



# INFORME CSET-2017-PU-003-SP

## Estudio de Tecnologías para Refrigeración Solar

**Autores:**

Gaspar López  
Mercedes Ibarra  
Werner Platzer

**Proyecto**

CORFO 13CEI2-21803

**Fecha**

Julio 2017

## Contenido

<b>1</b>	<b>Resumen Ejecutivo</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Introducción</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Principios de básicos de la refrigeracion</b>	<b>6</b>
3.1	Cambio de fase de un fluido	6
3.2	Ciclo de refrigeración por compresión.	7
<b>4</b>	<b>Tecnologías de Refrigeración Solar</b>	<b>10</b>
4.1	Clasificación de tecnologías de refrigeración solar	10
4.2	Indicadores de desempeño	12
4.3	Sistemas térmicos de ciclo cerrado	13
4.3.1	Refrigeración Solar por Absorción.	13
4.3.2	Refrigeración Solar por Adsorción.	21
4.4	Sistemas térmicos de ciclo abierto	28
4.4.1	Refrigeración Solar por Desecantes Sólido	28
4.4.2	Refrigeración Solar por Desecantes Líquido	32
4.5	Sistemas termo-mecánicos	35
4.5.1	Refrigeración Solar por Compresión -Ciclo Rankine	35
4.5.2	Refrigeración Solar Ciclo Eyección	38
4.6	Refrigeración Solar Eléctrica	41
4.6.1	Refrigeración Solar Fotovoltaica -	41
4.6.2	Refrigeración Solar Termo-eléctrica	43
<b>5</b>	<b>Estado de Desarrollo de la Refrigeración Solar</b>	<b>45</b>
5.1	Madurez tecnológica y eficiencia energética	45
5.2	Viabilidad económica	50
5.2.1	Estado del mercado internacional	50
5.2.2	Proveedores	52
5.2.3	Costos asociados al calor solar	58
5.3	Potencial mercado de Chile	60
5.4	Caso de estudio: Viña Miguel Torres	63
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>Referencias</b>	<b>66</b>

## 1 Resumen Ejecutivo

En este estudio se describen las tecnologías de refrigeración solar. Hay sistemas basados en electricidad fotovoltaica, y otros que utilizan calor de colectores solares para generar "frío", o dicho en un lenguaje más físico: para extraer el calor de un fluido de trabajo.

Después de una breve introducción a los principios físicos, se están describiendo las tecnologías. En los ciclos térmicos el calor se utiliza para evaporar las moléculas de un líquido o de un agente sólido. Existen ciclos cerrados que trabajan normalmente en cámaras de vacío, o ciclos abiertos que trabajan a presión atmosférica con la humedad del aire ambiente. Si la electricidad puede ser utilizada para realizar el trabajo, generalmente el principio compresión-descompresión se utiliza para extraer el calor de una fuente y así refrescarlo. Entre estas tecnologías destacan habitualmente la combinación de paneles fotovoltaicos y un compresor y los ciclos de absorción combinados con colectores térmicos. Es muy conveniente utilizar la energía solar para la refrigeración porque muy a menudo la demanda de enfriamiento y la radiación solar diaria están en paralelo.

Desde el punto de vista económico debido a los bajos costos de los paneles fotovoltaicos en el mercado y la mayor demanda de ingeniería en refrigeración térmica, especialmente para los sistemas de refrigeración de tamaño pequeño a mediano, la combinación de enfriadores de compresión es especialmente competitiva. Sin embargo, para plantas de más de 100 kW existe un gran experiencia con máquinas de enfriamiento térmico. Por lo tanto, en estos casos, un ciclo de absorción accionado térmicamente puede ser una solución económicamente preferible. Maquinas con mas etapas y mayor eficiencia requieren temperaturas de operación más elevadas, pero para Chile con el muy buen recurso solar directo, el uso de colectores con concentracion pueden abrir el camino para tales sistemas de refrigeración solar.

Por tanto, se hace necesario impulsar desde los gobiernos la instalación de estos sistemas, que presentan ventajas más allá de las económicas, como la estabilidad de la red, el ahorro de energía, la reducción de emisiones CO<sub>2</sub>, o evitar usar refrigerantes dañinos con la capa de ozono. Proyectos como el desarrollado en la Viña Miguel Torres ayudan al ser ejemplo a seguir.

El potencial de la refrigeración solar en el mundo en general y en Chile en particular, no está especialmente desarrollado. La demanda de frío industrial en Chile no es tan importante como la demanda de calor. Es especialmente relevante la demanda de frío de la industria de alimentación de la región metropolitana



## 2 Introducción

Las tecnologías que utilizan recursos renovables no convencionales pueden contribuir a los países a suplir sus demandas energéticas, de esta manera asegurar su consumo y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Una de las principales áreas de aplicación de los procesos térmicos es la refrigeración, que es la transferencia de calor de una región de temperatura inferior hacia una superior.

Por convención, el calor fluye en la dirección de las temperaturas decrecientes. Dicho proceso de transferencia de calor ocurre en la naturaleza sin que se requiera energía. La refrigeración es el proceso inverso, que no sucede por sí solo. Por tanto, se entiende por refrigeración la producción de frío a través de un proceso, o conjunto de procesos, que puede producir bajas temperaturas de manera controlada.

La refrigeración es importante debido a su implicación en diversas actividades como: la conservación de productos alimenticios, el mantenimiento de fármacos, el desarrollo adecuado de procesos industriales, el acondicionamiento de hogares, etc.

Existen diversos mecanismos capaces de reducir la temperatura de un fluido o sólido. Estos procesos pueden ser naturales (enfriamiento radiativo, enfriamiento evaporativo y conducción) o artificiales (procesos químicos con disolución de solutos, procesos químicos con transición de cambio de fase y procesos mecánicos con fases de expansión y compresión). Este estudio se centra en los sistemas de generación de frío artificiales y, en particular, en las tecnologías solares para la refrigeración disponibles en el mercado internacional, sus principios de operación, rangos de temperatura de trabajo y aplicaciones. Además se incluye un estudio del mercado nacional e internacional de estas tecnologías con una caracterización de su potencial a nivel nacional.

## 3 Principios de básicos de la refrigeracion

### 3.1 Cambio de fase de un fluido

La refrigeración puede lograrse de varias maneras, pero habitualmente se aprovecha el calor de cambio de fase de un fluido.

Si se añade calor a un líquido a una presión dada, la temperatura aumenta hasta que el líquido se empieza a evaporar. La temperatura a la que esto ocurre se denomina temperatura de saturación y depende de la presión a la que se encuentre el fluido. Mientras se produce la evaporación del líquido no hay aumento de presión ni temperatura y el único cambio en las propiedades del fluido debido al cambio de fase es un aumento en el volumen y densidad. La energía absorbida durante el proceso de evaporación se llama calor latente de evaporación. Por el contrario, el calor que se aplica cuando la sustancia no cambia de fase y aumenta la temperatura, se llama calor sensible.

Las temperaturas y presiones que permanecen constantes durante el cambio de estado se denominan temperaturas y presiones de saturación y están directamente relacionadas. En la Figura 1 se muestra la relación entre la temperatura y la presión de saturación del agua. Cuanto menor es la presión a la que se encuentra el fluido, menor será la temperatura de saturación, y por tanto, menor la temperatura a la que se podrá evaporar.

El agua tiene un calor latente de evaporación de 2257 kJ/kg (a 100°C), que es un valor alto, ya que es necesario proporcionar mucha energía para romper los puentes de hidrogeno que enlazan las moléculas y que se produzca una evaporación. Esta particular característica es especialmente relevante en instalaciones de climatización de gran tamaño, ya que implica que el caudal de refrigerante que necesitamos que circule por el sistema es menor que cuando se utiliza cualquier otro refrigerante.

*Figura 1: Variación de la presión de saturación en función de la temperatura de saturación del agua.*

Se puede aprovechar el calor de cambio de fase (calor latente) de un fluido de varias maneras, como evaporando un fluido y disipando el vapor en el ambiente. Pero habitualmente se evapora un fluido en un circuito cerrado y se condensa utilizando una energía externa para repetir el ciclo. Este ciclo es conocido como el ciclo de refrigeración por compresión.

### **3.2 Ciclo de refrigeración por compresión.**

El ciclo de refrigeración que se utiliza con mayor frecuencia es por compresión de vapor, donde un refrigerante se condensa y se evapora para luego comprimirse en la fase de vapor.

#### **Principio de operación**

El principio de funcionamiento del ciclo ideal de refrigeración por compresión se basa en las variaciones que experimentan las propiedades de estado durante un cambio de fase de líquido a gas. Un sistema de refrigeración por compresión presenta cuatro componentes principales: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador, los cuales se muestran en la Figura 2.

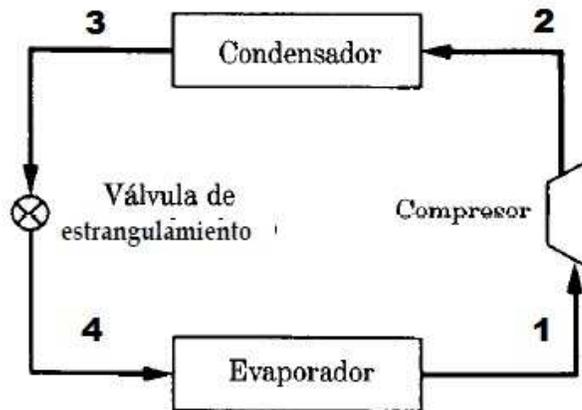


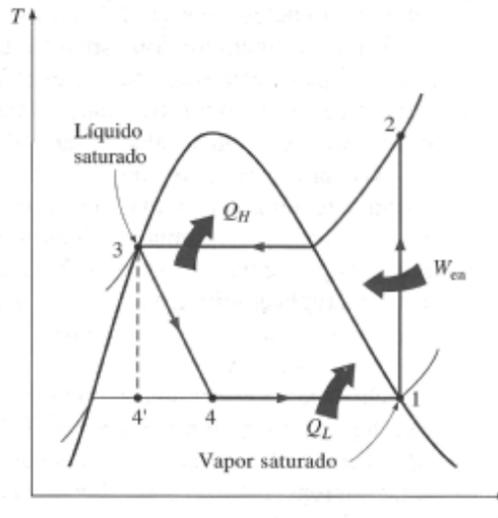
Figura 2: Esquema de representativo de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor

Los procesos que se ocurren en estos elementos se muestran en la Figura 3:

- **1-2 Compresión isotrópica en el compresor:** Se comprime vapor saturado hasta la presión de condensación. Al mismo tiempo, aumenta la temperatura del refrigerante superando la temperatura del condensador.
- **2-3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador:** Entra vapor sobrecalentado en el condensador liberando calor. Al rechazar el calor, el vapor se condensa y el refrigerante sale como líquido saturado a alta presión y temperatura.
- **3-4 Estrangulamiento en una válvula de expansión:** Se expande el líquido saturado hasta la presión de saturación, por lo que el fluido comienza a evaporarse. Al mismo tiempo, la temperatura del refrigerante desciende por debajo de la temperatura del espacio refrigerado.
- **4-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador:** Entra el vapor húmedo de baja calidad y se evapora por completo, absorbiendo el calor del espacio refrigerado.

El ciclo real de refrigeración por compresión de vapor difiere de uno ideal debido a las irreversibilidades que ocurren en varias de las etapas. Estas irreversibilidades son debidas a la fricción del fluido y a la transferencia de calor hacia el entorno, que aumentan la entropía.

Figura 3: Diagrama temperatura y entropía del refrigerante, para el ciclo de refrigeración por compresión de vapor.



### Estado de desarrollo

El ciclo simple de refrigeración por compresión es comúnmente utilizado y adecuado para un gran número de aplicaciones. La simplicidad de este sistema permite que sea económico, fiable y con bajo mantenimiento. Los compresores se pueden clasificar en cuatro tipos, en cuanto a su aplicación:

- Compresores con baja presión de retorno (LBP, Low Back Pressure), asociada a bajas temperaturas de evaporación (sistemas de baja)
- Compresores con media presión de retorno (MBP, Medium Back Pressure), cuyos modelos se aplican en sistemas con temperaturas de evaporación medias.
- Compresores con alta presión de retorno (HBP High Back Pressure), usados para sistemas con una temperatura de evaporación alta.
- Compresores utilizados en equipos de acondicionamiento de aire (AC, air conditioning).

NOMENCLATURA	TEMP. DE EVAPORACIÓN	EJEMPLOS DE APLICACIÓN
LBP	-35°C a -10°C	Refrigeradores domésticos, freezers, islas de congelados
L/MBP	-10°C a -5°C	Mostradores comerciales, exhibidores de bebidas, algunos bebederos, máquinas de hielo, algunas bodegas refrigeradas, vending machines
HBP	-5°C a +15°C	Deshumidificadores, enfriadoras de refrescos, algunos bebederos, algunas bodegas refrigeradas
AC	0°C a +15°C	Acondicionadores de aire

Figura 4: Aplicaciones de refrigeración por compresión de vapor.

## 4 Tecnologías de Refrigeración Solar

### 4.1 Clasificación de tecnologías de refrigeración solar

Básicamente hay dos posibilidades para enfriar o climatizar mediante la energía solar:

- Utilizando captadores solares térmicos (ST) para transformar la radiación solar en calor, que se transforma en enfriamiento a través de un proceso térmico.
- Utilizando paneles fotovoltaicos para transformar la radiación solar en electricidad. Esta impulsa el proceso de enfriamiento, generalmente una máquina de compresión (PV Solar).

La Figura 5 muestra la clasificación de las alternativas de refrigeración en la actualidad. Debido al bajo costo de los módulos fotovoltaicos y a su sencillez en la instalación, los sistemas PV solar son más habituales que los térmicos. Sin embargo, la refrigeración solar térmica ofrece algunas ventajas respecto a la PV solar, entre las que se encuentra el gran número de alternativas tecnológicas que se pueden acoplar a los captadores, entre los que se encuentran sistemas térmicos abiertos (desecantes sólidos o líquidos) o cerrados (ciclos de absorción y adsorción), y sistemas termo-mecánicos (ciclos Rankine o con eyectores). La mayor parte de los sistemas de refrigeración solar térmica existentes en el mercado o como prototipos, se basan en sistemas de absorción y, en segundo lugar, adsorción.

Figura 5: Tipos de tecnología de refrigeración solar (adaptado de [1]).

En comparación con la tecnología convencional de refrigeración por compresión de vapor, la refrigeración solar térmica conlleva una serie de ventajas. En primer lugar, las máquinas generalmente funcionan con refrigerantes ecológicos. La mayoría utiliza agua, que tiene potencial de calentamiento global nulo (GWP, Global Warming Potencial), a diferencia de los refrigerantes utilizados en máquinas de refrigeración por compresión. Sin embargo, los nuevos refrigerantes propuestos tienen cada vez valores más bajos de este parámetro.

Tabla 1: Valores de GWP de refrigerantes típicos

Refrigerante	GWP
R12	10900
R22	1810
R404A	3920
R134A	1430
R290	3
R600A	3
R-1234yf	4

En segundo lugar los sistemas de refrigeración solar térmica requieren energía eléctrica auxiliar únicamente para el funcionamiento de las bombas y la torre de enfriamiento, donde tienen un consumo significativamente menor que los sistemas de refrigeración por compresión de vapor, siempre y cuando estén bien diseñados. De esta manera se consigue reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y aliviar la carga sobre la red de energía eléctrica. En algunos países con altas temperaturas estivales esto sería una ventaja importante, ya que la operación masiva de aparatos de refrigeración eléctrica en el verano a veces lleva a la sobrecarga del sistema eléctrico. Además, durante los meses de invierno, los

sistemas solares térmicos también pueden proporcionar calor para agua caliente sanitaria y calefacción, reduciendo aún más el gasto de energía y las emisiones emitidas.

Finalmente, dado que las maquinas trabajan sin compresor, otra ventaja es que los niveles de ruido son considerablemente más bajos y los requerimientos de mantenimiento son menores.

## 4.2 Indicadores de desempeño

Los indicadores de desempeño con los que se evalúan los sistemas de refrigeración solar son los siguientes [1–3]:

- Fracción solar (Solar Fraction o SF): Es la relación entre la energía térmica entregada por los captadores solares al sistema de enfriamiento y el total de la energía requerida. Existen muchos factores que afectan a la fracción solar, como la carga, el área de captación, el tamaño del almacenamiento y los niveles de irradiación.

$$SF = \frac{Q_{solar}}{Q_{solar} + Q_{aux}} \quad (1)$$

Siendo  $Q_{solar}$  el calor producido por el sistema solar y  $Q_{aux}$  el calor producido por el sistema auxiliar.

- Coeficiente de Funcionamiento (Coefficient of Performance o COP): Es la relación que existe entre el enfriamiento producido y la energía usada por el sistema de enfriamiento. Este valor puede ser mayor que uno.

$$COP = \frac{Q_{cool}}{Q_{solar} + Q_{aux} + E_{input}} \quad (2)$$

Siendo  $Q_{cool}$  el enfriamiento producido y  $E_{input}$  la energía eléctrica total consumida por el sistema.

- Coeficiente de Funcionamiento Solar (Solar Coefficient of Performance o COPsolar): También denominado Relación Térmica del Sistema (System Thermal Ratio o STR). Se calcula en base a la eficiencia del captador y el COP del ciclo de refrigeración. Es la relación entre el enfriamiento producido y el total de la energía de entrada, que incluye tanto la energía incidente en el captador como la energía de sistemas auxiliares.

$$COP_{solar} = \eta_{coll} \cdot COP \quad (3)$$

Siendo  $\eta_{coll}$  la eficiencia del captador.

- Número de Calidad de Proceso (Process Quality Number o PQN): es la efectividad térmica o la relación entre el COP del enfriamiento y el COP para un ciclo Carnot operando en las mismas condiciones.

$$PQN = \frac{COP}{COP_{Carnot}} \quad (4)$$

- Ahorro de energía: se refiere a la energía convencional que no se ha usado gracias a utilizar el proceso solar.

$$E_{saved} = \frac{(E_{conv}/Q_{c,conv}) - (E_{solar}/Q_{c,solar})}{E_{conv}/Q_{c,conv}} \cdot L_{total} \quad (5)$$

Siendo  $E_{conv}$  la energía eléctrica usada por el sistema de refrigeración convencional,  $Q_{c,conv}$  la capacidad de enfriamiento convencional,  $E_{solar}$  la energía eléctrica usada por el sistema de refrigeración solar,  $Q_{c,solar}$  la capacidad de enfriamiento solar y  $L_{total}$  la capacidad total del edificio.

## 4.3 Sistemas térmicos de ciclo cerrado

### 4.3.1 Refrigeración Solar por Absorción.

Los sistemas de refrigeración por absorción son un tipo de ciclo cerrado que se basa en el funcionamiento de un refrigerador eléctrico por compresión de vapor, salvo que la unidad de compresión mecánica se reemplaza por un segundo ciclo, el ciclo de absorción. Se utiliza el término cerrado para indicar que el refrigerante, después de proporcionar la refrigeración, se reutiliza.

#### Principio de operación

El proceso físico básico consiste en dos componentes químicos como mínimo, uno de ellos sirviendo como refrigerante y el otro como absorbente/adsorbente. Este proceso implica la absorción del refrigerante en estado gaseoso por un absorbente que actúa de medio de transporte. Este absorbente líquido tiene gran afinidad con el refrigerante y el proceso de absorción es exotérmico, por lo que se libera energía.

El objetivo de los sistemas de refrigeración por absorción es comprimir un líquido en vez de comprimir un vapor y ahorrar energía, ya que el trabajo para comprimir un flujo estacionario es proporcional a su volumen específico. A cambio, se requiere energía para lograr la des-absorción del refrigerante en el fluido de transporte.

### Ciclo termodinámico

El ciclo termodinámico de un sistema por absorción tiene seis pasos, que se muestran en la Figura 6:

**1-2. Absorción:** El vapor saturado de refrigerante fluye hacia el absorbedor, donde es absorbido por la solución concentrada. Durante este proceso es necesario evacuar el calor durante el proceso de absorción mediante un serpentín de refrigeración.

