub> = 3.42, 3.25, 2.52,2.00 (para T <sub>0</sub> = 31, 25, 15, 4.5 °C). M3: enfriador espacio COP <sub>enfria</sub> = 2.72
	2004	Morrison et al.[18]	✓	✓	✓	✗	✓	✗	En Sydney, Australia Carga pico invierno: 40 Mj/dia, COP <sub>conden-int</sub> = 2.3, Ahorro energia anual = 56%; COP <sub>conden-ext</sub> = 1.8, Ahorro energia anual = 44%
	2007	Zhang et al. [19]	✗	✓	✓	✗	✓	✗	COP <sub>inv</sub> = 2.61 (T <sub>0</sub> = 0 °C); COP <sub>verano</sub> = 5.66 (T <sub>0</sub> = 35 °C); COP <sub>prim/oto</sub> = 4.817 (T <sub>0</sub> = 25 °C)
Bomba de calor solar asistida	1976	Sakai et al. [20]	✗	✓	✓	✓	✓	✓	No resultados
	1996	Chaturvedi [21]	✓	✓	✓	✗	✓	✗	(En un rango de frecuencia de 30–70 Hz ): COP = 2.5–4.0
	2003	Hawlader et al.[22]	✓	✓	✓	✗	✓	✗	COP <sub>sistema</sub> = 6.0; rend-captador = 0.77
	2003	Chyng et al. [23]	✓	✓	✓	✗	✓	✗	COP <sub>diario-total</sub> = 1.7–2.5 (media año); T <sub>agua</sub> = 57.2 °C
	2003	Kuang et al. [5]	✓	✓	✓	✗	✓	✗	COP <sub>media-mensual</sub> = 4–6; rend-captador = 40–60%
	2005	Huang et al [24]	✗	✓	✓	✗	✓	✗	COP <sub>modo-bomba-calor</sub> = 2.58; COP <sub>modo-híbrido</sub> = 3.32
	2006	Guoying [25]	✓	✗	✓	✗	✓	✗	Media mensual COP = 3.98–4.32; Tagua = 55 °C
	2007	Li et al. [3]	✗	✓	✓	✗	✓	✗	COP <sub>medio-anual</sub> = 5.25; rend= 1.08; Tagua = 50.5 °C