**2-3. Compresión:** La solución diluida, producida en el absorbedor, es bombeada hacia el generador, el consumo eléctrico de ésta bomba es aproximadamente de un 1%-5% de la potencia de refrigeración total

**3-4 Generación:** La solución diluida es calentada por encima del punto de ebullición mediante un foco caliente utilizando energía solar térmica. En este punto y a una elevada presión, el refrigerante es nuevamente separado de la solución, que es devuelta al absorbedor, ahora concentrada.

En este punto se logra el objetivo de comprimir el refrigerante el cual se va hacia el condensador completando el ciclo de refrigeración convencional, por otro lado el fluido de transporte regenerado cierra el ciclo de absorción.

**4-1. Enfriamiento en un intercambiador de calor:** En este punto se tiene la mezcla débil que hacia el absorbedor a través del intercambiador de calor. Durante este proceso, la concentración de la mezcla permanece constante.

4-5 Rechazo de calor a presión constante en un condensador

**5-6 Estrangulamiento en una válvula de expansión,** donde se efectúa la reducción de presión de la disolución concentrada desde la presión en el generador a la presión del absorbedor.

6-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador

*Figura 6: Diagrama presión de vapor – temperatura de la solución, para el ciclo de refrigeración por absorción (Fuente: IEA).*

### **Componentes del sistema**

La estructura principal de una máquina de absorción es similar al de un refrigerador por compresión mecánica, donde comparten tres elementos el condensador, la válvula de expansión y el evaporador. La principal diferencia está en la unidad de compresión mecánica, que se reemplaza con una unidad de ‘compresión térmica’ con un absorbedor y un generador, representada en el cuadro gris de la Figura 7. El efecto enfriador se basa en la evaporación del refrigerante (por ejemplo, agua) en el evaporador a baja presión.

El absorbedor es el componente más crítico de la máquina, ya que el correcto funcionamiento de esta depende de la capacidad para que el vapor refrigerante procedente del evaporador se absorba. Para ello debe optimizarse conjuntamente la transferencia de masa y de calor, debido a que la capacidad de absorción del absorbente está directamente ligada a la temperatura de absorción.

El recuperador de calor se utiliza para precalentar la disolución antes de acceder al generador aprovechando la mayor temperatura de la disolución concentrada que retorna del generador. El recuperador produce dos efectos beneficiosos: además de acercar la disolución diluida al punto de ebullición que alcanzará en el generador, enfría la disolución concentrada en su retorno al absorbedor.

El generador es el encargado de separar de nuevo refrigerante y absorbente, usando la fuente de calor para ello, en nuestro caso el calor proporcionado por el sistema solar.

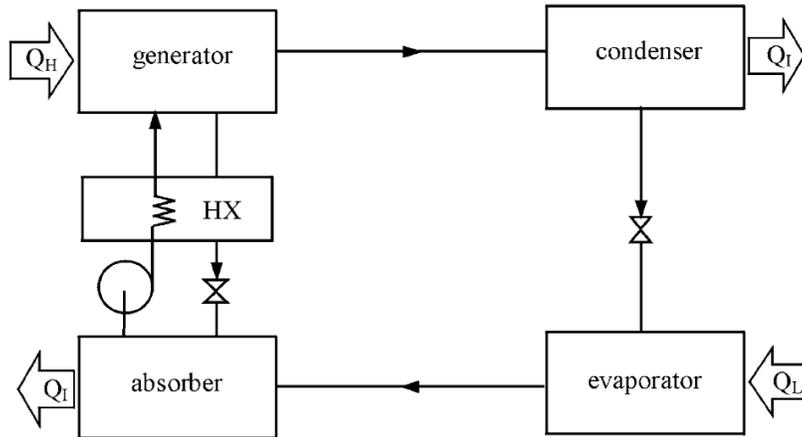


Figura 7: Esquema de un enfriador típico de adsorción de simple efecto con dos cámaras de adsorción, una evaporador y un condensador[4].

### Estado de desarrollo

El primer prototipo de una máquina de absorción (con fluido de trabajo  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ) fue patentado en 1859 por Ferdinand Carre, la cual fue utilizada principalmente para fabricar hielo y almacenar alimentos.

Las máquinas de absorción pueden clasificarse según los pares de sustancias que actúan como refrigerante/absorbente y según el número de efectos. El termino efecto hace referencia al generador de la máquina, por ejemplo un simple efecto tiene 1 generador y un doble efecto tiene 2 generadores.

Respecto a la los fluidos de trabajo utilizados, se presentan los siguientes pares, donde se usa la terminología para identificar la función de los fluidos Refrigerante / Absorbente.

- Agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) / bromuro de litio ( $\text{LiBr}$ )
- Agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) / cloruro de litio ( $\text{LiCl}$ )
- Amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) / agua ( $\text{H}_2\text{O}$ )

El par más usado es el de  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ , aunque también es utilizado el par Amoníaco-Agua en aplicaciones en las que es necesaria una temperatura menor de  $0^\circ\text{C}$ , ya que las temperaturas de refrigeración están limitadas a la temperatura de congelación del refrigerante, y el amoníaco permite llegar a los  $-77^\circ\text{C}$ . Sin embargo el  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  presenta varias ventajas frente al  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ :

- EL  $\text{NH}_3$  por su carácter tóxico necesita utilizar sistemas indirectos.
- El ciclo de  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  tiene un coeficiente de operación mayor que el de  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ .
- No necesita torre de destilación (el LiBr no se evapora en las condiciones de trabajo por su elevado punto de fusión y ebullición).

La principal ventaja de utilizar el par  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  es que no existen problemas de cristalización, las principales desventajas de  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  son la disipación de calor con agua de torres de refrigeración, cristalización, corrosión.

Respecto a los efectos utilizados con los siguientes números se han obtenido buenos resultados:

- Simple efecto
- Doble efecto
- Triple efecto
- Medio efecto

El principal objetivo de los sistemas con más efectos es aumentar la eficiencia del sistema cuando se dispone de una fuente de calor a mayor temperatura. El termino efectos o etapas se debe a que el calor que se rechaza en el efecto de mayor temperatura se usa como fuente de calor en el efecto de menor temperatura. De esta manera se consigue un aumento notable en el coeficiente de operación (COP) respecto a las de simple efecto.

Los sistemas de doble efecto se introdujeron en por primera vez en 1956 [4]. La Figura 8 muestra un sistema de este tipo con LiBr/agua como fluidos de trabajo. El calor a alta temperatura alimenta el primer generador. El vapor de refrigerante generado es condensado a alta presión en el generador de segundo efecto. El calor rechazado se usa para producir vapor adicional de la solución procedente del primer efecto. Este tipo de sistema se considera un sistema de absorción de doble efecto en serie.

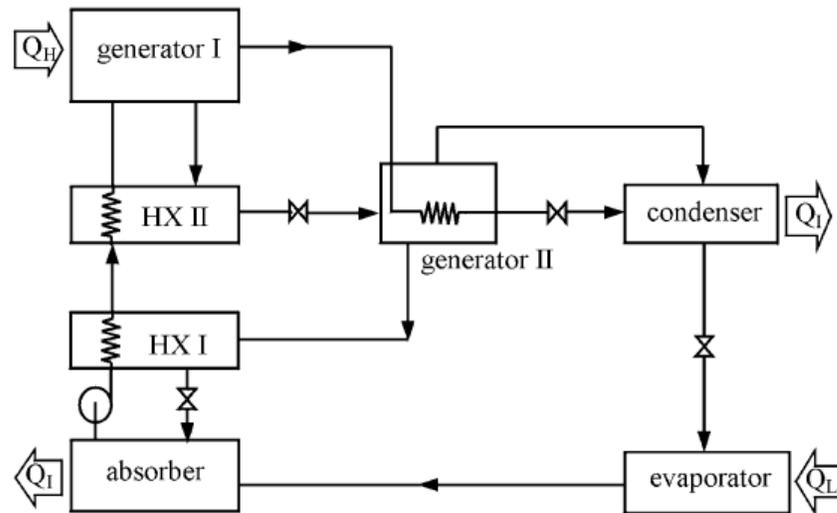


Figura 8: Esquema de absorción de doble efecto en serie [4].

Las máquinas de simple efecto, bajo condiciones normales de trabajo, necesitan un aporte de energía térmica en forma de agua a una temperatura de 80-110 °C. Sin embargo, en las máquinas de doble efecto las temperaturas requeridas son más elevadas, alcanzando los 120-150 °C.

La diferencia de diseño entre las máquinas de absorción de simple y de doble efecto en serie conlleva una diferencia también en su eficiencia (Figura 10). Para las primeras son habituales valores de COP entre 0.6 y 0.7 y mientras que para las segundas se alcanzan valores entre 0.8 y 1.2.

Si en vez de LiBr/agua se utiliza agua/NH<sub>3</sub> como fluido de trabajo, la presión en el primer efecto puede ser mucho más alta. La Figura 9 muestra el esquema de funcionamiento de ese tipo de sistemas, denominados sistemas de absorción de doble efecto de flujo paralelo. A diferencia de los sistemas LiBr/agua, estos sistemas se pueden considerar una combinación de dos ciclos de un efecto. El evaporador y los condensadores de ambos ciclos están integrados como una sola unidad. Por tanto, solo hay dos presiones en el sistema. La fuente de calor externa alimenta solo al generador II, que se opera a altas temperaturas y cuyo calor de rechazo se aprovecha en el generador I.

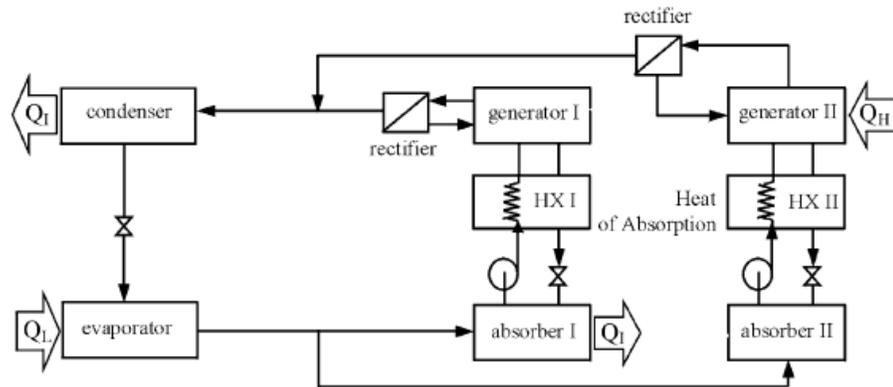


Figura 9: Esquema de absorción de doble efecto en paralelo [4]

En la literatura científica también se han analizado ciclos de triple y cuádruple efecto. Sin embargo, y al contrario que los estudios teóricos (Figura 10) no se ha apreciado un aumento del COP con el aumento del número de efectos, debido a que un mayor número de efectos implica también una mayor complejidad del sistema. Por tanto, solo el ciclo de doble efecto está disponible en el mercado, además del sencillo.

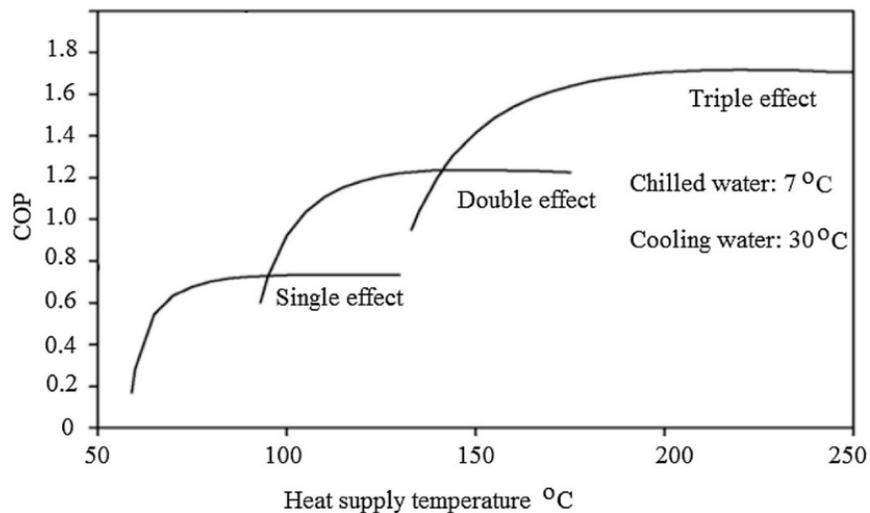


Figura 10: COP de las diferentes máquinas de absorción según el número de efectos y la temperatura de trabajo [5]

Cualquier ciclo de refrigeración por absorción puede ser operado mientras la solución en el absorbedor tenga más concentración de refrigerante que el generador. Cuando la temperatura aumenta o la presión se reduce, la fracción de refrigerante contenida en la solución y viceversa. Cuando la temperatura del generador baja, la velocidad de circulación de la solución aumentará,

provocando que el COP se reduzca. Si la temperatura es demasiado baja, el sistema no puede operar.

Las máquinas de absorción de medio efecto fueron introducidas para aprovechar fuentes de calor con temperaturas relativamente bajas. La Figura 11 presenta un esquema del ciclo de refrigeración de medio efecto. La configuración del sistema es igual que el de doble efecto usando agua/ $\text{NH}_3$  (Figura 9), pero las direcciones de los flujos de calor son diferentes. La fuente de calor alimenta ambos generadores y ambos absorbedores rechazan calor al medio. El absorbedor II y el generador I se operan a una presión intermedia. De esta manera, la circulación entre el generador I y el absorbedor I y entre el generador II y el absorbedor II se puede mantener a niveles aceptables. El COP de estos sistemas es más bajo que el de las máquinas de simple efecto, pero su ventaja es que puede operarse a temperaturas más bajas.

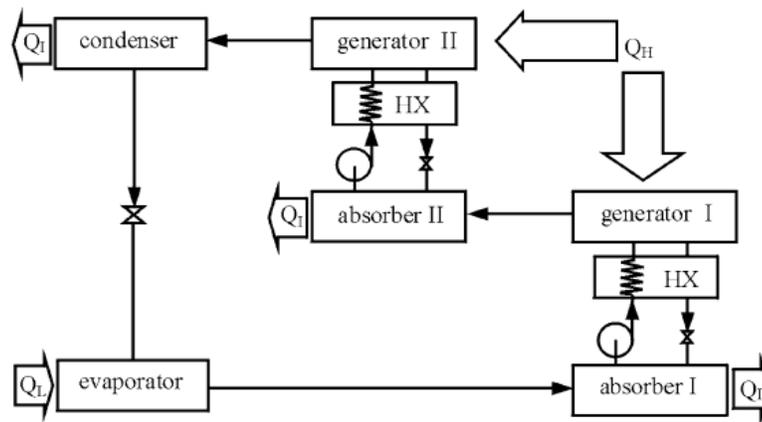


Figura 11: Ciclo de medio efecto [5]

Como resumen de los sistemas de absorción, en la Tabla 2 se detallan las tecnologías de ciclos de absorción más importantes que desarrolladas hasta el momento. En esta tabla se detallan las temperaturas de frío que el sistema suministra y las temperaturas de calor que el sistema necesita para operar, además del fluido de trabajo, su capacidad y el COP que es el rendimiento de una máquina térmica.

Sistema	Temperaturas (°C)		Fluido de trabajo	Capacidad (kW)	COP
	Caliente	Frío			
Simple efecto	80-110	5-10	$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$	10-100	0.5-0.7
Simple efecto	120-150	<0	$\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$	3-25	0.5

Doble efecto flujo en serie	120-150	5-10	H <sub>2</sub> O/LiBr	>1000	0.8-1.2
Doble efecto flujo en paralelo		<0	NH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O		
Triple efecto	200-230	5-10	H <sub>2</sub> O/LiBr	N/A	1.4-1.5
Medio efecto	Baja	<0	NH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O	N/A	0.2-0.3

Tabla 2: Tecnologías de refrigeración solar por absorción. (adaptado de [4])

### Aplicaciones

La aplicación de los sistemas cerrados dependerá principalmente de los fluidos de trabajo que se utilicen. Al utilizar agua como fluido refrigerante la temperatura de trabajo está limitada por el punto de congelamiento del agua (0 °C). Para trabajar a menores temperaturas se usa amoníaco, ya que tiene un punto de congelamiento más bajo. En la Figura 12 se muestran las distintas aplicaciones de esta tecnología. Las temperaturas de trabajo de estas aplicaciones fluctúan entre los -20 y 20°C. La capacidad de refrigeración disponible de estas tecnologías cubre un amplio rango de trabajo, desde unos pocos kW hasta los 1000 kW de potencia.

Figura 12: Aplicaciones sistemas de Absorción.

(Fuente: Fraunhofer Chile)

### 4.3.2 Refrigeración Solar por Adsorción.

Los sistemas de adsorción son relativamente similares a los sistemas de absorción, ya que son ciclos térmicos y cerrados. La principal diferencia es que el sorbente es un sólido y no un líquido, normalmente un sustrato sólido altamente poroso. Esto tiene consecuencias importantes en el ciclo, ya que un sólido no puede ser bombeado y lo que funciona mediante procesos por lotes.

Los sorbentes son materiales altamente porosos con grandes superficies internas, del orden de los cientos de  $\text{m}^2/\text{g}$  [6]. Los sistemas disponibles en el mercado utilizan agua como refrigerante y gel de sílice como adsorbente, pero existen líneas de I+D enfocadas al uso de zeolitas como material de adsorción o la utilización metanol/carbón activo como refrigerante/adsorbente.

### Principio de operación

Los sistemas de adsorción cuentan con dos fases: primero una etapa de refrigeración/adsorción seguida a continuación de una etapa de regeneración/desorción. Estos cuatro procesos tienen lugar en cuatro componentes del sistema: evaporador, adsorbedor, condensador y desorbedor (Figura 13).

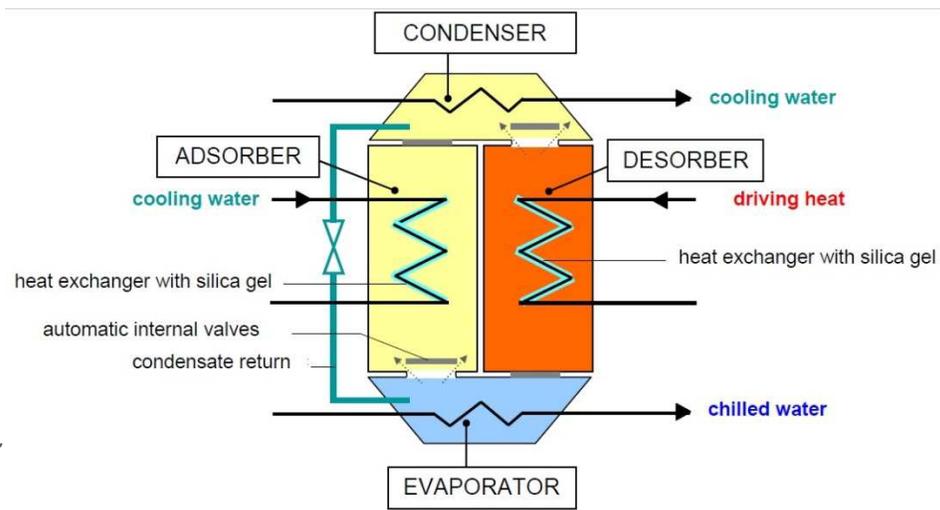


Figura 13: Esquema de un enfriador típico de adsorción con dos cámaras de adsorción, una evaporador y un condensador [7].

El refrigerante es evaporado en el evaporador o generador y absorbido por una sustancia sólida con alta capacidad microscópica. En esta etapa las moléculas del refrigerante se unen a la superficie del adsorbente por las fuerzas de van der Waals. En el proceso de regeneración el adsorbedor se calienta. Este aumento de la temperatura implica un aumento de la presión sin necesidad de compresión mecánica, y por tanto, el refrigerante se separa del adsorbedor.

### Ciclos termodinámicos

El ciclo de adsorción ideal se lleva a cabo a través de cuatro procesos representados en la Figura 14, en un diagrama  $\ln(P)$  vs.  $1/T$ , en el que se muestran las líneas en las que la carga de adsorbente es igual.

**1. Calentamiento a concentración constante:** En este proceso el adsorbente saturado se aísla del resto de la instalación y se calienta con la fuente de aporte solar. Por el aporte energético se produce una desorción del gas en el volumen libre del adsorbedor, lo que se traduce en un aumento de presión. Este proceso finaliza cuando se alcanza a lo menos la presión del condensador. La carga de adsorbente se mantiene estable.

**2. Desorción Isobárica:** Se conecta el adsorbedor con el condensador a una misma presión constante ( $P_{\text{cond}}$ ) y se calienta hasta que se alcanza la temperatura máxima proporcionada por la fuente de calor. La carga de adsorbente cambia desde su valor máximo ( $x_{\text{max}}$ ) al valor mínimo ( $x_{\text{min}}$ ). Este proceso es llamado generalmente regeneración, ya que el adsorbedor queda listo para una nueva absorción de refrigerante. En esta etapa se consume el calor de desorción ( $Q_{\text{des}}$ ). Al mismo tiempo, el refrigerante liberado se condensa en el condensador, liberando la energía de condensación a la temperatura de condensación ( $T_{\text{cond}}$ ).

**3. Refrigeración a concentración constante:** El adsorbedor se aísla del resto de la instalación y se enfría con el intercambiador de calor. Debido a que este proceso es aislado se produce una disminución de presión hasta la presión del evaporador. La carga del adsorbente se mantiene estable en  $x_{\text{min}}$ .

**4. Adsorción Isobárica:** El adsorbente adsorbe el refrigerante, en forma de vapor producido por el evaporador, a la presión de este ( $P_{\text{evap}}$ ). En esta etapa la carga aumenta desde el valor mínimo ( $x_{\text{min}}$ ) al máximo ( $x_{\text{max}}$ ). Este proceso termina cuando la temperatura del adsorbente alcanza la temperatura del condensador y se cierra el ciclo. La evaporación del refrigerante en el evaporador es la causa del efecto refrigerador.

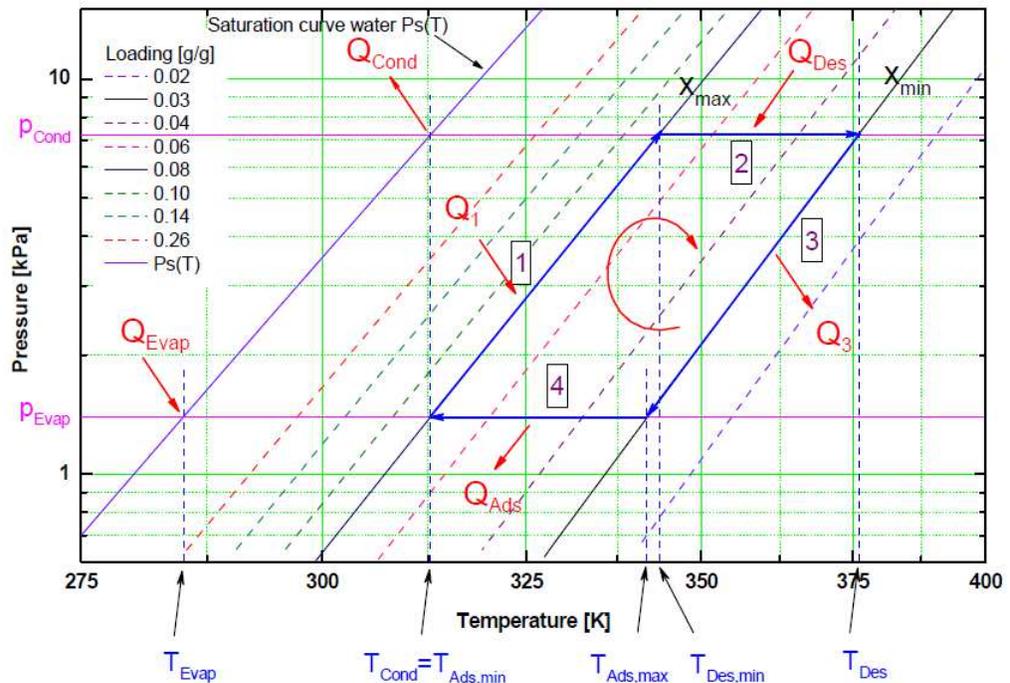


Figura 14: El ciclo de adsorción en el diagrama de la adsorción de gel de sílice / agua [7].

Normalmente, un sistema de adsorción consiste en un generador-receptor, que es un recipiente presurizado con cuatro cámaras, de manera que el ciclo funciona en cuatro fases (Figura 15).

- Fase 1: el reactor izquierda se regenera, el reactor de la derecha está en la fase de adsorción.
- Fase 2: el calor de la izquierda, adsorbente caliente se utiliza para precalentar el adsorbente frío en el lado derecho
- Fase 3: es similar a la fase 1 con adsorbentes intercambiados.
- Fase 4: similar a la fase 2 con adsorbentes intercambiados.

El generador-receptor está conectado con el evaporador y el condensador mediante válvulas de clapeta, dependiendo de la apertura de estas válvulas, las cámaras intermedias van alternando su función de generador y receptor cíclicamente.

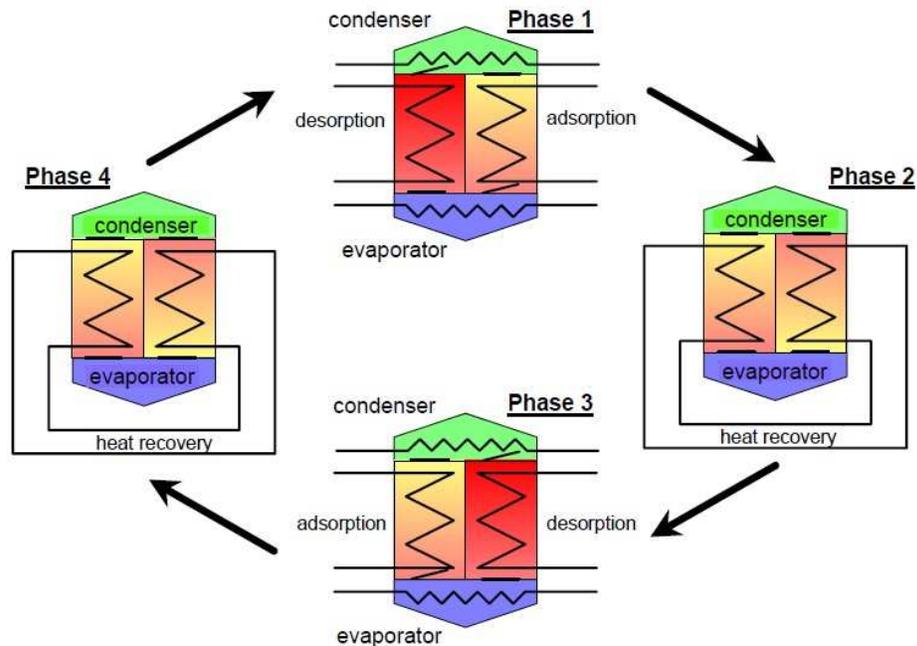


Figura 15: Esquema del ciclo de un enfriador típico de adsorción con dos cámaras de adsorción [7].

### Estado de desarrollo

Los valores habituales del COP de enfriadoras de adsorción se encuentran entre 0.5-0.6. Las principales ventajas de las máquinas de adsorción respecto de las de absorción son:

- Temperaturas del generador que pueden ser más bajas: de 60 a 90°C
- No existe ningún límite inferior en la temperatura del agua de refrigeración ya que no hay peligro de cristalización.
- El COP de la máquina de adsorción no es tan dependiente de la temperatura del agua del generador o del agua de refrigeración, comparándolo con las máquinas de absorción.
- Habitualmente no se requiere bombeo y el funcionamiento es, relativamente, libre de ruidos.

Entre sus desventajas se encuentran: su volumen y peso comparativamente alto y su, actualmente, elevado precio, debido al escaso volumen de producción de este tipo de máquinas.

El desarrollo más importante relativo a las máquinas de absorción, al igual que las de adsorción, es la experimentación con distintos pares de trabajo. Esto ha

llevado a la búsqueda de nuevos ciclos de refrigeración de adsorción, diseñados con el fin de mejorar la máquina de adsorción.

Los sistemas que utilizan agua como refrigerante y gel de sílice como adsorbente son los más habituales en el mercado. Su baja temperatura de regeneración lo convierte en la alternativa más adecuada para acolarlo a captadores solares planos con temperaturas de trabajo sobre los 85 °C. Sin embargo, tiene una capacidad limitada de adsorción y requiere condiciones de trabajo de vacío.

Otros materiales utilizados son las zeolitas como material de adsorción, o el par metanol/ carbón activado, que ofrece la posibilidad de refrigeración por debajo de 0 °C. En la Tabla 3 se resumen las alternativas de pares de trabajo y sus características de trabajo.

Adsorbente	Refrigerante	Calor de Adsorción (kJ/kg)	Densidad del refrigerante (kg/m <sup>3</sup> )	Consideraciones
Aluminio activado	H <sub>2</sub> O	3000	1000	Baja presión de operación
Zeolita	H <sub>2</sub> O	3300-4200	1000	La zeolita natural tiene valores más bajos que la sintética
	NH <sub>3</sub>	4000-6000	681	
	CH <sub>3</sub> OH	2300-2600	791	
Gel de sílice	CH <sub>3</sub> OH	1000-1500	791	Para temperaturas menores de 200 °C
	H <sub>2</sub> O	2800	1000	Uso en enfriamiento desecante
Cloruro de calcio	CH <sub>3</sub> OH	1800-2000	791	Enfriamiento
Hidratos de metal	Hidrógeno	2300-2600	1000	Aire acondicionado
Compuestos complejos	NH <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	2000-2700	681	Refrigeración

Tabla 3: Tecnologías de refrigeración solar por adsorción [8].

El proceso físico de la adsorción puede ser sustituido en algunos casos por reacciones químicas. Esta adsorción química está caracterizada por un enlace químico fuerte entre el refrigerante y el adsorbente, por lo que la recuperación de este es más difícil y requiere más energía. El adsorbente químico más utilizado es el cloruro de calcio (CaCl<sub>2</sub>), aunque también se están considerando compuesto complejos o hidratos de metal.

También se han investigado variaciones de los ciclos para mejorar la eficiencia de los sistemas. Algunas de las alternativas estudiadas son:

- **Ciclo Con Recuperación De Calor:** este es el ciclo incluye dos adsorbedores y un recuperador de calor, el cual es muy simple y fiable. El calor de recuperación puede mejorar el rendimiento (COP) en un 25%.
- **Ciclo Con Recuperación De Masa:** En este caso, después de la conexión entre procesos de adsorción y desorción, y antes de la recuperación de calor, se produce la conexión entre el adsorbedor de alta presión y el de baja presión mediante una tubería, la presión es diferente en el adsorbedor y en el desorbedor, la máquina utiliza esta diferencia para producir la recirculación de masa.
- **Ciclo Convectivo De Onda Térmica:** En este proceso en lugar de calentar directamente el lecho de adsorción como en el ciclo de onda térmica, dos camas inertes empaquetadas con partículas no reactivas tales como bola de acero se utilizan para iniciar la calefacción o la refrigeración del fluido térmico. Las ventajas de este sistema son que estos son baratos en comparación con el costo de un intercambiador convencional y poseen altos valores de la eficiencia (COP).
- **Ciclo De Múltiple Efecto Y Maquinas De Múltiple Etapa:** Como en el caso de máquinas de absorción, el número de etapas de sistema define el número de ciclos básicos de adsorción que configuran el sistema. Por otro lado, el número de efectos considera cuántas veces la potencia calorífica suministrada desde el foco caliente es utilizada en el sistema. Evidentemente, un incremento en el número de efectos conduce a una mayor eficiencia de la planta. Sin embargo, para un ciclo con "n" etapas, el número máximo de efectos posibles viene dado por " $2n-1$ ".
- **Ciclos Híbridos:** Los ciclos híbridos son la combinación de ciclos de compresión y adsorción. El objetivo de los ciclos híbridos es parcializar el proceso de compresión en dos partes, la primera mediante un compresor mecánico convencional, y la segunda etapa mediante el compresor térmico asociado a una máquina de adsorción.

### **Aplicaciones industriales**

La aplicación de los sistemas cerrados de adsorción para refrigeración es más acotada que los de absorción, ya que actualmente sólo se trabaja con agua como fluido de trabajo, y ésta limita la temperatura mínima de trabajo debido al punto de congelamiento del agua (0 °C). Tal y como muestra la Figura 16 las temperaturas de trabajo fluctúan entre los 6 y 20 °C. La potencia de

refrigeración disponible de estas tecnologías, está dentro de un rango que cubre desde los 13 hasta los 90 kW. Sin embargo, la empresa japonesa Mayekawa produce equipos hasta los 400 kW de potencia.

*Figura 16: Aplicaciones de sistemas de Absorción disponibles. (Fuente: Fraunhofer Chile)*

## 4.4 Sistemas térmicos de ciclo abierto

### 4.4.1 Refrigeración Solar por Desecantes Sólido

La refrigeración por desecantes sólidos se basa en el enfriamiento evaporativo de un aire húmedo previamente deshumidificado a través una sustancia desecante sólida. Se utiliza el término abierto para indicar que el refrigerante, después de proporcionar la refrigeración no se recupera.

#### **Principio de operación**

El enfriamiento evaporativo es la base de este tipo de refrigeración. Es un fenómeno natural que se origina cuando se ponen en contacto agua y aire. Cuando esto sucede, se produce un descenso en la temperatura del aire al producirse la evaporación del agua. Este descenso de temperatura es utilizado para la refrigeración.

Sin embargo el enfriamiento evaporativo tiene inconvenientes en climas húmedos donde la temperatura de bulbo húmedo excede frecuentemente la temperatura de 25 °C debido al contenido de vapor de agua en el aire, por lo que la eficiencia de los enfriadores evaporativos disminuye. Para aumentar la eficiencia del proceso, es conveniente deshumidificar el aire antes del enfriamiento evaporativo.

#### **Ciclo termodinámico**

El ciclo base de este tipo de tecnologías es el ciclo ventilado o ciclo Pennington. Sus componentes principales son la rueda desecante, el recuperador sensible, el enfriador evaporativo y el calentador. En la Figura 17 se muestra un esquema de un sistema de refrigeración por desecante solido (rueda desecante) que funciona con energía solar.

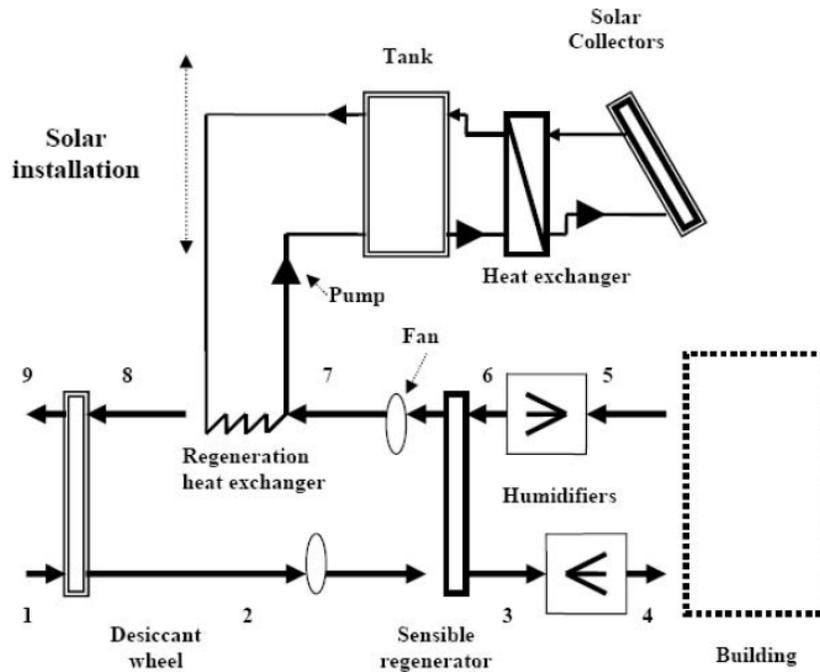


Figura 17: Esquema de un sistema abierto de climatización solar mediante rueda desecante.

El ciclo de refrigeración se lleva a cabo a través de los siguientes pasos, representados tanto en la Figura 17 (esquema del sistema) como en la Figura 18 (diagrama psicométrico):

**1→2. Deshumidificación (punto 1):** Este proceso se produce en la rueda desecante y su objetivo es extraer la humedad del aire ambiente de procesamiento, para así optimizar el proceso de enfriamiento evaporativo. El aire a condiciones ambientales de temperatura y humedad entra en la rueda desecante, donde parte de la humedad es extraída por la sustancia desecante, consiguiendo un aire con menor humedad (punto 2), pero también con mayor temperatura, lo cual es un efecto indeseado de la desecación.

Mientras, el desecante gana humedad y se satura. Al mismo tiempo, el aire de regeneración caliente se hace pasar por la zona delimitada para ello, regenerando el desecante.

**2→3. Enfriamiento Sensible:** A continuación, el aire seco se hace circular por un intercambiador de calor donde se enfría sensiblemente (punto 3). Este intercambiador se denomina regenerador sensible (sensible regenerator en la Figura 17), ya que en él se aprovecha la temperatura del aire que va a ser expulsado para preenfriar el aire de entrada al enfriador evaporativo. Suele ser rotacional y el interior del tambor se encuentra constituido por material de relleno permeable al aire, con gran superficie de contacto y resistente a la abrasión.

**3→4. Enfriamiento Evaporativo:** el aire seco y preenfriado se hace pasar por el enfriador evaporativo, en el que se enfría y humedece para alcanzar las condiciones de humedad y temperaturas requeridas (punto 4).

**4→5 Refrigeración Útil:** En el proceso de refrigeración, el aire se calienta en la habitación, y sale de ella en las condiciones del punto 5.

**5→6. Enfriamiento Evaporativo:** El aire se hace pasar de nuevo por un enfriador evaporativo, enfriando el aire (punto 6).

**6→7. Calentamiento Sensible:** El aire frío entra en el regenerador sensible, donde el calor se trasladara desde la corriente de aire caliente de entrada (aire de 2→3) a la corriente de aire fría. Debido a este intercambio de calor con el aire de entrada, el aire de salida aumentará su temperatura (punto 7).

**7→8. Calentamiento Sensible:** El aire de salida se hace pasar por el calentador para llevarlo a las condiciones óptimas (calor y humedad) para realizar el proceso de regeneración del desecante, que variarán dependiendo de la sustancia desecante.

**8-9. Humidificación:** El aire caliente y seco pasa por la rueda desecante regenerando el desecante, por lo que sale al ambiente con más humedad (punto 9).

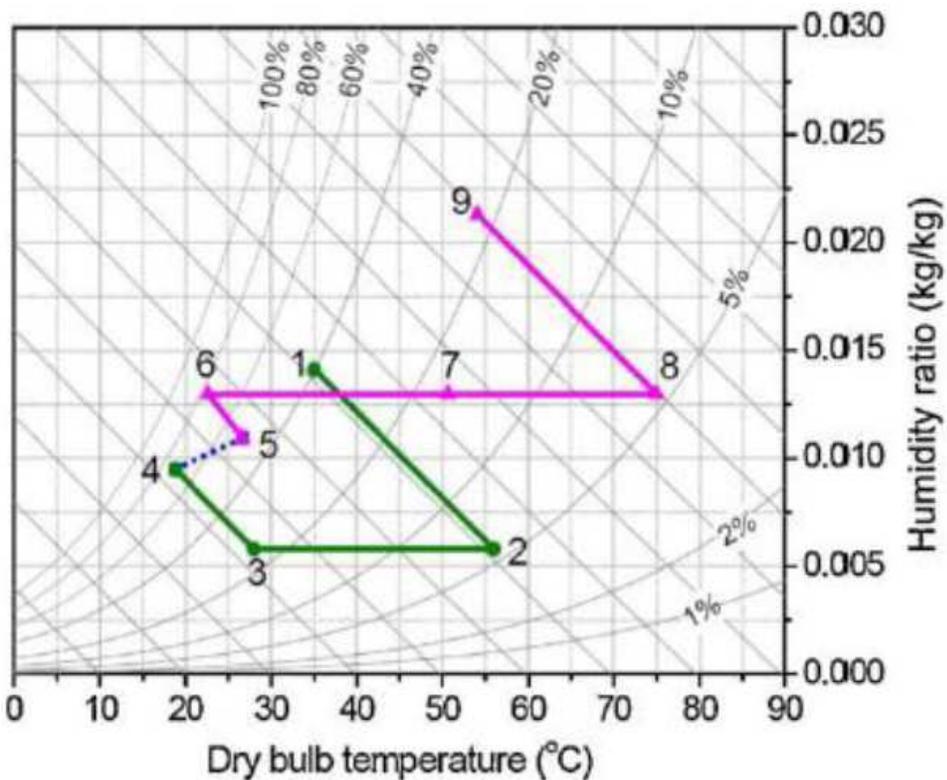


Figura 18: Diagrama psicrométrico de en ciclo de refrigeración por desecante.

### Estado de desarrollo

Los desarrollos más novedosos de los sistemas de refrigeración por desecantes sólidos se han llevado a cabo en dos de sus procesos: la etapa de deshumidificación y de enfriamiento evaporativo.

Existen tres posibles tecnologías para la etapa de deshumidificación: torre empacada adsorbente, cama rotatoria adsorbente y rueda desecante. Los sistemas de ruedas desecantes, son los habitualmente utilizados, debido al menor tamaño de sus equipos y por permitir trabajar en régimen continuo.

También se ha experimentado con distintos materiales de desecantes. Los desecantes, que son la parte fundamental de estos sistemas, son sustancias que tienen una gran afinidad por el agua y adsorben el vapor de agua del aire del ambiente.

A la hora de escoger un determinado material desecante hay que tener en cuenta muchas variables, ya que la eficiencia de deshumidificación de estos varía con temperatura del aire de regeneración, el aire de procesamiento, y la humedad. Deben ser químicamente inertes, tener gran superficie de adsorción, ser térmicamente estables, ser fácilmente regenerados y físicamente durables. Los desecantes más destacables son:

- **Gel de Sílice:** El gel de sílice ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) es el compuesto más comúnmente usado como material desecante, debido a su bajo coste y a su baja temperatura de regeneración. Este material puede tener un área superficial de  $650 \text{ m}^2/\text{g}$ . Muchos materiales compuestos basados en el gel de sílice están siendo desarrollados, y han demostrado que tienen mejores propiedades que el gel de sílice puro, es el caso de compuestos de gel de sílice impregnados con una solución saturada de LiCl, que han demostrado tener una capacidad de absorción 2-3 veces superior que el gel de sílice puro.
- **Alúmina activa:** Este compuesto se consigue a partir de Hidróxido de Aluminio mediante deshidroxilación para producir alto nivel de porosidad. Este material puede tener un área superficial de entre  $150\text{-}500 \text{ m}^2/\text{g}$ .
- **Zeolita sintética:** Este compuesto puede adsorber la humedad fuertemente, y es usado tanto en aplicaciones de deshumidificación como de aire acondicionado. Este material suele tener capacidades de adsorción menores al gel de sílice y la alúmina, por lo que solo se suele usar en aquellos lugares donde está disponible a bajo costo.
- **Carbón activado:** El carbón activado es otra de las sustancias ampliamente usadas como desecante sólido debido a su alto volumen

de poros y gran área superficial. Según reflejan algunos estudios, en determinadas condiciones el carbón activado puede tener 2-3 veces más capacidad de adsorción del vapor de agua que el gel de sílice.

Los evaporadores existentes en el mercado se pueden clasificar en tres tipos:

- Directos: Los enfriadores directos se clasifican a su vez en cuatro tipos: de paneles evaporativos, de medio rígido, rotativos y de pulverización directa. Estos últimos tienen una eficiencia muy elevada, pero también requieren un mantenimiento preciso, ya que tienen más el riesgo de contaminación por bacterias como la legionella.
- Indirectos: Este tipo de enfriador se utiliza especialmente en aquellas aplicaciones donde no se quiere aumentar el contenido de humedad en el aire de procesamiento. Además se evitan los riesgos de contaminación del aire de procesamiento, ya que no se realiza la pulverización sobre esta corriente, aunque si habrá que tratar la corriente secundaria para evitar la contaminación con bacterias. Pueden ser con intercambiador tubular, o de placas.
- Mixtos: Este tipo de sistemas no es más que una combinación de los dos casos anteriores.

### Aplicaciones

La aplicación de estos sistemas son principalmente para aire acondicionado donde las temperaturas no bajan los 15 °C, una de las características del acondicionamiento de aire con desecantes y refrigeración evaporativa, es que se ejerce un buen control tanto de la temperatura del local a acondicionar, como de la humedad, factor que los tradicionales sistemas de acondicionamiento de aire no suelen tener en cuenta, pudiendo llegar a crear en ciertas ocasiones condiciones de incomodidad. Respecto a la capacidad de trabajo típicamente se encuentran sistemas entre el rango de 20 a 350 kW de potencia, con caudales de aire frío que superan los 5000 m<sup>3</sup>/h.

*Figura 19:  
Aplicaciones de  
sistemas por  
desecante sólido  
disponibles. (Fuente:  
Fraunhofer Chile)*

#### 4.4.2 Refrigeración Solar por Desecantes Líquido

Los sistemas por desecantes líquido son muy similares a los por desecantes sólido, la principal diferencia es el estado del desecante. Estos sistemas tienen

un ciclo abierto en el enfriamiento del refrigerante, pero un ciclo cerrado para su deshumidificación, utilizando un sistema de absorción.

### **Principio de operación**

Al igual que el sistema por desecante sólido, estos sistemas utilizan el fenómeno de enfriamiento evaporativo para refrigerar, con la diferencia que para deshumidificar el aire de trabajo se utiliza un sistema de absorción cerrado. La tecnología de refrigeración por desecantes líquidos presenta una serie de ventajas con respecto a la de sólidos, ya que tiene menos pérdidas de presión, menores temperaturas de regeneración (entre 50 y 80 °C), y tiene la capacidad de eliminar las partículas contaminantes. Sin embargo, también presentan problemas de corrosión y son equipos voluminosos y caros, por lo que son menos usados que los de desecantes sólidos.

### **Funcionamiento**

En este tipo de sistemas, el líquido desecante circula entre el absorbedor y el regenerador de la misma manera que en un sistema por absorción. La principal diferencia es que la temperatura de equilibrio de un líquido desecante está determinada no por la presión total sino por la presión parcial del agua en el aire húmedo con la que está en contacto.

En la Figura 20 se muestra un sistema típico de desecante líquido acoplado a un sistema solar. En el deshumificador de esta figura, la solución concentrada se esparce en forma de spray (punto A) sobre el intercambiador de refrigeración (punto B) mientras que se está introduciendo aire del ambiente (punto 1). La solución absorbe humedad del aire y, al mismo tiempo, se enfría por el intercambiador de refrigeración. El resultado de este proceso es el aire frío y seco (punto 2) y la solución diluida (punto C).

En el regenerador, la solución diluida se esparce en forma de spray (punto D) sobre el intercambiador de calor (punto E), que está conectado a un captador solar, y aire en condiciones ambientales se impulsa a través de estos. El resultado es la solución concentrada (punto F) y aire caliente y húmedo rechazado (punto 5).

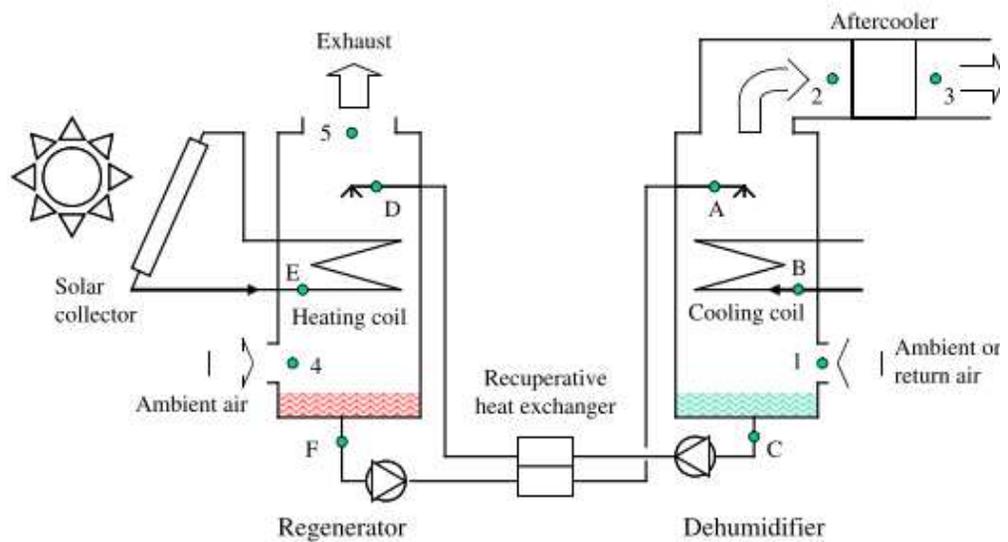


Figura 20: Esquema ejemplar de un sistema abierto de climatización mediante desecante líquido [9].

### Estado de desarrollo

La mayoría de los sistemas por desecación líquida se encuentran en fase de investigación. Los aspectos en los que se están desarrollando más investigaciones son los tipos de desecante líquidos utilizados y la hibridación de estos sistemas.

Los desecantes líquidos más comunes son el cloruro de calcio, el cloruro de litio, el bromuro de litio y el trietilenglicol. También se han utilizado algunas mezclas de estos componentes, ya sea entre ellos mismos o con otros compuestos.

### Aplicaciones

Los sistemas de refrigeración por líquido desecante se pueden utilizar para el acondicionamiento de aire que requiere la eliminación de partículas contaminantes. Se identifican tres tipos de industrias principales:

- Oficinas, edificios residenciales y públicos
- Almacenes y bodegas de producción con fines de archivo y conservación
- Procesos de producción por ejemplo, en la producción de alimentos, la producción farmacéutica, la producción de semiconductores, industria del caucho, productos de confitería.

Figura 21:  
Aplicaciones de  
sistemas por  
desecante  
disponibles. (Fuente:  
Fraunhofer Chile)

## 4.5 Sistemas termo-mecánicos

En los sistemas termo-mecánicos de refrigeración solar el calor recogido por el captador solar se transforma en energía mecánica que luego se usa para comprimir un fluido de trabajo bien directamente en un ciclo de compresión (ciclo de compresión con eyector) o bien indirectamente (mediante el acople con un ciclo Rankine orgánico).

Tradicionalmente, los sistemas termo-mecánicos de refrigeración solar no han recibido tanta atención como los sistemas de sorción. Sin embargo, presentan una serie de ventajas respecto a estos: habilidad de producir electricidad a bajas temperaturas ( $<0^{\circ}\text{C}$ ) usando el fluido de trabajo adecuado, habilidad de producir electricidad cuando no es necesaria la refrigeración acoplado el motor principal a un generador eléctrico, manteniendo buenas eficiencias en condiciones fuera de diseño y posibilidad de uso de un amplio rango de temperaturas como fuente de calor.

### 4.5.1 Refrigeración Solar por Compresión -Ciclo Rankine

Los sistemas de refrigeración por compresión-Rankine son sistemas de refrigeración termo-mecánico y, son sistemas que refrigeran por compresión, donde el compresor es acoplado a la turbina de un ciclo Rankine.

#### Principio de operación

El ciclo Rankine es un ciclo termodinámico que opera con vapor y que generalmente se utiliza en centrales termoeléctricas. Este ciclo consiste en calentar agua hasta evaporarla y elevar la presión del vapor. Este vapor se hace incidir sobre los álabes de una turbina, donde pierde presión produciendo energía cinética que permite la rotación de un eje. Luego, el vapor se licúa en un condensador, para posteriormente introducirlo en una bomba que lo comprimirá para volver a comenzar el ciclo con el calentamiento del agua.

Generalmente para evaporar el agua se utiliza una caldera, pero es posible utilizar captadores solares y utilizar la rotación del eje de la turbina para comprimir vapor, que utilizándolo en un ciclo de refrigeración convencional.

## Funcionamiento

En este sistema de refrigeración se unen dos procesos termodinámicos, el ciclo de refrigeración y el ciclo Rankine. Estos dos ciclos interactúan en la turbina y en el compresor, tal y como se puede observar en la Figura 22: en rosa el ciclo Rankine, en azul el ciclo de refrigeración.

Los componentes de estos sistemas son los de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor: un condensador, una válvula de expansión, evaporador y un compresor. Además estos sistemas tienen los elementos relacionados con el ciclo Rankine: la bomba, el condensador, el generador de vapor (caldera o captadores solares) y la turbina de vapor.

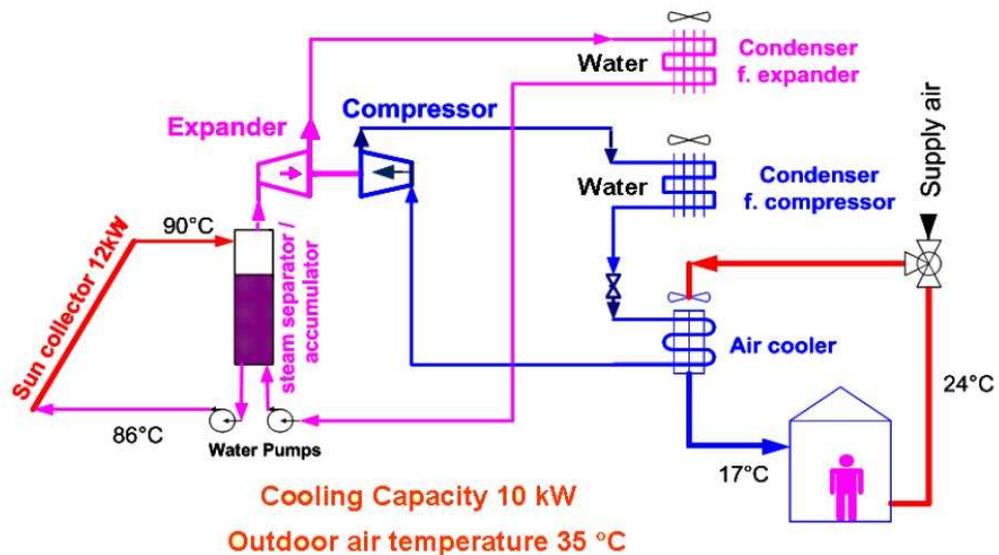


Figura 22: Esquema de un sistema de refrigeración mediante compresión-ciclo Rankine. (Fuente EIA)

La Figura 23 muestra los cambios de estado de ambos ciclos en un diagrama P-h en cada uno de los pasos, tanto del ciclo Rankine como el de refrigeración. Los pasos que identifican en el ciclo Rankine son:

**1→2 Compresión en la bomba:** se comprime el agua en estado líquido previamente condensada en el condensador, hasta la presión del generador de vapor.

**2→3 Calentamiento en el generador de vapor:** En esta etapa el agua pasa por tres etapas, siempre a presión constante. Primero se eleva la temperatura hasta que alcanza la temperatura de evaporación. Después se produce el cambio de estado de líquido a vapor a temperatura y presión constantes. A

continuación se sobrecalienta el vapor, elevando su temperatura por encima de la temperatura de evaporación.

**3→4 Expansión en la turbina:** El vapor sobrecalentado entra a la turbina donde se expande y produce trabajo al girar el eje. Este eje está acoplado al compresor del sistema de refrigeración por compresión de vapor estudiado en la sección

**4→1 Rechazo de calor en el condensador:** El vapor expandido se condensa a presión constante en un intercambiador de calor.

Si el proceso de generación de vapor se produce mediante tecnologías solares de baja temperatura (menos de 250°C), no es conveniente usar agua como fluido de trabajo de ciclo Rankine, por lo que se propone el uso de fluidos orgánicos. La tecnología entonces pasa a denominarse ciclo Rankine orgánico (CRO).

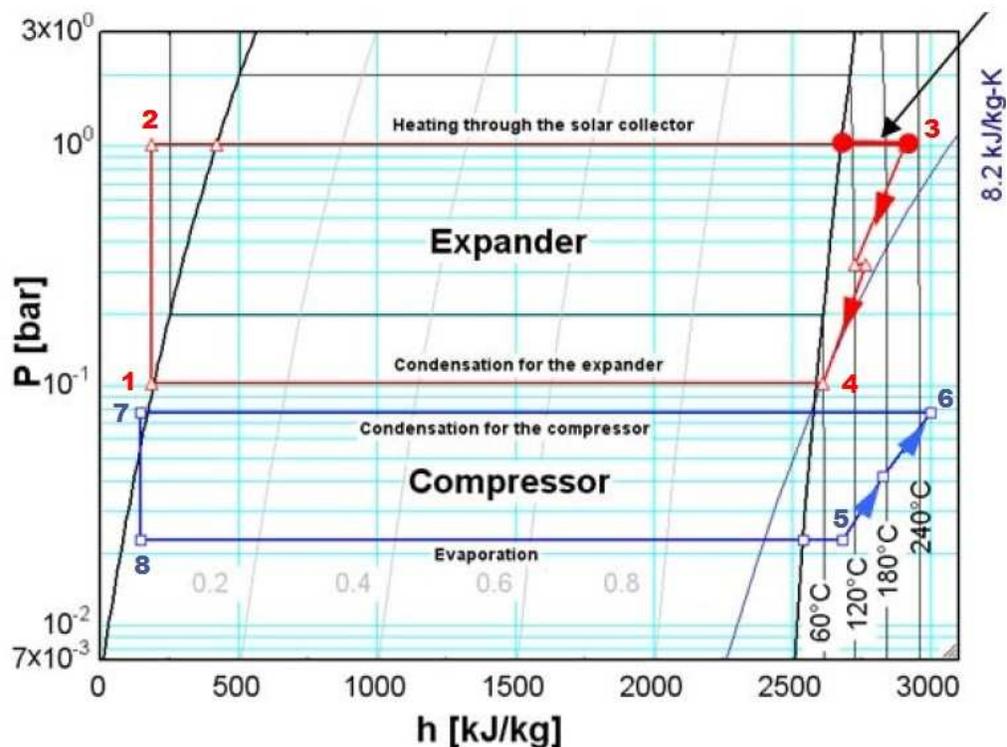


Figura 23: Diagrama P-h de refrigeración por compresión de vapor acoplado a un ciclo Rankine. (Fuente EIA)

### Estado de desarrollo

La tecnología de CRO es una tecnología aun en desarrollo, en etapa aun experimental y sólo con algunos casos de plantas piloto testimoniales. El acople de sistemas solares ciclos de refrigeración es una tecnología conocida. Sin embargo, la combinación de ambos ciclos es una tecnología poco desarrollada.

Zeyghami et al [1] publicaron una revisión de los sistemas de refrigeración termo-mecánicos (incluyendo los sistemas por ejector). Los sistemas de refrigeración por ciclo Rankine, especialmente los Rankine orgánico, están sufriendo un re-surgimiento en su interés, debido en gran parte a los avances en investigación en los ciclos Rankine orgánico.

Uno de los aspectos en los que se centran los últimos desarrollos son el proceso de diseño y análisis, teniendo en cuenta temperatura de trabajo y fluido de trabajo. En general, el fluido de trabajo del ciclo Rankine ha de ser isentrópico o seco, para evitar condensaciones en el final de la expansión del expansor. Algunos de los fluidos propuestos son R22, R114, R600, R113 o R245fa. Otro de los aspectos importantes es la selección del tipo expansor, que en la mayoría de los estudios son turbinas [1].

En cuanto a las experiencias de estos sistemas, son escasas y se resumen en la Tabla 4. En esta tabla se detallan, además las temperaturas de trabajo del sistema, el fluido de trabajo y el COP.

	Temperaturas		Fluido de Trabajo	COP
	Caliente	Frio		
Prigmore y Barber [10]	75-105	7	R113(ORC) R22(VCC)	0.09-0.5
Biancardi y sitler [11]	66-160	7	R11	0.55-0.75
Wang et al [12]	190	12-21	R11, R22, R113	0.45-0.76

Tabla 4: Estado de desarrollo de las tecnologías de refrigeración solar por compresión- Rankine (adaptado de [1]).

Experimentalmente se han obtenido temperaturas de refrigeración desde los -15 a los 15 lo que permite abarcar un amplio número de aplicaciones. Los sistemas CRO están limitados por las turbinas, ya que no existen expansores comerciales de pequeña potencia. Experimentalmente se han construido sistemas de pocos kW, aunque con resultados variables.

#### 4.5.2 Refrigeración Solar Ciclo Eyección

La refrigeración por ciclo eyección o *Steam Jet Expulsor Chiller* (SJEC) es similar al sistema de refrigeración por compresión de vapor, con la diferencia que se sustituye el compresor por un ejector. Este sistema se considera termo-mecánico, ya que utiliza el vapor sobrecalentado para succionar el vapor del evaporador.

##### Principio de operación

Un ejector es una bomba de vacío sin partes móviles, impulsada únicamente por vapor. El principio del funcionamiento de esta tecnología se basa en los

efectos de la compresibilidad en flujos que superan la velocidad del sonido y permite conseguir un aumento de la presión de un flujo de vapor a partir de otro flujo de menor caudal y más presión. .

El fluido motriz, generalmente vapor, es acelerado en una tobera convergente-divergente, convirtiendo la presión en velocidad. Debido al efecto Venturi, la presión en la descarga es muy baja, produciendo una succión del fluido aspirado en la cámara de mezcla. La mezcla del fluido motriz y aspirado es introducida en el difusor, donde se transforma la velocidad en presión, obteniendo en la descarga una presión intermedia entre la del fluido motriz y el impulsado.

El proceso de funcionamiento de un eyector se muestra en la Figura 24 y la Figura 25. En el esquema se identifica la principal característica de un eyector: tiene dos flujos de entrada y uno de salida. A la entrada de la tobera convergente entra vapor saturado a una velocidad subsónica ( $Ma < 1$ ). Esta velocidad va aumentando por la disminución de área de la sección hasta alcanzar la velocidad sónica en el punto 1 ( $Ma = 1$ ). A partir de ese momento en el que se alcanza la velocidad del sonido, el flujo va aumentando la velocidad con el aumento del área de la sección. Es decir, la tobera es divergente en esa sección para permitir que el vapor alcance velocidades supersónicas ( $Ma > 1$ ) en el punto 2. Por conservación de la energía, este aumento de la velocidad implica una disminución de la presión, lo cual genera una succión del segundo flujo de vapor, que viene del evaporador. Estos dos flujos se mezclan en el punto 3. En el punto 4, por un cambio de sección, se genera una onda de choque que genera un cambio drástico de las propiedades del flujo, disminuyendo la velocidad y aumentando la presión. Este aumento de presión corresponde al trabajo efectuado por el compresor de un sistema convencional de refrigeración.

Figura 24: Esquema de un eyector y sus diferentes partes.

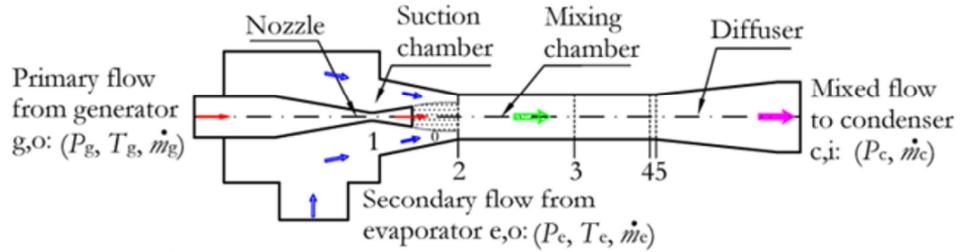
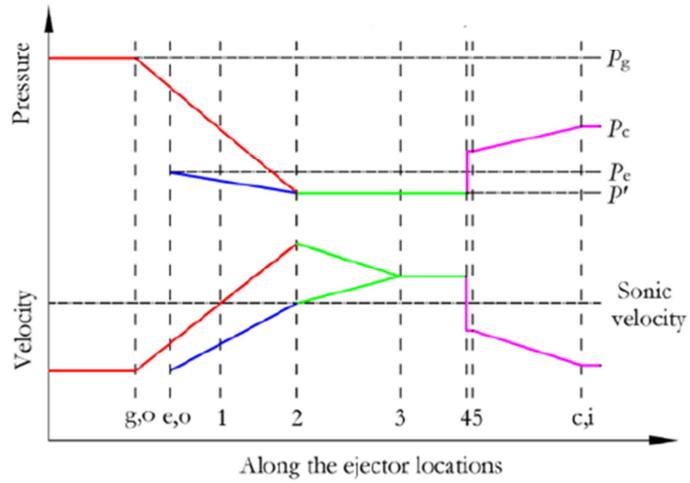


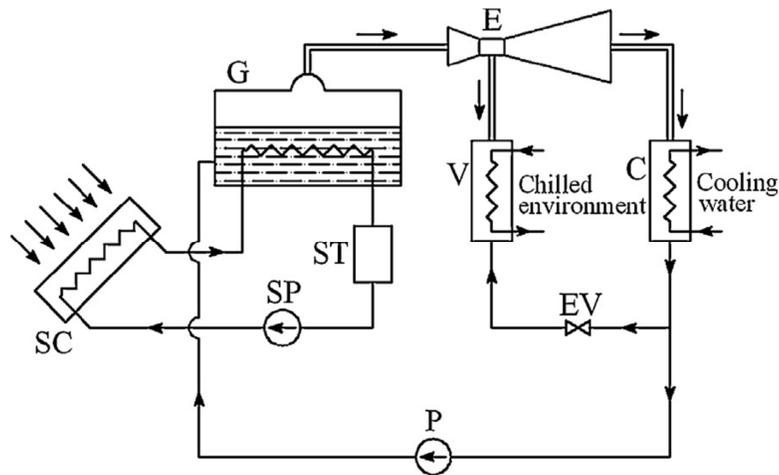
Figura 25: Estados del fluido a lo largo del eyector



**Funcionamiento**

La Figura 26 muestra como un eyector de vapor se podría integrar en un ciclo de refrigeración solar. El vapor producido por el campo solar pasaría el eyector. Durante este proceso, la presión de evaporador se reduce y el agua se vaporiza en el evaporador (V) absorbiendo calor del agua que será usada después para la refrigeración.

Figura 26: Integración de un sistema de refrigeración con eyector [13].



### Estado de desarrollo

Existen numerosas empresas productoras de enfriadores de eyector de chorro de vapor para uso industrial. Esta tecnología se utiliza actualmente para grandes flujos continuos de agua enfriada en industrial aplicaciones, ya que es un producto bien establecido.

Sin embargo, la aplicación de eyectores en esquemas de refrigeración solar no es un tema muy desarrollado. Existen algunos bancos de prueba experimentales y prototipos. De manera análoga a las investigaciones relativas a la refrigeración por ciclo Rankine, los aspectos más importantes del desarrollo de la refrigeración por eyector el diseño según las condiciones de trabajo y el fluido seleccionado. Según el trabajo de revisión propuesto por Zeyghami et al. [1], las temperaturas de trabajo pueden ir desde los 50 hasta los 130 °C en el lado caliente y desde los -6 hasta los 15 °C en el lado frío.

El problema principal de acoplar un eyector con captadores solares es que las temperaturas alcanzadas por estos hacen que el uso de agua como fluido de trabajo sea muy complejo. Las presiones de operación estarían por debajo de las atmosféricas [13] por lo que hay riesgos de entrada de aire al circuito. Por tanto, otros fluidos se suelen considerar. Los fluidos utilizados en los estudios experimentales son, además del agua, también son los habituales en los ORC: R113, R11, R22, R123, R134, R717 y R600a, con valores de COP que llegan a 0.7.

Muchas de las investigaciones muestran bajos valores de COP del sistema completo debido a las bajas eficiencias del eyector. El funcionamiento del eyector depende de la relación entre los caudales máxicos del vapor motriz y el impulsado. Los parámetros que gobiernan el funcionamiento del sistema son la temperatura de la fuente de calor, la temperatura de enfriamiento, la presión crítica del condensador, la posición de la salida de la tobera primaria y la relación de las áreas de eyector. Una temperatura de condensación más alta y sobrecalentar el fluido primario no tienen un efecto relevante en la operación del sistema. La eficiencia del sistema aumenta con el aumento de la temperatura de enfriamiento. Un aumento de son la temperatura de la fuente de calor implica un aumento del flujo primario y de la presión crítica, pero no siempre un aumento del COP.

## 4.6 Refrigeración Solar Eléctrica

### 4.6.1 Refrigeración Solar Fotovoltaica -

Los sistemas de refrigeración solar por compresión -fotovoltaico son sistemas similares a los sistemas de refrigeración convencional de compresión de vapor

con la diferencia que se alimentan de energía eléctrica generadas por paneles fotovoltaicos.

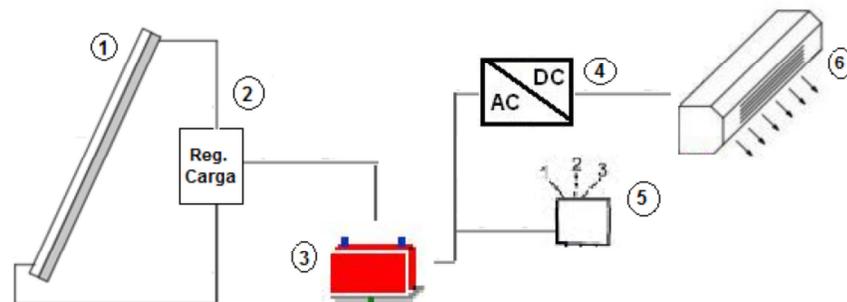
### Principio de operación

Un panel fotovoltaico está formado por varias celdas fotovoltaicas, que son un dispositivo semiconductor que convierte luz en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. El efecto fotovoltaico es el efecto fotoeléctrico caracterizado por la producción de una corriente eléctrica entre dos piezas de material diferente que están en contacto y expuestas a una radiación electromagnética (la luz).

### Componentes del sistema

La salida de las celdas fotovoltaicas es normalmente corriente continua (DC) mientras que habitualmente los electrodomésticos necesitan corriente alterna (AC). Por tanto, los sistemas de refrigeración fotovoltaicos por compresión constan de cuatro componentes básicos: los paneles solares fotovoltaicos (1), un regulador de carga o interruptor (2), baterías (3) para el almacenamiento de la energía, un inversor (4) y un controlador de carga (5), como se aprecia en la Figura 27. Estos dispositivos deben dimensionarse correctamente para hacer posible la transformación de la radiación solar en energía eléctrica, y en caso de tener un exceso de energía pueda inyectarse a la red, reduciéndose los costes de electricidad.

Figura 27:  
Sistema de refrigeración fotovoltaico.



### Estado de desarrollo

Tanto los sistemas de refrigeración por compresión y los sistemas fotovoltaicos tienen un elevado estado de desarrollo. La principal limitante es el costo de los equipos.

## 4.6.2 Refrigeración Solar Termo-eléctrica

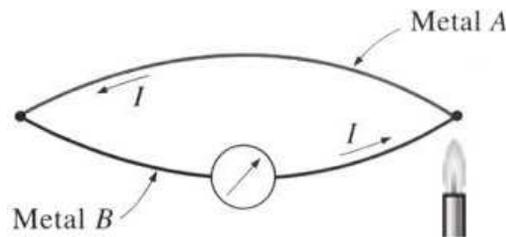
Los sistemas de refrigeración termoeléctrica son sistemas que transforman radiación solar en energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos, igual que la refrigeración solar por compresión –fotovoltaico. La diferencia con estos es que la energía eléctrica se usa directamente para enfriar, sin necesidad de utilizar partes móviles o refrigerantes como los sistemas anteriores.

### Principio de operación y ciclos termodinámicos

Su funcionamiento se basa en dos fenómenos: efecto de Seebeck, y el efecto Peltier. El primero es provoca que en un circuito cerrado de dos alambres de distinto material, al calentar una de las uniones de los alambres fluye una corriente en el circuito (Figura 28). Este fenómeno es utilizado en el medidor de temperatura más versátil (termopar) y de mayor utilización. También se puede usar para la generación de energía eléctrica, pero las eficiencias son muy bajas.

Sin embargo este efecto no refrigera, para crear el efecto de refrigeración se invierte la dirección del flujo de los electrones aplicando externamente una diferencia de potencial en la dirección contraria, lo cual es el denominado efecto Peltier.

Figura 28:  
Esquema  
ejemplar  
del  
efecto Seebeck.



### Componentes del sistema

Un sistema de refrigeración termoeléctrico está compuesto por dos partes principales: el generador termo-eléctrico y el refrigerador termoeléctrico (Figura 29). El generador termoeléctrico consiste en un pequeño número de termopares que producen poca potencia pero que pueden producir altas corrientes. Tiene la ventaja de que puede operar con niveles de calor pequeños, transformándolos en electricidad.

El refrigerador termoeléctrico también está compuesto por un número de termopares, a través de las cuales se hace pasar la corriente eléctrica producida por el generador. La combinación de estos dos componentes es posible para materiales termoeléctricos semiconductores basados en  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ .

[13]. Según Vella et al [13], la relación óptima entre el número de termopares del generador y del refrigerador es 4:1. Se han llegado a alcanzar temperaturas de refrigeración por debajo de 0 °C.

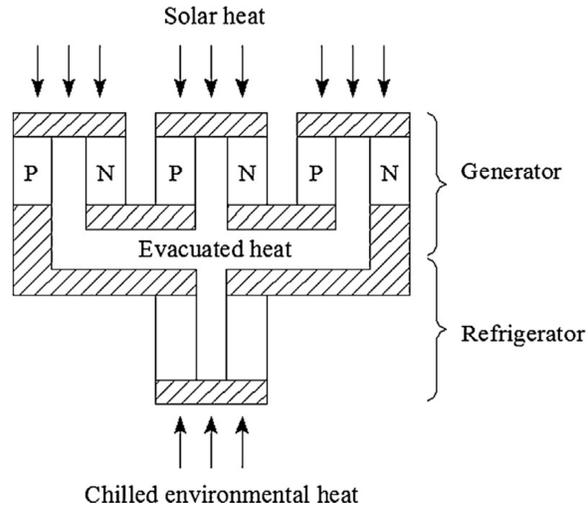


Figura 29:  
 Esquema de un  
 refrigerador  
 termoelectrico  
 solar [13]

### Estado de desarrollo

En los últimos años, la preocupación por el uso de refrigerantes CFC usados en las máquinas de refrigeración tradicionales ha impulsado el desarrollo e investigación de sistemas Peltier. Esto ha llevado a una disminución de los costes de producción de módulos Peltier y un aumento moderado de las eficiencias. Sin embargo, el COP de estos sistemas todavía sigue siendo más bajo que el de una unidad de compresión convencional.

Uno de los aspectos objeto de más investigaciones es el material utilizado para los módulos Peltier. El material más utilizado es Bismuto y telurio, el cual se emplea en dispositivos que funcionan a temperaturas cercanas a la temperatura ambiental. Sin embargo, existen otras combinaciones de materiales semiconductores que están en investigación, como telurio/plomo, telurio/antimonio o siluro/germanio

Las principales características que deben tener estos materiales es ser buen conductor eléctrico y mal conductor de calor, para así facilitar el traspaso de calor del lado frío al caliente por el efecto de una corriente continua.

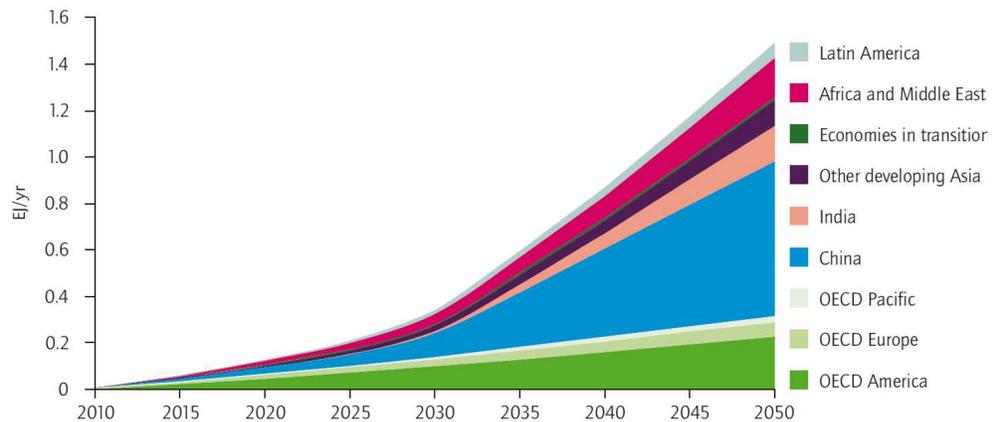
### Aplicaciones

La utilización de células termoeléctricas en el campo de refrigeración presenta ventajas respecto a los sistemas convencionales debido a su sencillez del equipo básico que le permite ajustarse a las condiciones de espacio, potencia eléctrica y térmica. Las principales aplicaciones son la microelectrónica (enfriadores de chips), el aire acondicionado y la instrumentación médica.

## 5 Estado de Desarrollo de la Refrigeración Solar

La IEA [7] propone que de la energía usada en 2050 para la refrigeración de espacios, un 17 % sea aporte de la refrigeración solar. En particular, y según esta organización, el mercado de China tiene el potencial de aumentar exponencialmente.

Figura 30: Visión de la IEA para el futuro de la refrigeración solar en EJ/año [7].



El estado actual de la tecnología y la industria se puede describir en función de tres factores: la madurez tecnológica, la eficiencia energética y la viabilidad económica y ambiental.

### 5.1 Madurez tecnológica y eficiencia energética

Los componentes clave del sistema son el subsistema solar y la máquina de refrigeración (por activación térmica). Otros elementos importantes son la unidad de rechazo de energía y el almacenamiento (de calor o de frío).

Para que este desarrollo se lleve a cabo, es necesario que el mercado ofrezca alternativas tecnológicas que permitan la refrigeración solar. Tal y como han resumido numerosos autores [2,14–16], existen numerosas experiencias experimentales de refrigeración solar.

Según el resumen de proyectos de refrigeración solar de Montagnino [15], la refrigeración solar es aplicable a numerosos contextos, desde instalaciones pequeñas (en el rango de los kW) a grandes (hasta 1MW o más). Normalmente las plantas se instalan con algún sistema adicional de gas natural y/o un

almacenamiento que también hace de buffer para la estabilización de la temperatura de entrada.

Los captadores solares son sistemas comunes y conocidos, que han alcanzado la madurez técnica. En particular, para sistemas con temperaturas por debajo de los 110°C existe un amplio rango de alternativas robustas y económicas. Para temperaturas más altas, existen nuevos desarrollos de captadores, pero son aun escasos.

En el mercado actual también existen componentes maduros de refrigeración. Las grandes maquinas de sorción existen desde hace decadas, funcionando principalmente con energía de desecho o calderas de gas. Sin embargo, el mercado de la refrigeración solar, aunque aumentando, aún se limita a un pequeño numero de aplicaciones semi-experimentales [14].

Actualmente, si consideramos el COP de la refrigeración, la compresion es la que tiene un mayor COP. Sin embargo, cuando combinamos la refrigeración con energía solar, la tecnología de refrigeración más eficiente son las bombas de absorción de doble y triple efecto acopladas a colectores de concentracion [15], tal y como se observa en la Tabla 5, que incluye los datos del COP de las distintas tecnologías. Sin embargo, la mayoría de los sistemas instalados son colectores planos con maquinas de absorcion de simple efecto [14].

Además, una ventaja de las máquinas de sorción es que la falta de piezas móviles y vibraciones hace que aumente la vida útil de estos sistemas comparados con un sistema de compresión [15].

Refrigeración Solar		Temperatura fuente calor	COP	COP solar	Colector
Refrigeración solar por electricidad		-	3-3.45	0.3-0.75	PV
Absorción	Simple efecto	85	0.7	0.35	FPC
	Doble efecto	130	1.25	0.62	FPC/ETC
	Triple efecto	220	1.7	0.85	ETC/PTC/LFC
Adsorción		60-165	0.3-0.7	0.15-0.35	FPC/ETC/PTC/LFC
Desecante		60-95	0.3-0.51	0.15-0.26	FPC
Rankine		60-160	0.1-0.75	0.05-0.38	FPC/ETC/PTC/LFC
Eyector		60-160	0.1-0.62	0.05-0.31	FPC/ETC/PTC/LFC

Tabla 5: Funcionamiento de sistemas de refrigeración solar (adaptado de [1]) PV: fotovoltaica; FPC: colector plano; ETC: colector de tubo evacuado; PTC: cilindro-parabólico; LFC: colector lineal Fresnel.

La temperatura de la fuente de calor es uno de los parámetros que define la eficiencia de las máquinas de sorción, tal y como muestra la Figura 31. La absorción de simple efecto prácticamente la misma eficiencia que la adsorción, a pesar de que las temperaturas de trabajo son más altas. Sin embargo, al añadir más efectos, el COP aumenta significativamente.

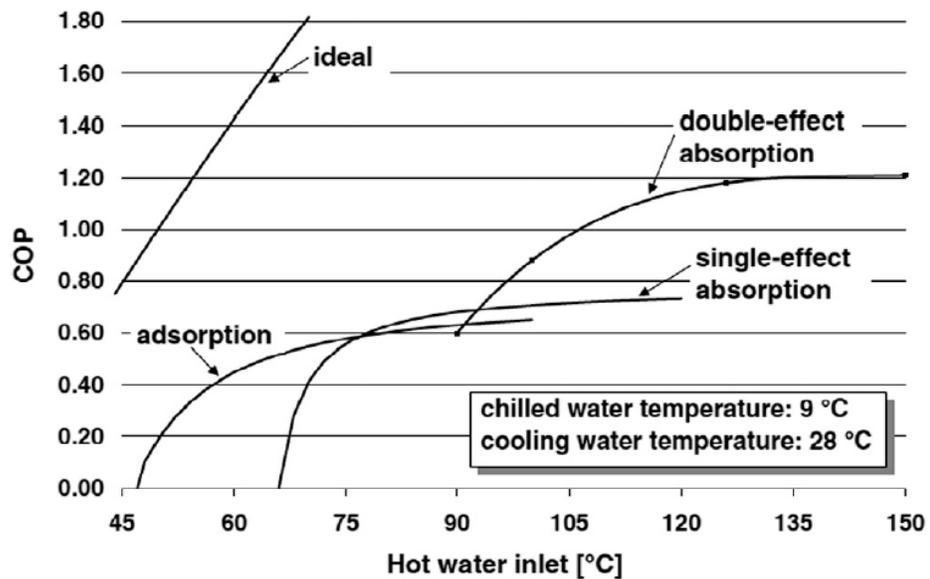


Figura 31: Relación entre la temperatura de trabajo y en COP de las máquinas de sorción [15]

El desarrollo de la última década en las máquinas de refrigeración ha sido en máquinas de sorción de capacidad pequeña, y la refrigeración solar ha continuado a este desarrollo. Como veremos en la sección 4.2.2 (Proveedores), existen varios proveedores de estos sistemas con madurez técnica. Sin embargo, la mayoría son compañías start-up [17].

Por tanto, los progresos más destacables de la última década son:

- Máquinas de refrigeración accionadas térmicamente de pequeño tamaño, que permiten su instalación en lugares con poca demanda
- Aumento del número de chillers de alta eficiencia de doble y triple efecto, que permiten el uso de captadores solares que operan a temperaturas más altas y de manera más eficiente
- Desarrollo de sistemas integrados de refrigeración solar que usan captadores solares con seguimiento de un eje

La Figura 32 muestra las eficiencias actuales y proyectadas de sistemas de refrigeración con captadores de media temperatura. En particular, el potencial de aumento de eficiencia de los sistemas de adsorción es importante, pero son los sistemas de desecante los que tienen mayor eficiencia de todos cuatro considerados en la figura.

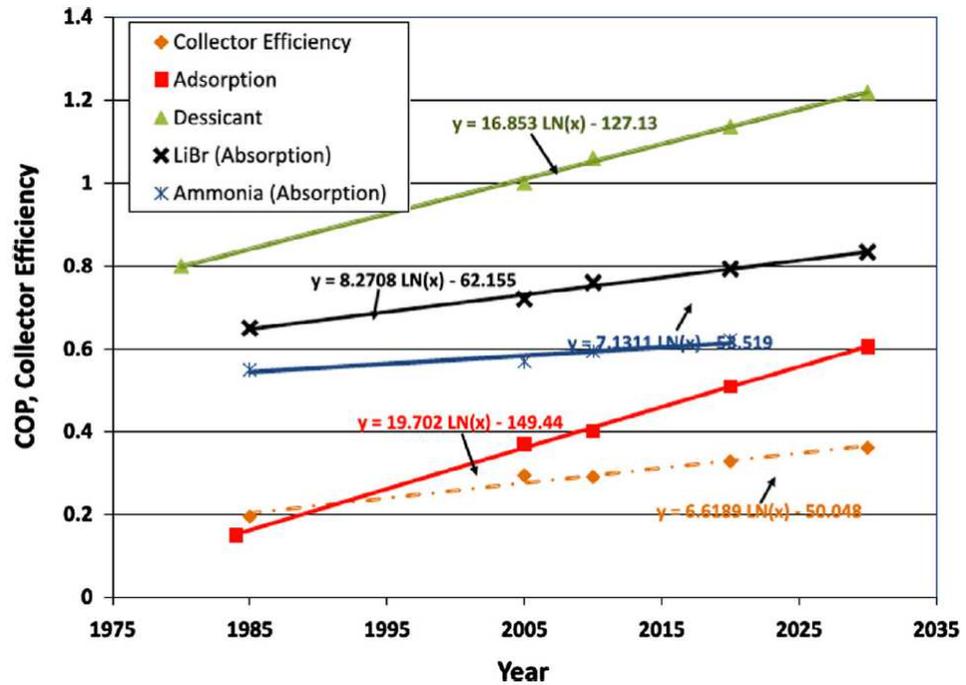


Figura 32: Eficiencias actuales y futuras de algunos sistemas de refrigeración solar [15]

El almacenamiento térmico es otro de los aspectos fundamentales del diseño de estos sistemas. La presencia de almacenamiento térmico permite aumentar la fracción solar de los sistemas de refrigeración solar. Además, estos sistemas pueden actuar como buffer para evitar fluctuaciones de temperatura en el corto plazo, que afectan mucho a las máquinas de sorción. En algunas aplicaciones, el almacenamiento de hielo en el lado frío también es una opción. Otros materiales de cambio de fase aun no son comunes.

Para elegir la mejor tecnología de almacenamiento, se presentó una guía en función de la zona climática europea donde estuviera el sistema, que se muestra en la Figura 33.

Figura 33: Guía de selección de la tecnología de almacenamiento más adecuada, según la zona climática de la instalación (Europa) [18]

	Office building – northern climate zone	Office building – middle climate zone	Office building – southern climate zone
<b>UTES</b>	+	+	++
<b>ATES</b>	+	+	+
<b>Pit storage</b>	+	+	+
<b>Solid media</b>	o	o	o
<b>PCM</b>	o	o	o
<b>Ice storage</b>	o	++ / o	++ / o
<b>Hot and cold water tank</b>	++	+ / o	o

+ main storage (long term)      o additional storage (short term)

Ghafoor y Munir [14] evaluaron la literatura científica relativa a los sistemas de refrigeración solar, analizando no sólo el COP y su relación con la temperatura de trabajo, sino también aspectos como el área solar por kW de refrigeración y el volumen de almacenamiento térmico. Una de las conclusiones de estos autores fue que, a pesar de la importancia de optimizar tanto el campo solar como el almacenamiento térmico, los sistemas existentes no presentan tamaños coherentes.

También es una de las conclusiones de la tarea 49 de la IEA/SHC que los principales obstáculos de los sistemas de refrigeración solar están a nivel de sistema. Muchas instalaciones no alcanzan los ahorros de energía planeados por problemas en el diseño o mantenimiento y operación de los sistemas.

Por tanto, para la refrigeración solar se enfrenta a obstáculos importantes, fundamentalmente técnicos y a nivel del sistema:

- Es necesario desarrollar un sistema de rechazo de energía que sea eficiente, ya que la eficiencia de la refrigeración depende de estos sistemas
- El manejo de energía ha de ser estudiado con más profundidad.
- Operarios con buen conocimiento de los sistemas no son habituales, lo cual aumenta el número de problemas de mantenimiento

Los sistemas de refrigeración solar tienen el potencial de convertirse en una buena alternativa desde el punto de vista técnico, especialmente los sistemas de absorción con sistemas de concentración y los sistemas de refrigeración por desecante. Sin embargo, para que el mercado pueda desarrollarse, es necesario que la parte económica acompañe.

## 5.2 Viabilidad económica

### 5.2.1 Estado del mercado internacional

A nivel internacional el mercado sigue siendo pequeño, sin embargo se está desarrollado cada vez más. En el año 2009 se publicó un informe de estado del arte de estos sistemas en el marco de la tarea 38 ‘Solar Air-Conditioning and Refrigeration’ del programa SHC (Solar Heating and Cooling) del IEA (International Energy Agency). Dicho estado de arte analizó datos y tendencias aun aplicables hoy en día.

Según este estudio, en el año 2009 existían 113 sistemas de refrigeración solar a gran escala y 163 sistemas a pequeña escala en el mundo [17]. De estas instalaciones, 254 están ubicadas en Europa, 13 en Asia (principalmente en China y Japón), 4 en América (3 en EE.UU. y 1 en México), 3 en Australia y 2 en África (Egipto y Sudáfrica). La Figura 34 muestra la distribución del número de instalaciones en todo el mundo en los países, que se clasifica en pequeña o gran escala.

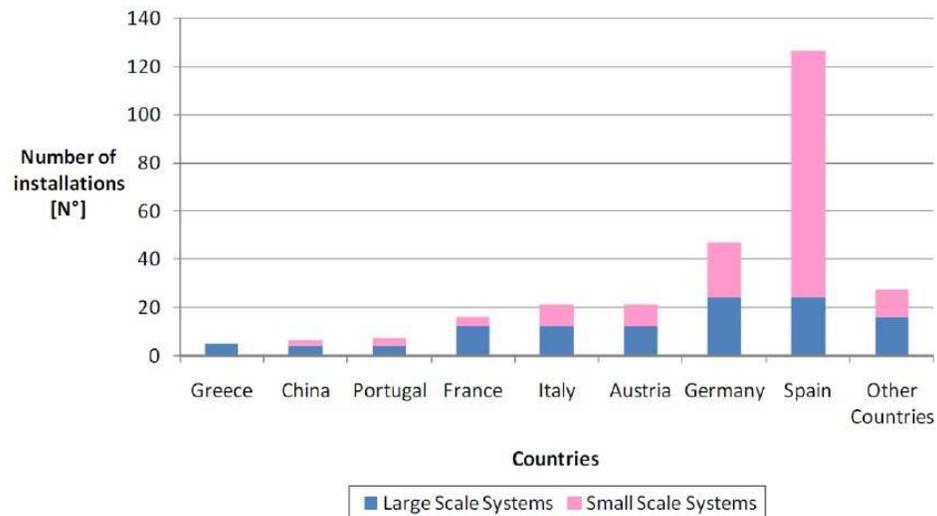
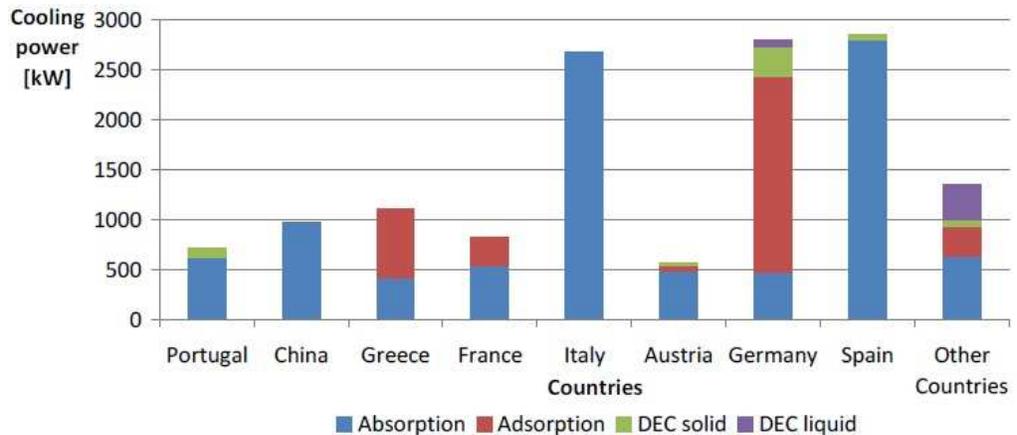


Figura 34: Número total de sistemas de refrigeración solar por tamaño de sistema [17];

La mayoría de las instalaciones de gran escala están instaladas en su mayoría en edificios de oficinas (53 % de casos), tal y como se observa en la **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Las instalaciones de pequeña escala son utilizadas para la climatización en edificios. Lo más habitual es que dichos edificios sean bien oficinas (38 % de casos), o bien edificios residenciales (28 %) como se observa en la **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, pero también pueden climatizarse industrias, centros educativos, deportivos o laboratorios.

En la Figura 35 se muestra la capacidad instalada en cada país, clasificadas en función de las cuatro tecnologías más utilizadas: a la refrigeración solar térmica con ciclos de absorción, adsorción, sólido desecante y líquido desecante. La capacidad total de las 268 instalaciones alcanza los 15.7 MW: 24.4 % instalado en España, 19.5 % en Alemania y 17.4 % en Italia. 14.1 MW corresponde a sistemas de gran capacidad y 1.6 MW a sistemas de pequeña capacidad.

Figura 35: Potencia mundial de sistemas de refrigeración solar por tipo de sistemas [17]



Para los sistemas de gran escala, la tecnología con mayor éxito corresponde a los sistemas de absorción con un 71 % de las instalaciones, seguido por los sistemas sólido desecante con un 14 %, luego le sigue los sistemas de adsorción con un 13 % y finalmente los sistemas de líquido desecante con un 2%. Para los sistemas de pequeña escala de nuevo el sistema que tiene mayor difusión es el de absorción con un 90 % seguido por un 10 % que ocupan los sistemas de adsorción.

En Alemania la tecnología más usada son las máquinas de adsorción, mientras que en Italia y España son las máquinas de absorción.

En la integración de los sistemas de refrigeración con la tecnología de captadores solares, la tecnología de captadores solares de placa plana (FPC) y los captadores de tubos al vacío (ETC) son habitualmente utilizados para sistemas de refrigeración solares de gran escala, mientras que los captadores parabólicos compuestos (CPC), los captadores de aire (aire) y los captadores cilindro-parabólicos (PTC) son utilizados en instalaciones puntuales.

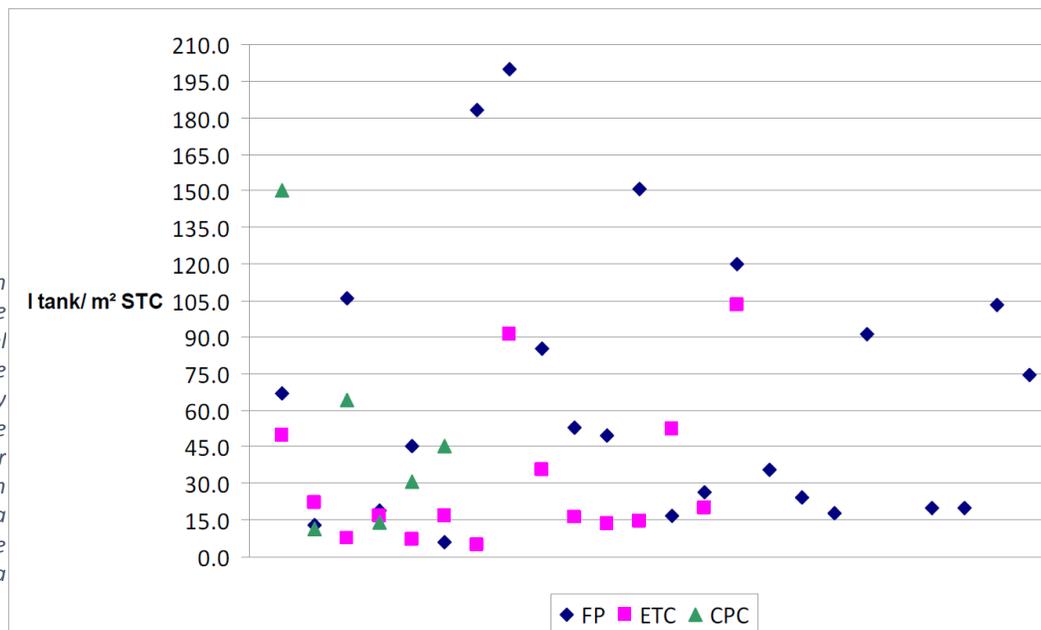
La superficie total instalada en 108 sistemas suma un total de 35 530m<sup>2</sup>, con las mayores superficies instaladas en Alemania, Italia y España. En la Tabla 6 se detallan el número de las instalaciones actuales (despreciando las instalaciones híbridas) según sus tecnología solar y tecnología de absorción.

Tabla 6: Número de instalaciones de sistemas integrados captador y refrigeración [17]

Captación / Refrigeración	Absorción	Adsorción	DEC solido	DEC liquido
FP	32	8	6	2
ECT	35	5	1	0
CPC	4	2	3	0
AIR	0	0	5	0
PTC	3	0	0	0

Muchas instalaciones tienen sistemas de almacenamiento de agua caliente. Las relaciones entre el volumen de estos tanques y la superficie solar es variable, aunque los sistemas sean similares, tal y como muestra la Figura 36.

Figura 36: Relación entre los litros de agua caliente del tanque de almacenamiento y la superficie de campo solar clasificado en función de la tecnología de captación usada [18].



La existencia de tanques de agua fría es mucho menos habitual que los de agua caliente, pero la relación entre la capacidad de tanque y la potencia de las máquinas de refrigeración es también variable.

En muchos de los sistemas existe un sistema de respaldo de calor, ya sea en forma de calderas de gas/gasolina o de unidades de cogeneración de recuperación de calor, calefacción de distrito o bombas de calor. Sin embargo, es mucho menos habitual encontrar sistemas de respaldo de frío como refrigeradores de compresión de vapor o bombas de calor.

## 5.2.2 Proveedores

A nivel internacional, sólo dos de las tecnologías disponen con proveedores que cuentan con equipos específicos y validados para funcionar en el rango de temperatura de los captadores solares: la refrigeración por absorción y la

refrigeración adsorción. Además, la refrigeración por absorción es la única que abarcar un amplio rango de potencias, tal y como se observa en la Figura 37.

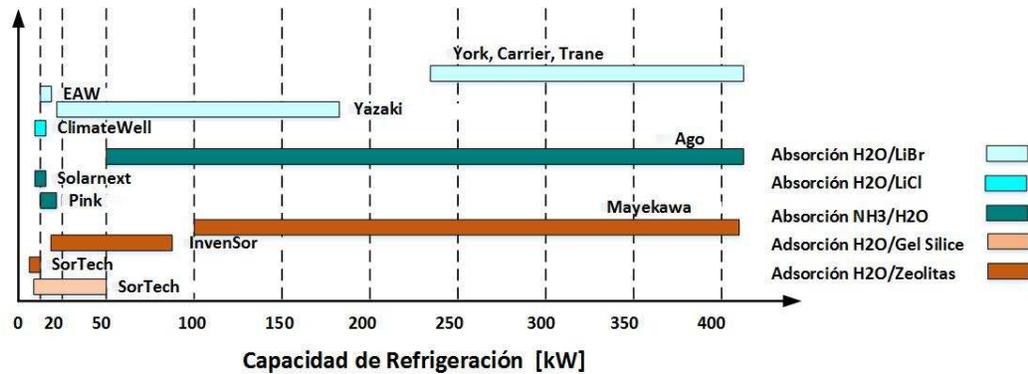


Figura 37:  
 Proveedores del  
 mercado de  
 refrigeración solar.

A continuación se muestra una revisión de los principales proveedores del mercado de la refrigeración solar actualizada, donde se recopilan sus potencias, rango de temperaturas frías y calientes, eficiencia y costo. Al referirse a temperaturas frías se entiende a las temperaturas que pueden refrigerar los equipos y al referirse a las temperaturas calientes se entiende a las temperaturas suministradas por los captadores que necesitan los equipos para su funcionamiento.

Para el resto de las tecnologías no se cuenta con proveedores específicos de refrigeración solar, sin embargo existen proveedores que fabrican los componentes de los equipos, pero no un sistema integrado.

### Sistemas térmicos de ciclo cerrado

Para los sistemas térmicos cerrados, principalmente los de absorción, en la gama de potencias media y altas de refrigeración (>20 kW) hay una cantidad de productos que existen hace décadas y son altamente confiables. En los últimos años además surgieron una serie de empresas que fabrican equipos con potencias de baja potencia (< 20 kW).

Sin embargo el mercado real muestra una serie de problemas que impiden la difusión rápida de esta tecnología innovadora: se trata de sistemas con hidráulica complicada que esta poco estandarizada por lo cual son susceptible a errores de diseño, instalación y control [19]. Por lo tanto no se ha conseguido el crecimiento y el desarrollo que se esperaba hace una década. Como consecuencia de esto han quebrado algunas empresas, como la PyME alemana Sonnenklima, que fabricaba máquinas de absorción con una potencia de 10 kW tuvo que declararse en quiebra en 2009. En el mismo año la empresa española Rotartica que comercializaba máquinas de 4,5 kW paro la producción.

**Absorción-agua (H2O) / bromuro de litio (LiBr)**

Proveedor	Modelo	Capacidad [kW]	COP [-]	T Frio [°C]	T Caliente [°C]	Costo [€]	Observaciones
Yazaki	WFC-SC5	17.6	0.7	7	75-95	27500	Japon
Yazaki	WFC-SC/SH10	35.2	0.7	7	75-95	38500	yazaki@yazakienergy.com
Yazaki	WFC-SC/SH20	73.3	0.7	7	75-95	50500	www.yazakienergy.com
Yazaki	WFC-SC/SH30	105.5	0.7	7	75-95	64000	
Yazaki	WFC-SC50	175.8	0.7	7	75-95	78000	
EAW	Wegracal 15	15	0.71	9	70-95		Alemania info@eaw-energieanlagenbau.de www.eawenergieanlagenbau.de

Tabla 7: Proveedores tecnología refrigeración solar por Absorción-agua (H2O) / bromuro de litio (LiBr). (Fuente: Fraunhofer Chile)

**Absorción- amoniaco (NH3) / agua (H2O)**

Proveedor	Modelo	Capacidad [kW]	COP [-]	T Frio [°C]	T Caliente [°C]	Costo [€]	Observaciones
Pink GmbH	PC19	12-19	0.4-0.7	(-3)-18	68-95		Austria Contacto: info@pink.co.at www.pink.co.at
Solarnext	chillii PSC12	12	0.62-0.65	6-15	68-85		Alemania info@pink.co.at www.solarnext.eu
Ago AG	ago colgelo 50	50	0.51	(-1)-(-6)	80-90	115000	Alemania
Ago AG	ago colgelo 100	100	0.51	(-1)-(-6)	80-90	200000	congelo@ago.ag
Ago AG	ago colgelo 150	150	0.51	(-1)-(-6)	80-90	280000	www.ago.ag
Ago AG	ago colgelo 250	250	0.51	(-1)-(-6)	80-90	390000	
Ago AG	ago colgelo 500	500	0.51	(-1)-(-6)	80-90	550000	
Ago AG	ago colgelo 750	750	0.51	(-1)-(-6)	80-90	700000	
Ago AG	ago colgelo 1000	1000	0.51	(-1)-(-6)	80-90	850000	

Tabla 8: Proveedores tecnología refrigeración solar por Absorción- amoniaco (NH3) / agua (H2O). (Fuente: Fraunhofer Chile)

**Sistemas de adsorción:**

Los sistemas de adsorción tienen el problema de que son normalmente ciclos intermitentes adsorción-desorción. Estos ciclos tienen limitaciones como bajo COP, baja eficiencia de calentamiento, y adsorción y desorción desiguales [16]. Estas limitaciones se pueden evitar con sistemas que tengan dos pares diferentes o usando ciclos regenerativos. Pero esto tiene la desventaja de que aumenta los costes de los sistemas. Por ello, muchas compañías que producían sistemas de adsorción han dejado de producirlos debido a su coste. Algunas de estas son SunMarck, BLM, Zeopower Company, EG Solar y Solaref.

**Adsorción- agua (H2O)/gel de sílice**

Proveedor	Modelo	Capacidad [kW]	COP [-]	T Frio [°C]	T Caliente [°C]	Costo [€]	Observaciones
SorTech AG	eCoo 2.0	16	0.65	8-21	50-95	16000	Alemania
SorTech AG	eCoo Industry	48	0.65	8-21	50-95	43200	office@sortech.de www.sortech.de

Tabla 9: Proveedores tecnología refrigeración solar por Adsorción- agua (H2O)/gel de sílice. (Fuente: Fraunhofer Chile)

**Adsorción- agua(H<sub>2</sub>O)/zeolitas**

Proveedor	Modelo	Capacidad [kW]	COP [-]	T Frio [°C]	T Caliente [°C]	Costo [€]	Observaciones
InvenSor GmbH	HTC 18 plus	6-22	0.55	9-25	75-100	27000	Alemania
InvenSor GmbH	LTC 10 e plus	4-14	0.75	10-25	45-100	18800	info@invensor.de
InvenSor GmbH	LTC 30 e plus	10-30	0.72	10-25	60-99	38800	www.invensor.de
InvenSor GmbH	LTC 90 e plus	30-105	0.75	10-25	140-210	116400	
SorTech AG	eZea	13	0.53	8-21	75-95	14300	Alemania office@sortech.de www.sortech.de

Tabla 10: Proveedores tecnología refrigeración solar por Adsorción- agua (H<sub>2</sub>O)/zeolitas. (Fuente: Fraunhofer Chile)

**Sistemas térmicos de ciclo abierto**

Desde hace décadas existen una gran cantidad de proveedores que producen los componentes del sistema de refrigeración de sistemas térmicos abiertos, hay, principalmente de rueda desecante, en la gama de potencias baja, media y alta. Sin embargo, sus productos se venden en forma separada, a cotización.

También existen proveedores que están trabajando para conseguir un sistema de refrigeración con desecante líquidos que funcione integrado con energía solar, como por ejemplo la empresa L-DCS Technology GmbH o Ail Research Inc, que está desarrollando prototipos y validando su sistema de desecante líquido, el cual no está disponible en el mercado.

**Solido desecante**

Proveedor	Componente	Observaciones
Rotor Source	Rueda desecante	Usa
Rotor Source	Intercambiador de calor rotativo	info@rotorsource.com
Rotor Source	Enfriador evaporativo directo	www.rotorsource.com
Munters	Intercambiador de calor rotativo	Suecia
Munters	Enfriador evaporativo directo	contato@munters.com
Munters	Enfriador evaporativo indirecto	www.munters.com
Klingenburg GmbH	Rueda desecante	Alemania
Klingenburg GmbH	Intercambiador de calor	www.klingenburg.de info@tecukltd.co.uk
ProFlute	Rueda desecante	Suecia info@proflute.se www.proflute.se

Tabla 11: Proveedores tecnología refrigeración solar por Solido Desecante. (Fuente: Fraunhofer Chile)

## Líquido desecante

Proveedor	Componente	Observaciones
Kathabar Inc.	Deshumificadores	Usa www.kathabar.com sales.kathabar@alfalaval.com
L-DCS Technology GmbH	Deshumificadores	Alemania
L-DCS Technology GmbH	Sistemas de refrigeración integrados	www.L-DCS.com matthias.peltzer@l-dcs.com
Ail Research Inc	Validación de sistemas integrados	USA www.ailr.com ail@ailr.com

Tabla 12: Proveedores tecnología refrigeración solar por Líquido Desecante. (Fuente: Fraunhofer Chile)

**Sistemas termo-mecánicos**

Para los sistemas de refrigeración termo-mecánicos no existe actualmente en la industria empresas que fabriquen equipos específicos para la refrigeración solar. Sin embargo existe un gran número de empresas que desarrollan ciclos Rankine y eyectores los cuales se han adaptado para casos específicos, principalmente experimentales.

## Rankine

Proveedor	Componente	Observaciones
Siemens	Turbinas Rankine Capacidad: 45[kW]-1.900 [MW]	Alemania www.energy.siemens.com support.energy@siemens.com
Elliott	Turbinas Rankine Capacidad: 15 - 100.000 [kW]	USA www.elliott-turbo.com www.elliott-turbo.com/contacts
Greenturbine	Turbinas Rankine para fines educativos Capacidad: 1,5 [KW]	USA www.greenturbine.eu info@gonextgrid.com

Tabla 13: Proveedores de turbinas Rankine. (Fuente: Fraunhofer Chile)

**Sistemas eléctricos**

En el caso de las células termoeléctricas, no existen proveedores de sistemas de refrigeración, ya que es aún una aplicación experimental. Por tanto, se listan en la Tabla 14 los proveedores de módulos termoeléctricos.

## Celula Termoelectrica

Proveedor	Componente	Observaciones
Fandis	Modulos termoelectricos Capacidad: 1[kW]-1.5 [kW]	Italia www.fandis-tm.com
Ferrotec America	Modulos termoelectricos Capacidad: 1[kW]-1.5 [kW]	USA www.ferrotec-ametica.com
HiTech Technoloiesb	Modulos termoelectricos Capacidad: 1[kW]-1.5 [kW]	USA www.hitechtech.com

Tabla 14: Proveedores de células termoelectricas. (Fuente: Fraunhofer Chile)

La limitación de los sistemas de refrigeración fotovoltaicos con compresión no es el desarrollo técnico, ya que existen un gran número de empresas que desarrollan paneles fotovoltaicos y compresores.

Además, en la última década, han surgido varios proveedores de sistemas de refrigeración solar de baja potencia. En estos casos, el proveedor proporciona un kit en el que se incluye ambos sistemas: el sistema solar y el sistema de refrigeración. En la Figura 38 se muestra una relación de estos proveedores.

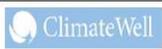
Logo	Manufacturer, country	Market status	Service	Solar input type	Nominal cooling capacity (kW or m <sup>3</sup> /h)	Nominal heating capacity (kW)	Nominal solar input (Wp for PV and m <sup>2</sup> for ST)	Cooling Storage	Target market area
	ATISYS, France	R&D	Cooling/heating	PV	4 kW	5.1 kW	4.6 kW	Sensible tank	France, Northern Africa
	CLIMATEWELL, Sweden	R&D	Cooling/heating/DHW	ST	40 kW	108 kW	180 m <sup>2</sup>	Sensible tank	Europe, sunny countries
	FREECOLD, France	Commercial	Cooling	PV	2.5 kW	No heating	1.5 kW	-	Africa, developing countries
	FREESCOO, Italy	R&D	Cooling/heating	ST/PV	500 m <sup>3</sup> /h	1.44 kW	2.4 kW	-	Italy
	GREE, China	R&D	Cooling/heating	PV	33.5 kW	37.5 kW	12.2 kW	None	China
	KAYSUN, Spain	Commercial	Cooling/heating	PV	3.5 kW	3.5 kW	0.7 kW	None	Spain, Europe
	PURIX, Denmark	Commercial	Cooling/heating	ST	2.5 kW	3.6 kW	4.8 m <sup>2</sup>	None	Europe, sunny countries
	SENR, France	Commercial	Cooling/heating	PV	3.6 kW(split) 45 kW (VRF)	3.6 (split) 50 (VRF)	650 (split) 20,000 W (VRF)	None	France, Europe, sunny countries
	SOLABCOOL, Netherlands	R&D	Cooling/heating	ST	4.5 kW	8 kW	13.3 m <sup>2</sup>	None	Europe, sunny countries
	YAZAKI, Japan	R&D	Cooling/heating	ST	35 kW	60 kW	0.1 kW	Sensible tank	China

Figura 38: Proveedores de kits de refrigeración solar [20].

### 5.2.3 Costos asociados al calor solar

El coste de los sistemas de refrigeración solar, como pasa con otros sistemas de energías renovables, es significativamente más alto que su correspondiente dependiente de la red. Algunos factores que ayudan a que estos sistemas tengan un periodo de retorno bajo son:

- Valores de irradiación altos
- Temporada de enfriamiento larga
- La presencia de otras demandas de calor como ACS y/o calor de proceso para usar el calor solar en momentos en los que la refrigeración no es necesaria
- Altos precios de la fuente de energía convencional.

A pesar de que las distintas tecnologías se encuentran en diferentes estados de desarrollo, Kim et al. [9] presentó un análisis de los costes asociados a varias tecnologías de refrigeración solar, que se muestran en la Figura 39. En esta figura, las tres últimas columnas indican el coste específico considerado para paneles fotovoltaicos, colectores térmicos y el coste del motor y del chiller. Los chillers pueden tener un gran rango de potencias y por tanto, los valores asumidos en esta figura son los de las máquinas más pequeñas disponibles. Las eficiencias de los captadores son solo indicativas y dependerán de la temperatura de ambiente y de la radiación.

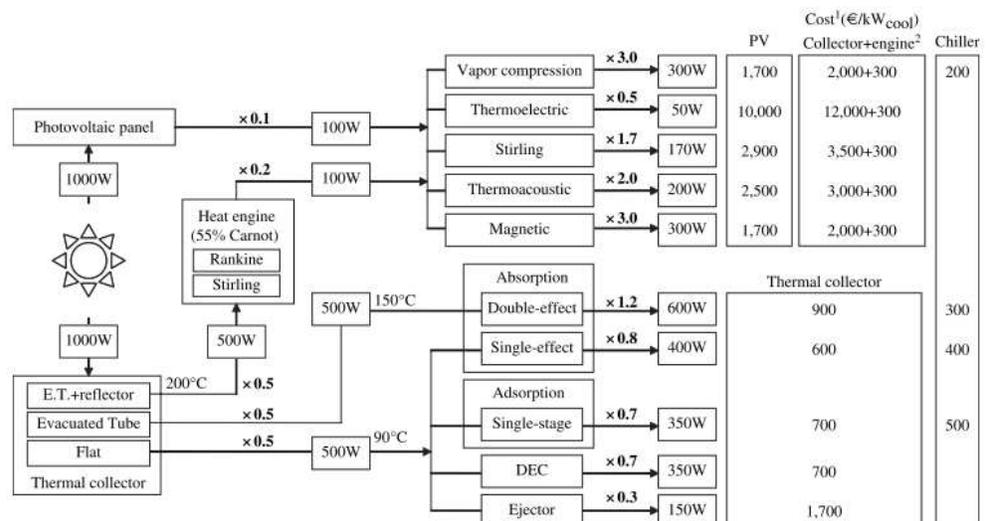


Figura 39: Costes de sistemas de refrigeración solar [9].

1. based on retail prices without installation, rounded off below €100  
 2. assumed to be 150% of a vapor compression chiller cost

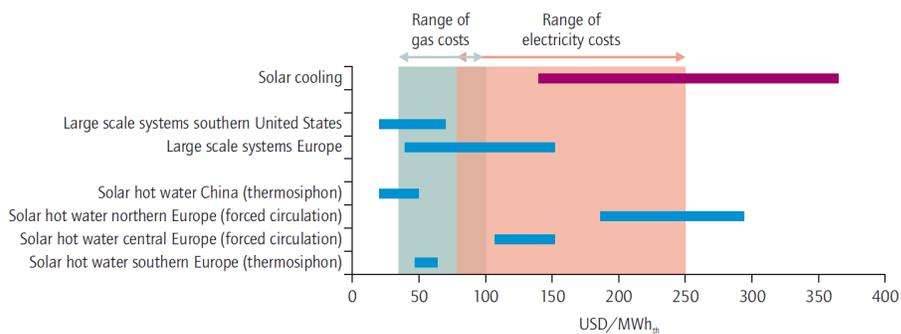
Para generar la misma cantidad de electricidad, un sistema termo-mecánico necesita un colector de media temperatura y un ciclo Rankine. Por ejemplo, un captador CPC cubriría esta condición. De nuevo, se observa que los costes de un sistema termo-mecánico son mayores que el equivalente eléctrico. Tampoco es probable que un sistema termo-mecánico sea más barato términos de operación.

El estudio de Kim et al. puede haber quedado obsoleto, ya que los datos son de 2007 como tarde. Sin embargo, los precios de los sistemas fotovoltaicos han reducido tanto su precio en los últimos cinco años y al mismo tiempo, el COP de las máquinas de refrigeración por compresión de vapor estándar están ya por encima de 4.5, con precios alrededor de los 500 euros/ kW de potencia de refrigeración [15]. Por tanto, un equipo de PV-VC debería costar menos de 700 euros/kW de refrigeración, lo cual supone una dura competencia para sistemas de refrigeración solar térmicos.

Si concretamos en los costes de los colectores solares, su viabilidad económica va a depender de las condiciones climáticas de la instalación. Sin embargo, tal y como muestra la FIGURA, si se incluye la refrigeración es difícil que pueda competir con los precios de la electricidad e imposible respecto a los del gas.

Los precios tampoco son comparables a los de las grandes plantas de CSP de producción de electricidad, en los que la economía de escala ha reducido considerablemente los costes de inversión.

*Figura 40: Costos de la refrigeración solar comparado con otros sistemas de energía solar térmica [7].*



Note: Costs of solar cooling: USD/MWh<sub>cooling</sub>

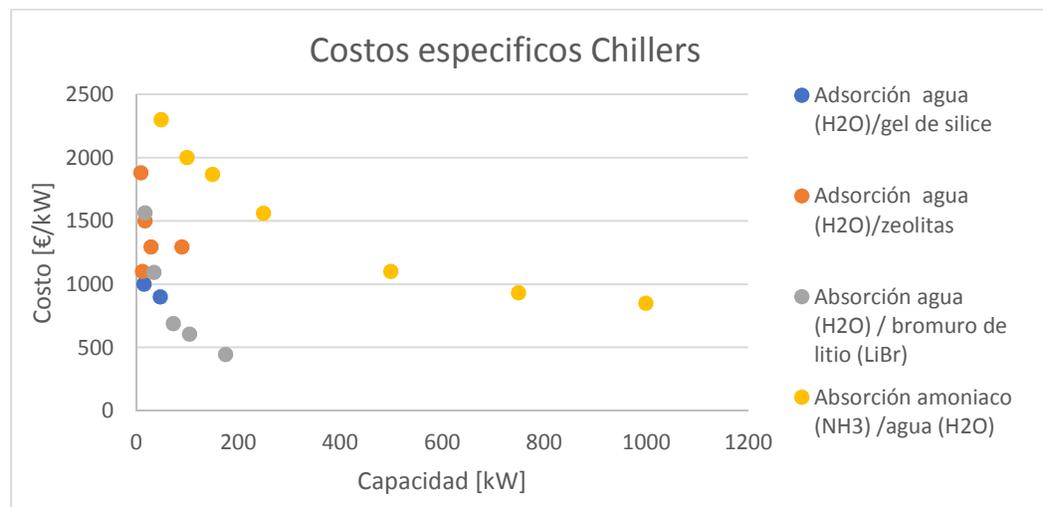
En cuanto a los costos específicos de las máquinas de refrigeración, para este trabajo se cotizaron los precios de la máquina de sorción de distintos proveedores de dos sistemas de refrigeración por adsorción y por absorción. Se seleccionaron estas tecnologías por ser las que presentan un mercado más desarrollado de las opciones de refrigeración termo-mecánicas. Específicamente se cotizaron cuatro sistemas: dos de absorción y dos de adsorción.

Los resultados del costo por kW respecto a la capacidad de la máquina de refrigeración se muestran en la Figura 41. Los precios de las máquinas de absorción con agua y bromuro de litio son precios que incluyen el transporte marítimo, específicamente de la marca Yazaki que entrega los equipos en el puerto de Iquique.

En esta figura se observa que a medida que aumenta la capacidad, los costos por kW disminuyen considerablemente, debido a la economía de escala de los equipos. Sin embargo lo más interesante es la disminución en los costos de las máquinas de un 1.500 y 3.000 €/kW para el 2008 [21] a un costo de 500 y 2.500 €/kW para el 2016.

Figura 41: Costos chiller de absorción y adsorción para refrigeración solar.

(Fuente: Fraunhofer Chile 2016)



Dependiendo del sistema, el periodo de retorno de los sistemas de refrigeración solar puede ser menos de diez años. No obstante, las compañías comerciales esperan a menudo periodos de retorno de cinco años o menos para justificar una inversión, que no son alcanzables en circunstancias normales. Por tanto, son necesarias algunas medidas por parte de los creadores de políticas, ya que estos sistemas ofrecen una serie de ventajas frente a las tecnologías convencionales, como la estabilidad de la red, el ahorro de energía, la reducción de emisiones CO<sub>2</sub>, o evitar usar refrigerantes dañinos con la capa de ozono.

### 5.3 Potencial mercado de Chile

Los altos niveles de radiación y altos precio de la energía en Chile deberían permitir un buen escenario para la implementación y validación de la tecnología de refrigeración solar, tal y como se observa en la Tabla 15.

Región	Ciudad	Radiación [kWh/m <sup>2</sup> - A]	Tarifa Eléctrica AT4.3 [\$CLP/KWh]
15	Arica	2343	66.659
1	Iquique	2070	66.641
2	Antofagasta	2362	65.577
3	Copiapó	2178	62.146
4	La Serena	1817	84.741
5	Valparaíso	1620	86.931
13	Santiago	1847	74.464
6	Rancagua	1605	84.773
7	Talca	1512	84.521
8	Concepción	1537	82.889
9	Temuco	1411	82.676
14	Valdivia	1344	81.720
10	Puerto Montt	1216	83.929
11	Coyhaique		71.877
12	Punta Arenas	874	58.670

Tabla 15: Radiación y costos de electricidad a nivel nacional [22].

Appsol presentó en el año 2014 un estudio que caracterizó la industria chilena y el potencial de integración de energía solar en los procesos más significativos de estas [22]. Dicho potencial se analizó separando a la industria minera y la no minera, ya que las bases de datos y sus características son diferentes.

Para la industria no-minera el estudio se basó en la Encuesta Nacional Industrial Anual (ENIA) del año 2011, una encuesta realizada en forma anual que funciona como un censo de la actividad industrial manufacturera del país. Para la industria minera se basa en información compilada por Cochilco y Sernageomin, en conjunto con el portal minero y los sitios web de cada una de las empresas mineras. Sólo se estudió la demanda energética de los procesos de electroobtención (EW) y electrorrefinación (ER) los cuales son ya conocidos por requerir grandes cantidades de energía térmica a temperaturas idóneas para la energía solar, pero que sin embargo, no requieren refrigeración.

El total de establecimientos industriales seleccionados alcanza las 1649 plantas. Se descartaron 2231 plantas que no cumplían con el requisito de poseer demandas térmicas superiores a 3 MWh y no se consideraron las demandas de frío de menos de 0 °C, ya que a priori se consideran como económicamente no rentables para aplicación de energía solar térmica.

En la Figura 42 se muestra la distribución de las plantas industriales por las distintas regiones del país. La gran mayoría (54%) de los establecimientos

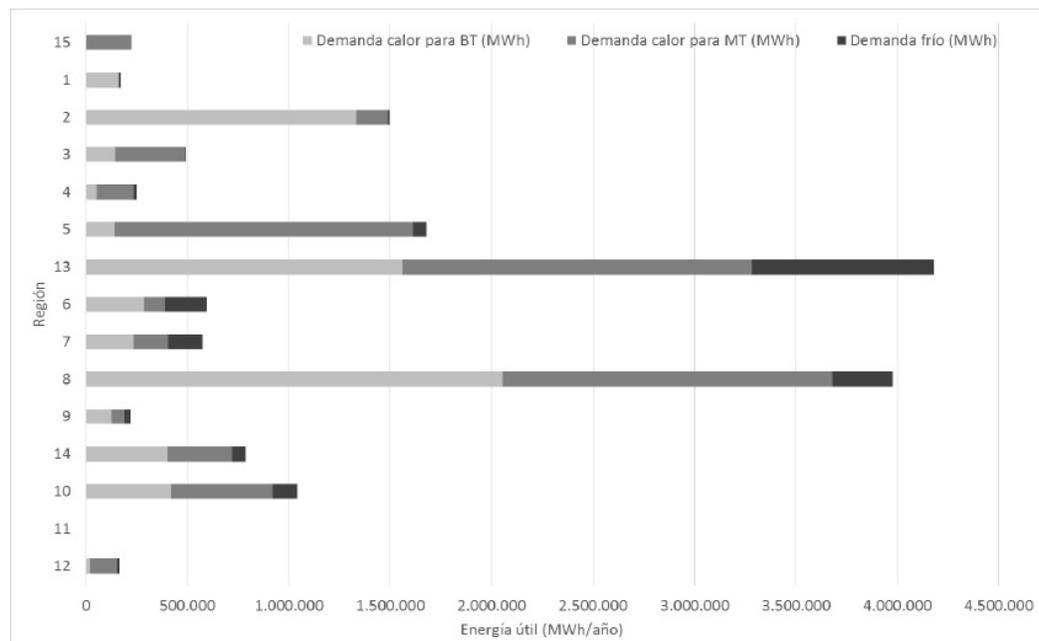
industriales se localizaban en la Región Metropolitana, mientras el resto se distribuía de forma relativamente homogénea, aunque con mayor presencia en la zona central del país (Regiones V a X). No había ninguna planta en la Región XI.

Figura 42:  
 Distribución de  
 número de  
 establecimientos  
 industriales  
 mineros y no-  
 mineros por región.  
 [22]



En la Figura 43 se presenta la cuantificación de estas demandas de la industria de cada región dividida en procesos de calor y frío, donde se aprecia que sólo algunas de las regiones poseen industrias con demanda de frío, mientras que todos poseen industrias con grandes demandas de calor.

Figura 43:  
 Demandas  
 energéticas con  
 niveles térmicos  
 por región [22]



En la Figura 44 se presenta la demanda de la industria en procesos de calor y frío por sector industrial. Los cuatro sectores industriales que requieren mayor refrigeración son: el alimentos, con una demanda de 1.555.301 MWh; papelera y celulosa con una demanda de 315.51 MWh; minerales no metálicos con una demanda 33.992 MWh, y química con una demanda de 702 MWh.

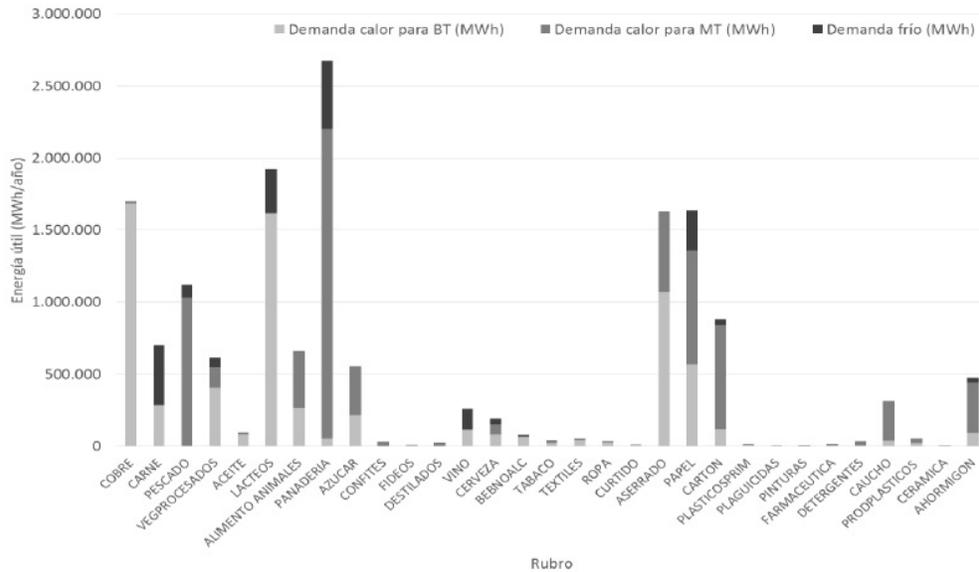


Figura 44:  
Demandas de Calor y Frío agregadas por Sector Industrial [22].

De este estudio se desprende que el 87% de la demanda térmica industrial es debido a requerimientos de calor, mientras sólo un 13% corresponde a demandas de frío. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en este estudio considera la actividad industrial manufacturera del país, que sólo incluye a la industria con procesos de transformación de los bienes, excluyendo los rubros industriales extractivos como la pesca, agricultura, actividad forestal.

## 5.4 Caso de estudio: Viña Miguel Torres

La única experiencia de refrigeración solar en el mercado chileno es un prototipo de un sistema de poligeneración solar instalado en la Viña de Miguel Torres [23,24]. Este prototipo es escalable y su objetivo es permitir aumentar su independencia energética de las empresas vitivinícolas y disminuir la huella de carbono asociada a sus procesos de producción de vino.

El proceso de fermentación alcohólica es uno de los procesos clave en la elaboración del vino, que pueden afectar significativamente la calidad del producto final. Las temperaturas aplicadas en esta etapa varían típicamente de 15 °C para los vinos blancos a más de 25 °C para los vinos tintos. Además, el proceso de producción tiene una estacionalidad: en verano se trabaja la fermentación del vino, mientras que en invierno se trabaja con el mosto, el

cual se mantiene caliente a una temperatura de 30 °C durante varios días en un proceso llamado maceración. El prototipo propuesto tiene como objetivo cubrir las necesidades energéticas de ambos procesos. En verano, para mantener la temperatura en los valores requeridos para la fermentación, se utiliza el campo solar y un ciclo de absorción para cubrir la demanda de frío para la refrigeración de los tanques de fermentación, tal y como se muestra en la Figura 45. En cambio en invierno la configuración del sistema cambia (Figura 46) y el proceso de maceración demanda calor, que se proporciona mediante el campo solar.

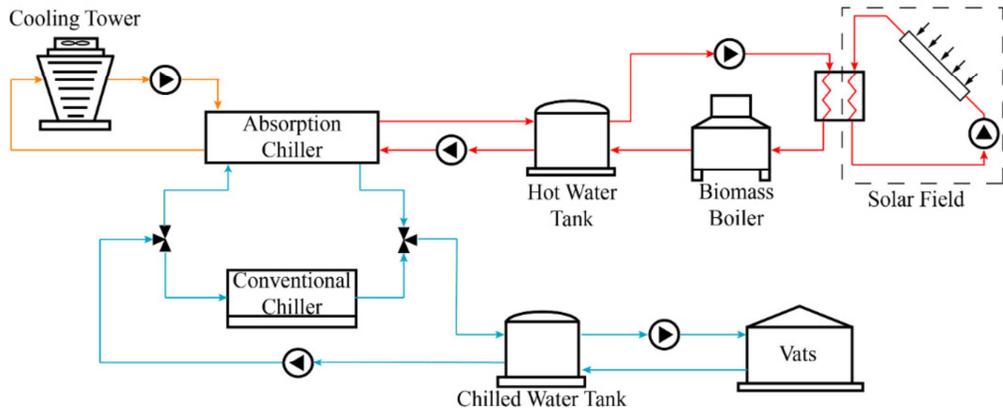


Figura 45: Esquema prototipo poli generación en la industria del vino modo verano [23]

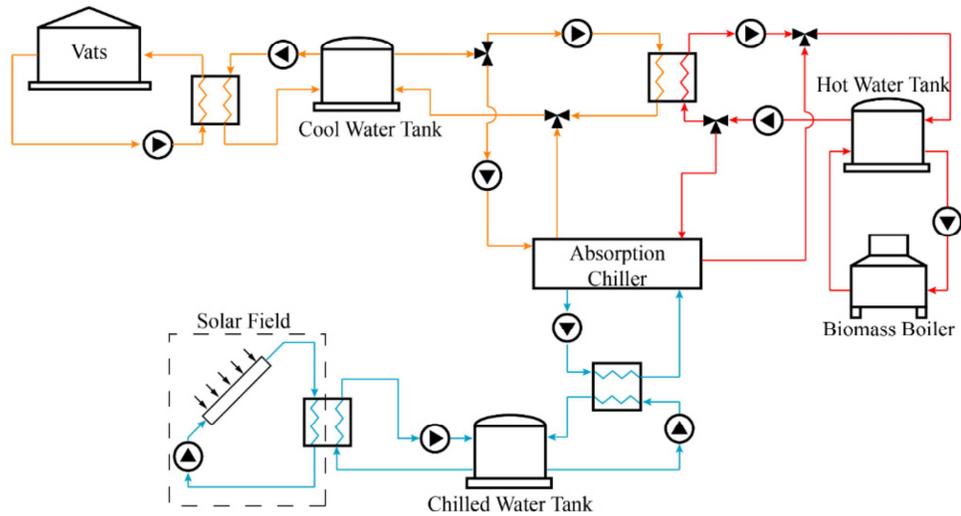


Figura 46: Esquema prototipo poli generación en la industria del vino modo invierno [23]

## 6 Conclusiones

El potencial de la refrigeración solar en el mundo en general y en Chile en particular, no está especialmente desarrollado. La demanda de frío industrial en Chile no es tan importante como la demanda de calor. Es especialmente relevante la demanda de frío de la industria de alimentación de la región metropolitana. En este informe se han presentado las tecnologías más importantes y se ha evaluado el mercado de la refrigeración solar, con objeto de evaluar si estas tecnologías pueden ser una respuesta a las necesidades del país.

Una de las ventajas de alimentar el proceso de refrigeración mediante energía solar es la coincidencia habitual entre los altos valores de radiación y la demanda de refrigeración. Por tanto, existen numerosas propuestas tecnológicas que combinan tecnologías solares por un lado y tecnologías de refrigeración por el otro. Entre estas tecnologías destacan habitualmente la combinación de paneles fotovoltaicos y un compresor y los ciclos de absorción combinados con colectores térmicos.

Habitualmente, la tecnología de PV con compresor de vapor es más económica y fácil de operar que las máquinas de absorción, por lo que su desarrollo está mucho más avanzado. Parte del problema en este desarrollo es la poca adaptación de los chillers comerciales a las particularidades de los sistemas solares, aunque el mercado está empezando a desarrollar alternativas en ese sentido.

Por tanto, se hace necesario impulsar desde los gobiernos la instalación de estos sistemas, que presentan ventajas más allá de las económicas, como la estabilidad de la red, el ahorro de energía, la reducción de emisiones CO<sub>2</sub>, o evitar usar refrigerantes dañinos con la capa de ozono. Proyectos como el desarrollado en la Viña Miguel Torres ayudan al ser ejemplo a seguir.

## 7 Referencias

- [1] M. Zeyghami, D.Y. Goswami, E. Stefanakos, A review of solar thermo-mechanical refrigeration and cooling methods, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51 (2015) 1428–1445. doi:10.1016/j.rser.2015.07.011.
- [2] C.A. Balaras, G. Grossman, H.-M. Henning, C.A. Infante Ferreira, E. Podesser, L. Wang, E. Wiemken, Solar air conditioning in Europe—an overview, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 11 (2007) 299–314. doi:10.1016/j.rser.2005.02.003.
- [3] A.M. Baniyounes, G. Liu, M.G. Rasul, M.M.K. Khan, Comparison study of solar cooling technologies for an institutional building in subtropical Queensland, Australia, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 23 (2013) 421–430. doi:10.1016/j.rser.2013.02.044.
- [4] P. Srihirin, S. Aphornratana, S. Chungpaibulpatana, A review of absorption refrigeration technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 5 (2000) 343–372. doi:10.1016/S1364-0321(01)00003-X.
- [5] K. Bataineh, Y. Taamneh, Review and recent improvements of solar sorption cooling systems, *Energy Build.* 128 (2016) 22–37. doi:10.1016/j.enbuild.2016.06.075.
- [6] T. Núñez, Thermally Driven Cooling: Technologies, Developments and Applications, *J. Sustain. Energy.* 1 (2010) 16–24. [http://www.energy-cie.ro/archives/2010/nr\\_4/v4-03\\_nunez\\_thomas.pdf](http://www.energy-cie.ro/archives/2010/nr_4/v4-03_nunez_thomas.pdf).
- [7] M. Beerepoot, P. Frankl, Technology Roadmap: Solar Heating and Cooling, Int. Energy Agency. (2012) 50.
- [8] I. Sarbu, C. Sebarchievici, General review of solar-powered closed sorption refrigeration systems, *Energy Convers. Manag.* 105 (2015) 403–422. doi:10.1016/j.enconman.2015.07.084.
- [9] D.S. Kim, C.A. Infante Ferreira, Solar refrigeration options - a state-of-the-art review, *Int. J. Refrig.* 31 (2008) 3–15. doi:10.1016/j.ijrefrig.2007.07.011.
- [10] D. Prigmore, R. Barber, Cooling with the sun’s heat - Design considerations and test data for a Rankine Cycle prototype, *Sol. Energy.* 17 (1975) 185–192.
- [11] F.. Biancardi, J.. Sitler, G. Melikian, Development and test of solar Rankine cycle heating and cooling systems, *Int. J. Refrig.* 5 (1982) 351–360. doi:10.1016/0140-7007(82)90057-3.

- [12] H. Wang, R. Peterson, T. Herron, Design study of configurations on system COP for a combined ORC (organic Rankine cycle) and VCC (vapor compression cycle), *Energy*. 36 (2011) 4809–4820. doi:10.1016/j.energy.2011.05.015.
- [13] I. Sarbu, C. Sebarchievici, Review of solar refrigeration and cooling systems, *Energy Build.* 67 (2013) 286–297. doi:10.1016/j.enbuild.2013.08.022.
- [14] A. Ghafoor, A. Munir, Worldwide overview of solar thermal cooling technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43 (2015) 763–774. doi:10.1016/j.rser.2014.11.073.
- [15] F.M. Montagnino, Solar cooling technologies. Design, application and performance of existing projects, *Sol. Energy*. (2016) 1–14. doi:10.1016/j.solener.2017.01.033.
- [16] P. Goyal, P. Baredar, A. Mittal, A.R. Siddiqui, Adsorption refrigeration technology - An overview of theory and its solar energy applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 53 (2016) 1389–1410. doi:10.1016/j.rser.2015.09.027.
- [17] H. Henning, Solar Air -Conditioning and Refrigeration Solar Cooling Position Paper, (2011) 1–20.
- [18] W. Sparber, A. Napolitano, G. Eckert, A. Preisler, State of the art on existing solar heating and cooling systems, 2012.
- [19] D. Mugnier, Task 53: The Future of Solar Cooling, SHC Task 53 New Gener. *Sol. Cool. Heat.* (2016) 15–18. doi:10.1016/S1369-7021(04)00087-2.
- [20] Data collection on innovative solar cooling and heating systems, n.d.
- [21] U. Jakob, Recent Developments Of Small-Scale Solar Or Waste Heat Driven Cooling Kits For Air-Conditioning And Refrigeration, (2008) 2–7.
- [22] Appsol, WP5. Simulaciones energéticas. Resultados, (2014).
- [23] C. Murray, G. Quiñones, F. Cortés, R. Escobar, J.M. Cardemil, Solar Assisted Absorption Machine for the Fermentation Cooling and Maceration Heating Processes in the Winemaking Industry, *Energy Procedia*. 91 (2016) 805–814. doi:10.1016/j.egypro.2016.06.247.
- [24] J.M. Cardemil, R. Escobar, G. Quiñones, C. Cortés, A. Pino, A. Häberle, C. Tenreiro, Combined Generation of Heat and Cooling for a Winemaking Process Using a Solar-Assisted Absorption Chiller, *Conf. Proceedings, Sol. World Congr. In Press* (2015) 8–12. doi:10.18086/swc.2015.10.43.

**Fraunhofer Chile Research**  
**Center for Solar Energy Technologies (CSET)**  
Centro de Innovación UC Anacleto Angelini, Piso 8  
Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

[www.fraunhofer.cl](http://www.fraunhofer.cl)

Proyecto apoyado por:

