



Sistemas de climatización solar de absorción. Barreras y perspectivas

Absorption solar cooling systems. Barriers and prospects

Yamile Díaz - Torres^{a*}, José Pedro Monteagudo - Yanes^a

Recibido: febrero 25 de 2014
Recibido con revisión: mayo 20 de 2014
Aceptado: junio 6 de 2014

^{a*}Centro de Estudio de
Energía y Medio Ambiente
(CEEMA), Universidad de
Cienfuegos "Carlos Rafael
Rodríguez", Cienfuegos, Cuba,
Carretera Rodas Km1/2, Cuatro
caminos, Municipio Cienfuegos,
Provincia Cienfuegos.Cuba
Tel.: 53-43-500137
e-mail: ydtorres@ucf.edu.cu

RESUMEN

Climatizar mediante el uso de fuentes de energías renovables, como la energía solar, contribuye a la búsqueda de soluciones frente a los problemas energéticos y ambientales que azotan a la humanidad. Este documento ofrece una visión sintetizada de una variante de "frío solar", la climatización por absorción. En el mismo se explican los fundamentos termodinámicos, características de sus elementos principales, análisis de mercado, los costos actuales y prospectivos. Además se exponen barreras que impiden el crecimiento de esta tecnología. Por último se hace alusión a ejemplos prácticos de instalaciones en algunos países.

PALABRAS CLAVES

Climatización por absorción; frío solar; barreras.

ABSTRACT

Weatherize by using renewable energy sources such as solar energy contributes to finding solutions to energy and environmental problems plaguing mankind. This document provides a synthesized view of a solar cold alternative, the absorption cooling. In the same are explained: thermodynamic fundamentals, characteristics of its main elements, market analysis, current and prospective costs. Also barriers to the growth of this technology are presented, and finally are made referring to practical examples of installations in some countries.

KEYWORDS

Absorption cooling; solar cooling; barriers.

Energética 43, junio (2014), pp. 31-43

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)
www.revistas.unal.edu.co/energetica
© Derechos Patrimoniales
Universidad Nacional de Colombia



1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las necesidades de confort térmico en edificaciones generan un fuerte incremento en el consumo de electricidad así como el impacto ambiental directo e indirecto que acarrear los sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor. El crecimiento de la demanda es atribuible al aumento de la temperatura ambiente, mayores expectativas de confort, la percepción que el enfriamiento contribuye a una mayor productividad, y el aumento de las cargas internas de los equipos electrónicos. En este escenario, la refrigeración por absorción accionada a través de fuentes de energía renovable, representa una alternativa interesante frente a las técnicas convencionales de generación de frío. Estos sistemas presentan como ventajas: [SOLCASA, 2010], [Agencia andaluza de la energía consejería de economía, innovación y ciencia, 2011].

- Que las épocas de mayor demanda térmica coinciden con las de mayor recurso solar
- Ahorros notables en el consumo de energía primaria y reducción de emisiones de CO_2
- La disminución de la demanda de la red eléctrica pública, tanto en términos de energía pico como de electricidad, contribuyendo a la estabilización de la red.
- La utilización del calor solar combinado para calentar, refrigerar y obtener agua caliente sanitaria, permitiendo una alta utilización del sistema térmico solar durante todas las estaciones.
- La no utilización de refrigerantes peligrosos para el medio ambiente.
- La reducción de ruidos y vibraciones comparadas con las tecnologías clásicas de compresión de vapor.

Las tecnologías de refrigeración solar utilizan este recurso como energía motriz para ejecutar un circuito abierto o un ciclo termodinámico cerrado para producir frío. De las mismas se distinguen: la de secante como circuito abierto y de absorción o adsorción en un circuito cerrado. En la actualidad los sistemas que predominan son las enfriadoras de absorción [Zhai, et al., 2011]. Estudios realizados sobre la base los resultados de la Solar [International Energy Agency, 2010] dió a conocer la existencia en operación de alrededor de 600 instalaciones en todo el mundo [Mugnier, 2011]. Además [Fong, et al., 2010] mostró que el proceso de secante sólido y líquido consume más energía primaria que en el proceso de absorción junto con los colectores planos. Por lo tanto este estudio se centrará especialmente en la tecnología de absorción solar.

Sin embargo, el frío solar o refrigeración solar, aunque es una tecnología ya madura, su nivel de introducción en el mercado y su aceptación por parte del público son más bien bajos [Solco, 2009]. Esto es debido al número

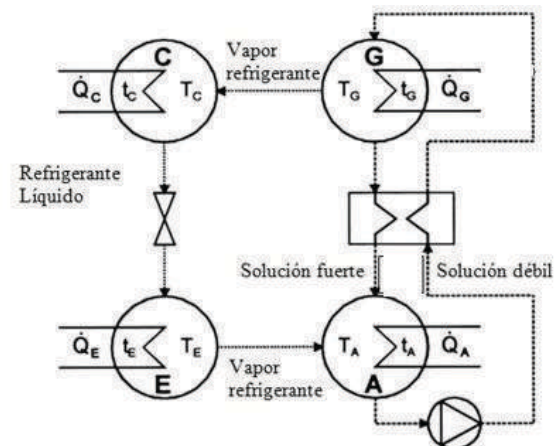
de barreras no tecnológicas a las que tiene que hacer frente. Una de esas barreras es el desconocimiento y la falta de divulgación por lo que el objetivo de este trabajo es ofrecer una visión sintetizada de la climatización por absorción asistida por energía solar y contribuir a la cultura general del uso y ventajas de esta tecnología.

2. SISTEMAS DE ABSORCIÓN

Los equipos de absorción, al igual que los de compresión de vapor, se basan en el principio de condensación y evaporación de un refrigerante para la obtención de frío o calor. La principal diferencia entre estos ciclos reside en el proceso en el cual dicho fluido se trasvasa desde la zona de baja presión a la zona de alta presión. Los sistemas de absorción es una de las tecnologías más antiguas de refrigeración, siendo la primera evolución iniciada en el siglo XVIII. Se observó que en presencia del H_2SO_4 (ácido sulfúrico) se podía fabricar hielo a través de la evaporación de agua pura dentro de un recipiente. En 1859, un ingeniero francés llamado Ferdinand Carré diseñó una instalación que utilizaba como fluido de trabajo el par amoníaco / agua ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$). En 1950, un nuevo sistema se introdujo el par bromuro de litio / agua ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$), como fluido de trabajo con fines comerciales [Zhai, et al., 2011].

Tal y como se ha comentado anteriormente, en el caso de los ciclos de compresión de vapor dicho trasvase se debe a la acción mecánica de un compresor. En el caso de un sistema de absorción, el refrigerante vaporizado en la zona de baja presión es absorbido por una solución que tiene afinidad fisicoquímica a dicho fluido y es conocido como absorbente. La mezcla líquida resultante es bombeada a la zona de alta presión, donde el refrigerante es extraído de nuevo de la solución mediante la aportación de calor. En la figura 1 se muestran los 4 circuitos principales que componen una enfriadora de absorción de simple efecto con la sustancia de trabajo $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$. [Albert, et. al, 2008] G generador, A absorbedor. E evaporador, C condensador,

Figura 1. Esquema general de circulación de una máquina de absorción de simple efecto.



Fuente. [Albert, et. al, 2008]

El fluido caliente proveniente de una fuente térmica Q_G produce la ebullición de la solución de $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ y posteriormente conduce el vapor de agua generado (refrigerante) hacia el condensador. En el condensador, el vapor es enfriado y condensado por el agua de la torre con temperaturas de entre 24 y 31 °C. La torre extrae el calor tanto del condensador como del absorbedor (Q_C). El refrigerante condensado, es dirigido en forma líquida al evaporador a través de una válvula de expansión que mantiene la baja presión en el evaporador y el absorbedor, lo que provoca que el agua evapore a baja temperatura.

Por otro lado, la corriente de agua a enfriar entra al evaporador a temperaturas entre 6 y 12 °C, lo que constituye un gradiente de temperatura suficiente para evaporar el refrigerante procedente del condensador; a la vez que se provoca el enfriamiento de la corriente de agua que pasa por el evaporador (Q_E). De forma simultánea, la solución en el absorbedor procedente del generador atrapa el vapor de agua y se obtiene una solución diluida de $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ que es llevada por medio de una bomba al generador. Posteriormente pasa a través de un intercambiador de calor que tiene la función de enfriar la solución procedente del generador y calentar la solución que va hacia el generador, con lo que se obtiene una integración energética interna. Finalmente, la solución diluida llega al generador para iniciar de nuevo el ciclo.

Cuando en las mezclas de trabajo el absorbente es relativamente volátil como sucede con Amoníaco-Agua ($\text{H}_2\text{O-NH}_3$), es necesario emplear un rectificador ubicado entre el generador y el condensador, para evitar que lleguen gotas de agua al condensador y al llegar a la válvula de expansión se congelen e inhabiliten dicha válvula [Hassan & Mohamad, 2012].

2.1 Mezclas de trabajo para las máquinas de absorción

El funcionamiento y la eficiencia de los ciclos de absorción están directamente correlacionados con las propiedades químicas, termofísicas y termodinámicas de los fluidos de trabajo. El margen de miscibilidad en la fase líquida dentro del alcance de temperatura operativa del ciclo de absorción es uno de los requerimientos

fundamentales para la combinación refrigerante/absorbente. Esta elección es determinada por varias propiedades necesarias o deseables. [Herold et al., 1996] las resume en su libro de la siguiente manera: “para el refrigerante; alto calor latente, presión de vapor moderada, baja temperatura de congelación y baja viscosidad. Para el absorbente: baja presión de vapor y baja viscosidad. Para la mezcla: no llegar a solidificarse, baja toxicidad y alta afinidad entre refrigerante y absorbente”. Los pares absorbente-refrigerante más utilizados en la tecnología de absorción son $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ y $\text{H}_2\text{O-NH}_3$, aunque también se pueden encontrar otras mezclas $\text{LiCl-H}_2\text{O}$, $\text{LiNO}_3\text{-NH}_3$, $\text{NH}_3\text{-NaSCN}$, etc

2.2 Coeficiente de funcionamiento (COP) de los ciclos de absorción.

La eficiencia del ciclo de absorción puede ser mejorada si a la configuración básica se le añaden uno o más componentes a presiones o concentraciones distintas. De acuerdo al número y al tipo de componentes, los equipos de absorción pueden clasificarse de acuerdo al número de efectos y etapas. El número de efectos hace referencia al número de intercambiadores que se utiliza para generar vapor refrigerante. Si la máquina es de simple efecto, solo tiene un generador, si es de doble efecto, tiene dos generadores, y así sucesivamente. Por otro lado, el número de etapas hace referencia a la cantidad de absorbedores que tiene. Si la máquina es de simple etapa, significa que solo tiene un absorbedor, si es de doble etapa, tiene dos absorbedores. La Tabla 1 presenta la variación del COP para enfriadoras de absorción de efecto mitad, simple efecto, doble efecto, triple efecto, en dependencia de la temperatura de activación y el par refrigerante utilizado.

Uno de los atractivos de los sistemas de absorción es que pueden utilizar cualquier fuente de energía térmica para activar el sistema. Se usa el calor residual, el calor

Tabla 1. Variación del COP para diferentes enfriadoras de absorción.

Parámetro/ Fluido	LiBr-H ₂ O				H ₂ O-NH ₃		H ₂ O-LiCl	NH ₃ -LiNO ₃
	Simple	Doble	Triple	Mitad	Simple	GAX ¹	Simple	Simple
Rango de temperatura generador (°C)	70-120	120-170	200-250	50-70	70-140	150-220	65-110	80-110
COP	0.6-0.75	1.1-1.3	1.4-1.7	0.3-0.35	0.5-0.7	0.7-0.9	0.6-0.7	0.6-0.7
GAX ¹ : Este ciclo no es más que una mejora del ciclo de simple efecto H ₂ O- NH ₃ que trata de aprovechar el solapamiento de temperaturas entre generador y absorbedor cuando la temperatura del primero es lo suficientemente alta, para transferir energía desde la parte caliente del absorbedor hacia la parte fría del generador, reduciendo así la necesidad de aporte energético exterior y mejorando el rendimiento del ciclo								

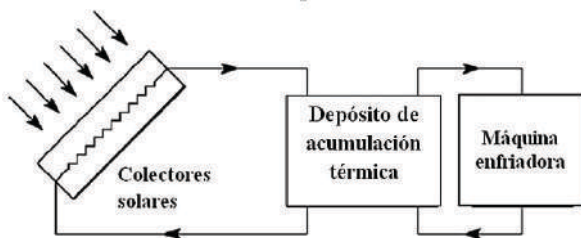
Fuente. Larbus & Corona, 2013.

procedente de la producción combinada de calor y energía mecánica o eléctrica (cogeneración) y el calor solar [Sarbu & Sebarchievici, 2013].

3. SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN POR ABSORCIÓN ASISTIDO CON ENERGÍA SOLAR

Una instalación típica de climatización solar térmica, Figura 2, consta del campo de captadores solares, depósito de acumulación térmica, unidad de control, tuberías, bombas y una máquina enfriadora accionada térmicamente. Las enfriadoras son el núcleo de la instalación. Si los captadores solares suministran la energía de entrada necesaria (agua caliente), las enfriadoras son las máquinas capaces de producir agua fría.

Figura 2. Esquema de un sistema de climatización solar térmica.



Las principales características de las máquinas existentes en el mercado son dadas en la Tabla 2.

La mayoría de las máquinas de absorción disponibles en el mercado requieren de una bomba para el transporte de la solución diluida desde el absorbedor hasta el generador. El consumo eléctrico de esta bomba

es aproximadamente de un 1-5 % de la potencia de refrigeración total.

Con el fin de acomodar las variaciones de la oferta y demanda de climatización y permitir el uso de estos sistemas cuando se haya acabado la disponibilidad solar, se requiere el almacenamiento de energía. El depósito de acumulación de agua caliente ubicados entre el campo solar y la máquina permite almacenar la energía adicional proveniente del campo solar y estabiliza el funcionamiento del sistema, además el mismo permite la integración de un sistema de apoyo.

El almacenamiento térmico de agua fría también es otra opción, sus ventajas fundamentales radica en la reducción de la capacidad de las máquinas enfriadoras instaladas, el funcionamiento eficiente y mayor flexibilidad de operación. En este caso para ser económicamente justificable, los costos anuales necesarios para cubrir los gastos operativos y de capital para un tanque frío (y los sistemas relacionados) deben ser inferiores a los costos a la máquina que suministre igual carga de servicio [Ehyaei, et. al, 2010].

3.1 Colectores solares.

La correcta elección del tipo de colector solar depende principalmente de la temperatura de trabajo deseada y de las condiciones climáticas debido a que el rendimiento de los colectores disminuye a medida que la temperatura del fluido aumenta o disminuye la radiación disponible [Lorenzini, 2010]. Existen diversos tipos de captadores solares que, dependiendo de su tecnología y la temperatura de salida del fluido, se pueden clasificar en:

Captadores para aplicaciones de baja temperatura [inferior a 100°C) Sin cerramiento o cubierta de vidrio: para las instalaciones destinadas exclusivamente a la producción de agua caliente sanitaria. Con cerramiento o cubierta de vidrio, del tipo:

- Planos (FPC): es el tipo de colector más sencillo que se utiliza

Tabla 2. Características principales de las actuales enfriadoras térmicas en el mercado.

Proceso	Enfriadora de absorción	
Etapas	Simple efecto	Multi efecto
Alimentación	Agua caliente o sobrecalentada	Agua o vapor sobrecalentado
Disponibilidad en el mercado	< 35 kW mercado incipiente 35 kW-100 kW algunos fabricantes >100 kW amplio mercado	> 100 kW amplio mercado
Fabricantes	Climatewell, Sonnenklima, Schuco, Yazaki, Broad, EAW, Carrier, Trane, York, LG Machinery, Sanyo-McQuay, Entropie, Thermax,...	
Colectores solares utilizados	Colectores planos de superficie selectiva Tubos de vacío CPC (con concentrador cilindro-parabólico compuesto)	PTC (colectores cilindro-parabólicos)

Fuente. Instituto para la diversificación de la energía. (2011). Evaluación del potencial de climatización con energía solar térmica en edificios.

para transformar la energía solar en calor. El fluido que circula por el interior del absorbedor es generalmente agua (a menudo con aditivos anticongelantes), aunque es posible utilizar otros fluidos (e incluso vapor), dependiendo de la aplicación y la temperatura de operación necesaria. En un intento de controlar al máximo las pérdidas, estos colectores incorporan diferentes tecnologías: Absorbedores de superficie selectiva y cubierta simple /doble; barreras de convección.

- De vacío (ETC): Como su nombre indica, los colectores de tubo de vacío están formados por hileras de tubos de cristal conectados en paralelo a una tubería de cabecera. En cada uno de estos tubos se ha realizado el vacío a fin de reducir al máximo las pérdidas de calor. Su geometría tubular es necesaria para soportar la diferencia de presión entre la atmósfera y el vacío del interior. Los colectores de tubos de vacío se pueden clasificar en dos grandes grupos: Tubos de flujo directo: el fluido caloportador fluye por el interior del absorbedor. Tubos tipo heat pipe: la transferencia de calor entre el absorbedor y el fluido caloportador se realiza mediante un fluido de trabajo, siguiendo el principio del heat-pipe.

Captadores para aplicaciones de media (entre 100 oC y 400 oC) y alta temperatura.

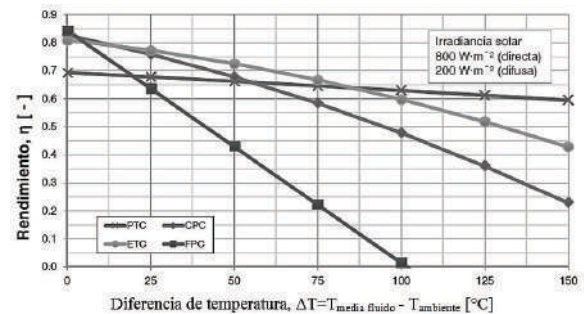
- Captador parabólico compuesto (CPC): Estos sistemas buscan reducir las pérdidas del captador solar disminuyendo el área del absorbedor con respecto del área de captación. Esto es posible gracias a que las pérdidas de calor son proporcionales al área del absorbedor, pero no a la de captación (apertura). La mayor concentración de radiación se obtiene mediante el uso de reflectores que, después de una o más reflexiones, fuerzan la radiación incidente dentro de un cierto ángulo (llamado ángulo de aceptación) en la dirección del absorbedor.
- Captadores cilindro-parabólicos (PTC): Se clasifican en función de cómo realizan el seguimiento del sol: Seguidores de un solo eje con foco lineal, que pueden seguir la trayectoria del sol únicamente a lo largo de su ángulo de elevación sobre el horizonte. Seguidores de dos ejes con foco puntual (discos parabólicos, heliostatos y hornos solares) los rayos solares son siempre perpendiculares a la superficie del colector. Los sistemas con un foco puntual son utilizados únicamente en aplicaciones que requieran temperaturas superiores a 400 °C.

El sistema de energía solar térmica, se puede diseñar con distintos tipos de colectores solares, entre estos, es preferible optar por los de placa plana o los de tubos al vacío debido a que tienen mayor presencia en el mercado y son los más económicos. El rendimiento de los captadores solares está estrictamente relacionado con la temperatura de operación del sistema.

En la Figura 3 se ha representado la variación del rendimiento de cuatro captadores solares en función de la diferencia de temperatura media del fluido y la temperatura ambiente. Se ha asumido que el valor de la irradiancia directa es igual a 800 W/m² mientras que la difusa es igual a 200 W/m². Se observa que el rendimiento pico de los captadores parabólicos compuesto (CPC), tubos de vacío

(ETC) y de placa plana (FPC) es superior al rendimiento pico del captador cilindro parabólico (PTC). A medida que la diferencia de temperaturas (ΔT) aumenta, las pérdidas de calor se incrementan en los captadores sin seguimiento y por tanto, el rendimiento disminuye.

Figura 3. Rendimiento instantáneo de diferentes tipos de colectores.



Fuente. Instituto para la diversificación de la energía. (2011). Evaluación del potencial de climatización con energía solar térmica en edificios.

3.2 Metodología para el diseño de una instalación de frío solar.

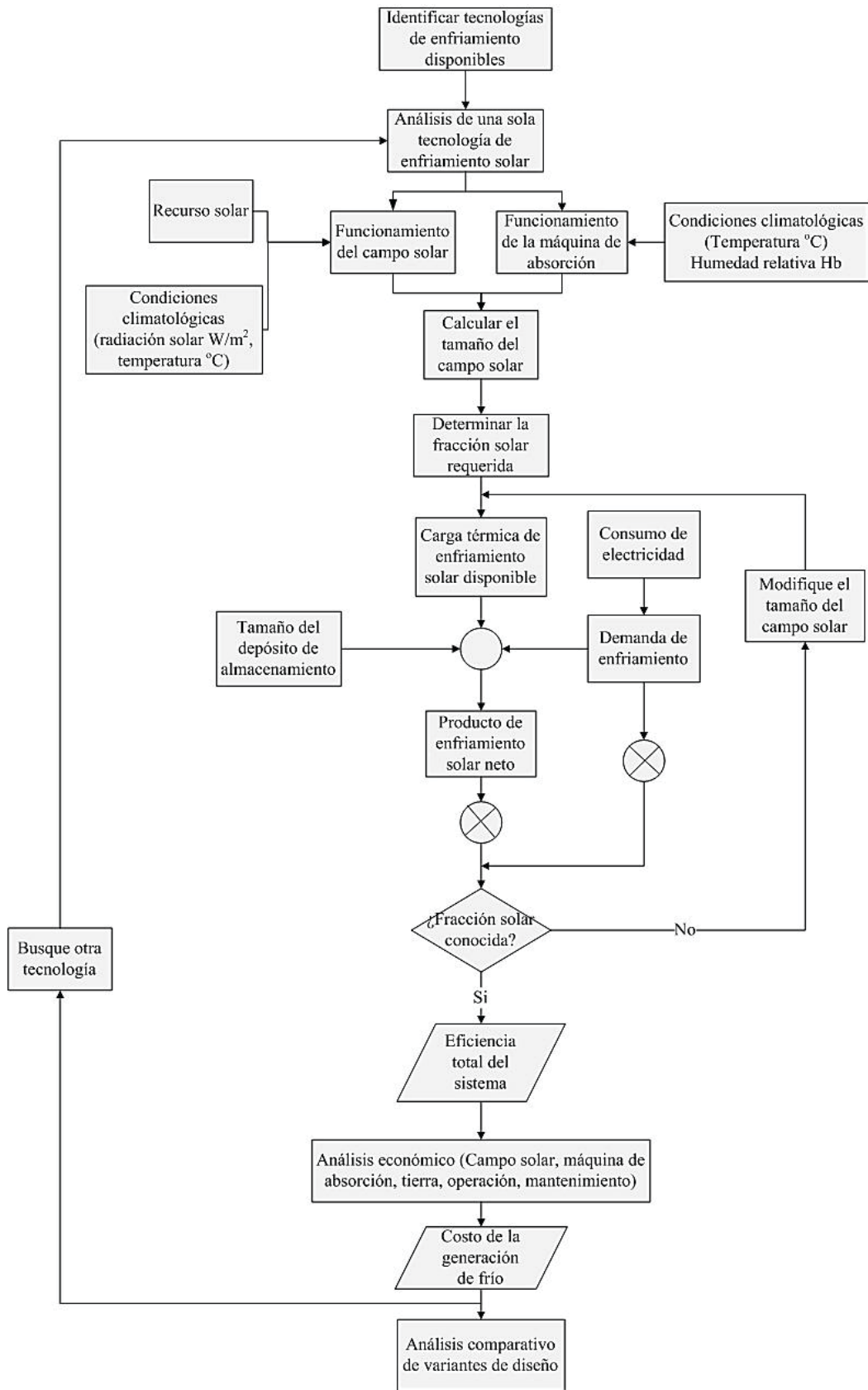
Para el dimensionamiento de las instalaciones de energía solar térmica debe tenerse en cuenta como dato de partida, las cargas térmicas a vencer, descripción del edificio, características ocupacionales y funcionales (caracterización energética, patrones de consumo etc). Disponer de datos meteorológicos fiables, condiciones tecnológicas del equipamiento seleccionado, cobertura solar, costos y concluyendo con un [Mokhtar, et. al, 2010] confeccionó un procedimiento a seguir en el cálculo y dimensionamiento de un sistema de frío solar, que se muestra en la Figura 4:

Este algoritmo permite simular el rendimiento del sistema de refrigeración solar por hora a lo largo de un año para las tecnologías a considerar, teniendo en cuenta las variaciones de la oferta de refrigeración solar y la demanda a suplir (carga térmica de la instalación a climatizar). A través de la simulación, los tamaños requeridos para el campo solar se evalúan en base a la fracción solar estipulada y los supuestos de almacenamiento térmico. Además valora diferentes combinaciones de sistemas de climatización solar.

3.3 Costos de instalaciones de climatización solar.

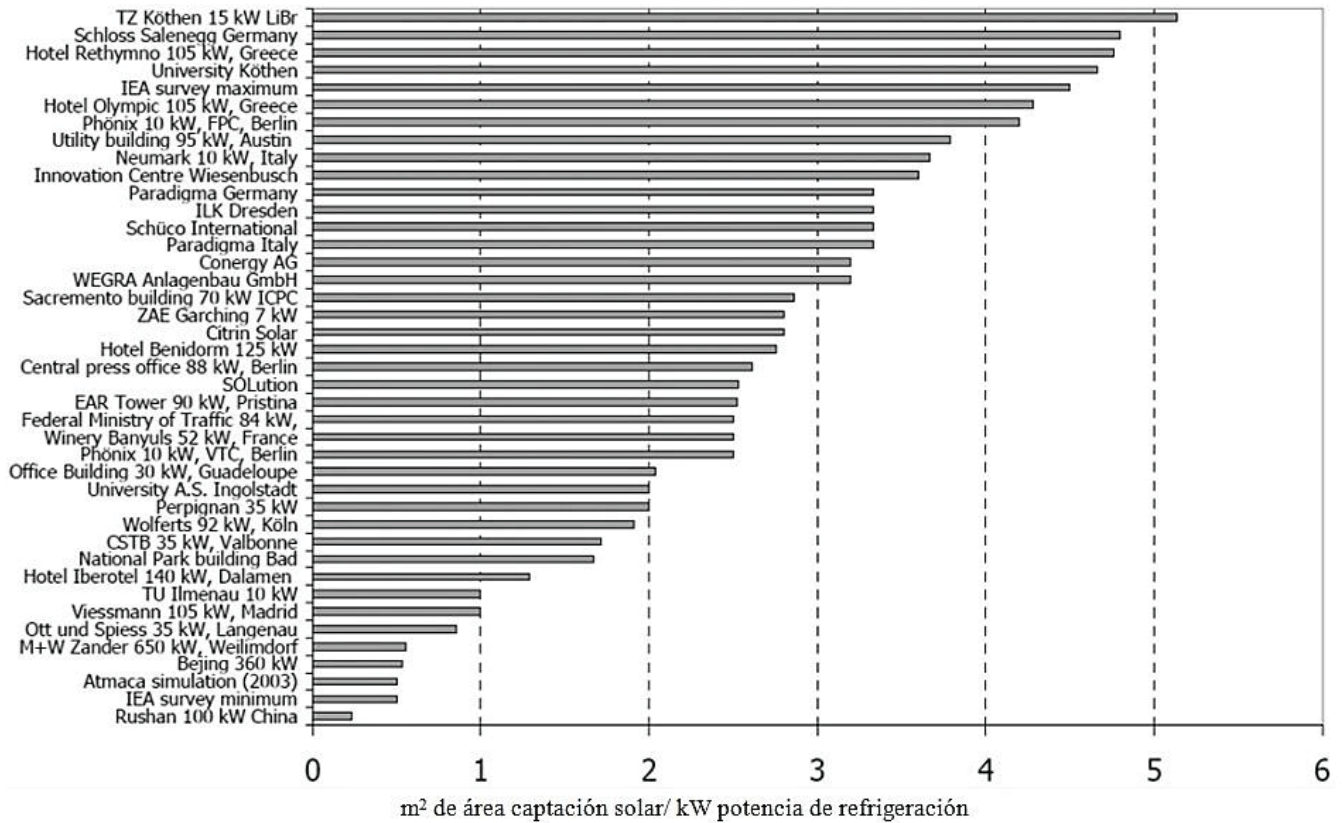
El costo de una instalación de absorción está en función directa del diseño de todo el sistema, las condiciones meteorológicas de la región y la elección de la tecnología [Larbus, et al., 2013], variando constantemente al cambiar las relaciones entre la superficie de colectores

Figura 4. Algoritmo utilizado en la evaluación de las tecnologías de refrigeración solar.



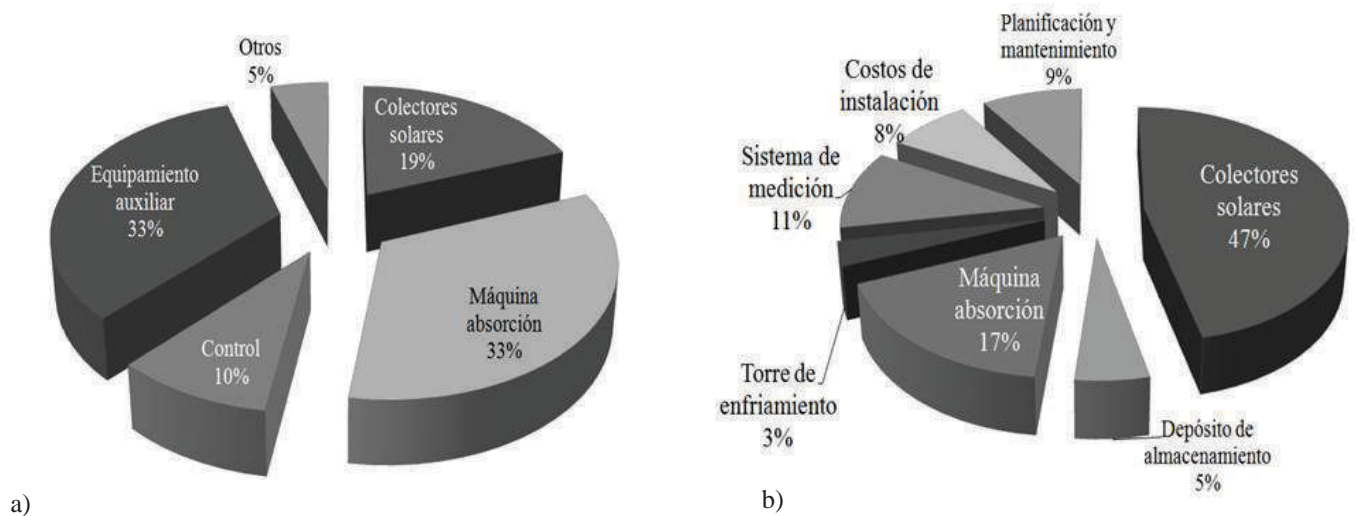
Fuente. Mokhtar M. et al., 2010.

Figura 5: Superficie del colector por kW de potencia de refrigeración en varios proyectos de demostración.



Fuente. Eicker & Pietruschka, 2009.

Figura 6. Distribución de los costos en sistemas de refrigeración por absorción asistidos por energía solar.
a) Instalaciones menores 15 kW b) Instalaciones mayores



Fuente. Larbus, Bruno & Coronas, 2013. (Navarro & Ehrismann, 2012]

solares y carga de climatización, o volumen de almacenamiento como se observa en la Figura 5.

Las tecnologías que utilizan energía solar se caracterizan generalmente por altos costos iniciales y bajos costos de operación

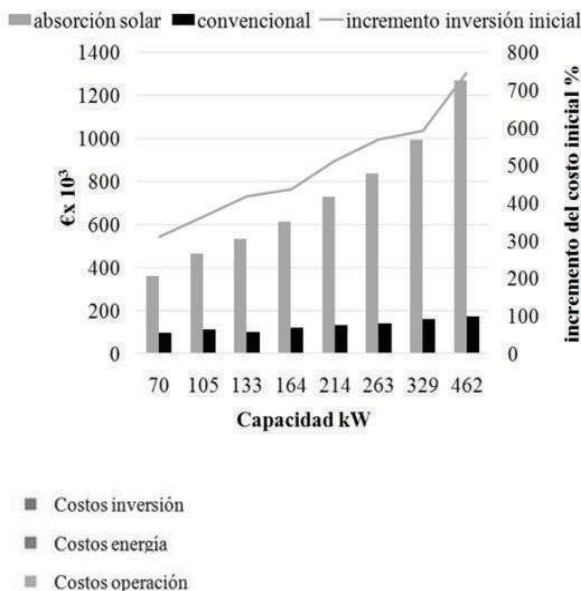
[Tsoutsos, et al., 2010]. Convirtiéndose en un obstáculo importante para su amplio despliegue. En promedio, la inversión de capital representa más del 85% de los costos de generación de frío. Las contribuciones de los principales componentes del costo de capital

determinada por estudios de diversos casos para instalaciones menores de 15 kW [Larbus, et. al, 2013], [Rococo project final report, 2008] y para instalaciones mayores [Climasol, 2005], [Navarro & Ehrismann, 2012] como se muestran en la Figura 6.

Una de las dificultades de las instalaciones de pequeñas escala es la escasa presencia de máquinas de pequeñas potencia en el mercado, el costo de estas unidades de frío disminuyen con el incremento de su capacidad [Rococo project final report, 2008]. No así en otras donde el mayor peso recae en el campo de captación solar debido a las grandes potencias caloríficas que demanda la máquina de absorción. Aunque el costo específico decrece con el incremento de la capacidad como puede observarse en la Tabla 3.

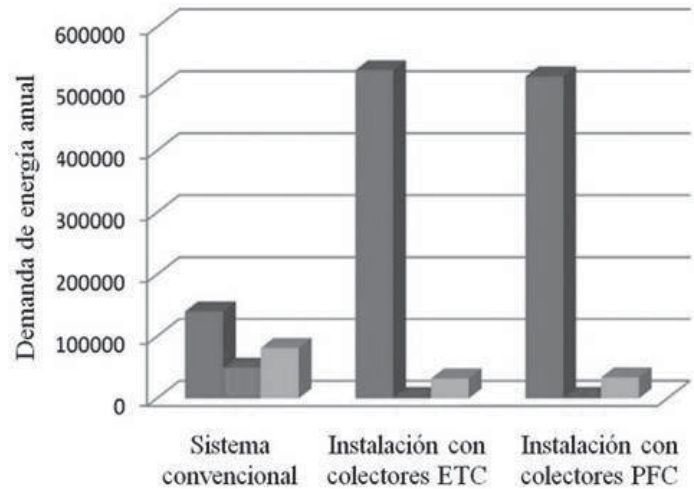
En comparación con los sistemas convencionales de refrigeración, estos sistemas son caros, tal y como se observa en las Figuras 7 y 8, siendo desfavorables en términos de costo-efectividad. Como resultado, es muy difícil promover los sistemas de refrigeración solar fuera del sector público y los proyectos deben centrarse en los beneficios ambientales del uso de la energía solar más que en la rentabilidad. [Rococo project final report, 2008], [Ghaith & Abusitta, 2014]

Figura 7. Comparación de los costos de inversión de instalaciones de absorción solar vs plantas convencionales.



Fuente. [Rococo project final report, 2008]

Figura 8. Comparación de los costos generales de instalaciones de absorción vs planta convencional x.



Fuente. Ghaith & Abusitta, 2014.

3.3.1 Evolución esperada de los costos de generación

Como se aprecia en la Tabla 4, en la tecnología solar térmica se espera una reducción de los costos de generación de entre un 20 y un 25% en los años del 2010-2030, dependiendo del escenario de reducción de costos que a su vez depende en gran medida del grado de desarrollo del sector. (Instituto para la diversificación de la energía. Evolución tecnológica y prospectiva de costos de la energías renovables. 2011].

Tabla 4. Evolución de los costos en la producción de calor y frío.

Tamaño de la instalación	Costo medio de la producción (c€2010/kWh)		
	2010	2020	2030
10 kW	17.5-18.6	14.3-15.1	11.5-12.1
300 kW	12.7-14.7	10.4-11.8	8.3-9.4

Fuente. Elaboración propia.

Los principales incentivos para la reducción de costos en el sector de la energía solar térmica están dados en:

- Aumento del tamaño de las instalaciones con la consiguiente disminución del costo de inversión por efecto de la escala.
- Reducción del costo de los captadores y del campo de captación por ajuste de márgenes, desarrollo tecnológico y mejoras en el diseño.
- Reducción del costo del sistema de bombeo e intercambio y de regulación y control por la bajada de márgenes debido al desarrollo del mercado y al desarrollo tecnológico.

La evolución por sistemas sería [Instituto para la diversificación de la energía. Evolución tecnológica y prospectiva de costos de la energías renovables. 2011]: Reducción del 20% del costo del captador y del campo de captación. Entre el 10-20% en el sistema de acumulación de las instalaciones, siendo esta reducción de un 10% para instalaciones más pequeñas (~10 kW) y de un 20%

Tabla 3. Resumen de los costos de inversión de instalaciones de climatización por absorción y colectores de placa plana.

Capacidad instalación kW	70	105	133	164	214	263	329	462
Áreacaptación solar m ²	210	315	400	493	642	789	987	1 386
Costos de inversión €	362 089	463 136	531 062	612 962	727 269	835 605	994 003	1 268 039
Incremento relativo * %	311	362	417	436	511	568	591	745
Costo específico (colectores solares) €/m ²	1 724	1 470	1 328	1 243	1 133	1 059	1 007	915
Costo específico (instalación solar) €/kW	5 173	4 411	3 983	3 730	3 398	3 177	3 021	2 745
* Incremento relativo en planta de refrigeración solar: comparación entre los costes de inversión de una instalación de climatización por absorción solar y una planta convencional								

Fuente. (Rococo project final report, 2008)

para instalaciones más grandes (~100 kW). Entre el 10-20% en el sistema de bombeo e intercambio de las instalaciones, siendo esta reducción de un 10% para instalaciones más pequeñas (~10 kW) y de un 20% para instalaciones más grandes (~100 kW). De un 5 hasta el 15% en el costo de la obra civil de las instalaciones, siendo esta reducción de un 5% para instalaciones más pequeñas (~10 kW) y de un 15% para instalaciones más grandes (~100 kW). Por último se esperan reducciones aproximadamente del 5% en los sistemas de regulación y control.

3.4 Ventajas medioambientales

Los impactos ambientales más importantes, producidos por los sistemas frigoríficos utilizados en climatización, son la destrucción del ozono atmosférico y el incremento del efecto invernadero.

La capacidad destructora de ozono de un refrigerante se evalúa a través de un parámetro adimensional relativo característico de cada refrigerante, denominado Potencial Destructor del Ozono (PDO), [McLinden, et. al, 2014]. También el Potencial de Efecto Invernadero Directo (PEID) generado por un sistema frigorífico

durante la vida del sistema es una característica propia del refrigerante. En la tabla 4 se tiene el PDO y el PEID en varios horizontes temporales de los refrigerantes utilizados en climatización, tomando como referencia el refrigerante CFC11. Hay que enfatizar que esto es solo en caso de que escapen a la atmósfera ya que en general las instalaciones de climatización son circuitos cerrados de alta hermeticidad en los que no debería de haber fugas.

Se deduce que la sustitución de los refrigerantes CFC's utilizados en compresión mecánica supone un importante paso para proteger el ozono estratosférico. Los sistemas de absorción de H₂O/BrLi y NH₃/H₂O no producen efecto invernadero directo. Siendo buenos candidatos para sustituir al CFC11 y CFC12 en climatización, pero también a sus sustitutos.

También los sistemas frigoríficos utilizados en climatización contribuyen al incremento de efecto invernadero de nuestro planeta de dos formas: por

Tabla 5. Potencial destructor del ozono y Potencial de efecto invernadero directo.

Refrigerante	Vida media estimada (años)	PDO	PEID 20 años	PEID 100 años	PEID 500 años
R11 (CFC 11)	45	1	6 330	4 680	1.400
R12 (CFC 12)	100	0.82	10 340	10 720	4.100
R22 (HCFC 22)	12	0.034	4 200	1 780	552
R123 (HCFC 123)	1.3	0.012	257	76	24
R134a (HFC)	14	~0	3 370	1 320	410
R-141b	9.3	0.086	2120	713	222
R-152a	1.4	~0	411	122	38
NH ₃		~0	<1	<1	<1
H ₂ O		0	0	0	0

Fuente. Calm, 2006.

un lado, con el PEID y por otro con el Potencial de Efecto Invernadero Indirecto, generado por el dióxido de carbono producido al quemar el combustible fósil necesario para generar la electricidad que consume la instalación de compresión mecánica. Este último suele tener un impacto mucho mayor. El Potencial Total de Efecto Invernadero es la suma de ambos efectos.

[Bukoski, et. al, 2014] realizó la evaluación del ciclo de vida a una instalación de climatización solar compuesta por un chiller de doble efecto y a una instalación convencional de compresión de vapor (CV). Se investigaron cuatro categorías de impacto: el potencial de efecto invernadero directo para 100 años, potencial de acidificación, potencial eutrofización, y el potencial de agotamiento de recursos abióticos. Los resultados arrojaron una reducción de estos parámetros en un 25,8; 40,1; 33,6 y 37,7 %, respectivamente, en comparación con los del sistema de CV. Se demostró además que los mayores ahorros de la climatización solar están en la fase de no-uso (extracción de materias primas, refinación, fabricación unidad, transporte y disposición final), y por lo tanto el sistema se encuentra en una posición más ventajosa para el medio ambiente.

3.5 Barreras que afectan la climatización solar por absorción

Hoy en día la tecnología de frío solar no es ni tan conocida ni está tan extendida como debería estarlo. Esta tecnología todavía no está introducida de forma significativa en el mercado del aire acondicionado. Diversas instituciones han identificado y verificado barreras de mercado [Mokhtar, et. al, 2010; Ehrismann, 2013]. A continuación se ofrecen algunas:

- Costos excesivos de los equipos de refrigeración por absorción, especialmente en los niveles de potencia relevantes para su aplicación al sector de la edificación.
- Falta de disponibilidad comercial de máquinas de absorción apropiadas para aplicaciones solares (alimentadas por agua) en el rango de potencias relevantes para las aplicaciones de climatización en el sector de la edificación.
- Desarrollo de mejores tecnologías que aumente el COP térmico y eléctrico global de las máquinas de absorción. Optimizar los ciclos, el sistema de refrigeración, y los sistemas de almacenamiento.
- Desarrollo de colectores solares que cubran el diferencial de temperatura actual entre 100°C y 250°C.
- Dependencia de la torre de refrigeración para disipar la energía residual de las máquinas de absorción en la mayoría de las aplicaciones. En varios países se está restringiendo de las mismas debido a enfermedades como la Legionela.
- Falta de disponibilidad de una caracterización

experimental adecuada de las actuaciones de la máquina de absorción en condiciones distintas a las de diseño y a carga parcial. Sólo unas pocas estaban monitorizadas y como resultado hay información limitada sobre su funcionamiento.

- Carencia de concienciación por parte de los usuarios potenciales (hoteles, hospitales y otros) sobre las posibilidades y beneficios de utilizar instalaciones de refrigeración solar.
- La mayoría de los técnicos (diseñadores, instaladores, personal de mantenimiento) no están familiarizados con la tecnología de refrigeración solar y por lo tanto no las ofertan a los usuarios potenciales. El bajo grado de estandarización y la falta de *know-how* en el diseño del sistema son obstáculos adicionales.
- Falta de criterios de integración arquitectónica durante el montaje de instalaciones solares, que minimicen el impacto visual.
- La reducción de impuestos y otros incentivos financieros para sistemas de energía solar térmica son limitados y claramente no suficientes para promover esta tecnología.
- Escasa penetración de Empresas de Servicios Energéticos (ESE). El potencial usuario tiene que afrontar largos periodos de amortización, asumiendo las incertidumbres sobre la rentabilidad del proyecto, sin ser necesariamente un especialista en instalaciones de producción de energía.

3.6 Ejemplos prácticos

El uso de enfriadoras térmicas activadas por energía solar ha sido analizado en el marco de varios proyectos durante los últimos 20 años tanto para refrigeración de edificios como para procesos industriales. Este es un mercado joven pero creciente. Actualmente en diferentes configuraciones y en una gran variedad de condiciones climáticas se pueden encontrar en todo el mundo. En la tabla 6 se exponen ejemplos reales de instalaciones.

4. CONCLUSIONES

Las opiniones de diversos actores, dadas en las consultas bibliográficas del presente trabajo, permiten concluir que la climatización por absorción asistida por energía solar es posible, fiable y económica.

Se pone de manifiesto que es una tendencia a nivel mundial el uso de la energía solar térmica para refrigeración como una vía idónea dada su eficiencia y bajo impacto ambiental para satisfacer las necesidades de aire acondicionado donde las condiciones climatológicas lo posibiliten.

A pesar de las ventajas expresadas son pocas las instalaciones en funcionamiento y bajo el nivel de introducción de la tecnología en el mercado.

Las barreras que más atentan al desarrollo y masificación de esta tecnología son los altos costos de las instalaciones y la falta de incentivos financieros y gubernamentales, resulta por ello vital el incremento de las labores de divulgación y aprendizaje en esta área del conocimiento.

Las instalaciones que han demostrado mayor efectividad son las

Tabla 6. Instalaciones de frío solar por absorción

Ubicación	Máquina de absorción (kW)	Captación solar (m ²)	Comentario
Universidad Carlos III de Madrid, España. Nave de Ingeniería Térmica y de Fluidos	LiBr/H ₂ O SE 35 kW	49.9 m ² FPC	en operación desde año 2000 Costo inversión 56000€, Subvención de 20000 €.
Escuela superior de ingenieros de Sevilla España	LiBr/H ₂ O SE 35kW	151,2m ² FPC	En operación desde 2001 Caldera auxiliar gas 50 kW Costo inversión 152 000 € Subvención de : 132 823€ Produce anualmente 42 MWh de energía frigorífica Emisiones de CO ₂ evitadas :18 ton/año
España Edificio Fundacional de Inditex	LiBr/H ₂ O SE 170 kW	1 626 m ² FPC	En operación desde 2003, Costo inversión 900000€ Subvención de :400 000 € Ahorra una media de 565 MWh anuales (15% del total de la energía consumida en la planta).
Turquía Hotel Iberotel Sarigerme Park	H ₂ O/LiBr DE 140kW	180 m ² PTC	En operación desde :2004 COP a plena carga de 1.30 , pero alcanza un COP 1.50 cuando trabaja a carga parcial La planta de refrigeración solar podría cubrir las necesidades completas de frío en el hotel pero debido al rendimiento del sistema, el suministro de energía solar óptimo está entre 40 y 80 % . Reduce el consumo de electricidad en un 30% al año. Reduce el consumo de gas natural en un 60% . El ahorro anual:200000 €
Nicosia, Chipre Panadería L' Amor Rouge	LiBr/H ₂ O SE 70.3 kW	120m ² ETC	En operación desde 2006 Porcentaje de autonomía superior al 59% Costo Inversión 134489 €. Subvención del 40% (53796 €) Payback: 8,1 años. La fracción solar estimada fue de 59,34% . Ahorro global de energía primaria anual:63,4MWh Emisiones de CO ₂ evitadas 22.44 ton
Saint Pierre Francia instituto tecnológico PIMENT Laboratory	LiBr/H ₂ O SE 30 kW.	90 FPC SCHUCO	Puesta en marcha :2006 COP en frío:0.41 Presenta dos tanques de acumulación térmica de capacidad de 1500 l agua caliente y 1000l agua fría. Los mismos provienen a la máquina 45 minutos de autonomía. No tiene sistema auxiliar Problemas ocurridos Sustitución de dos bombas de solución, el chiller recibió tratamiento anticorrosivo. la instalación no trabaja durante el invierno, durante este periodo el agua caliente no es útil
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla. España	LiBr/H ₂ O DE 174 kW	16 módulos de espejos reflectantes 352 m ² Captador Fresnel	Puesta en marcha: 2008. COP: 1,34. Sistema auxiliar: quemador de gas natural Porcentaje de refrigeración cubierto mediante la instalación de refrigeración solar: 41.86 % Emisiones de CO ₂ evitadas : 34 ton anuales Problemas detectados dilataciones en el captador solar y estanquidad en el circuito hidráulico. Elevadas inercias de la máquina de absorción que requieren la utilización del quemador de gas.

Long Island City EE.UU Fábrica de pianos Steinway & Sons	H ₂ O/LiBr DE 348kW	533 PTC PT-1	Puesta en marcha 2009 COP : 1.39 Este sistema permite climatizar y deshumidificar la fábrica. La configuración de esta planta también permite la producción de vapor de agua para utilizarlo en procesos industriales Este proyecto recibió financiación del Instituto de Investigación y Desarrollo del Estado de Nueva York (NYSERDA) para analizar la eficiencia de este tipo de sistemas en zonas de latitud alta (radiación solar baja).
Gurgaon India Solar Energy Center	H ₂ O/LiBr TE100 kW	288 m ² PTC	Puesta en marcha 2011 Planta experimental El sistema cuenta con depósitos de almacenamiento de agua caliente, agua fría y un sistema basado en materiales de cambio de fase
Canadá Oxford Gardens	H ₂ O/LiBr SE 105kW	526.3 m ² ETC	Puesta en marcha 2010 Es la instalación más grande de Canadá. Diseñada para District Heating and Cooling (Calefacción y refrigeración urbana). Se utiliza para climatización de piscina, agua caliente sanitaria, y climatización. Garantiza el ahorro del aire acondicionado hasta un 40%, o aproximadamente \$ 20,000 por año, para el ahorro de calor, hasta un 60% o aproximadamente \$ 40.000 por año.
Hermanidad Farmacéutica del Sureste, Hefame. Murcia. España	El proyecto desarrollará una instalación con 2,2 MW para calor y 1,53 MW para frío	3600 m ² ETC	El proyecto comenzó el verano del 2011 y se prolongará hasta el verano de 2014. El mismo valida un nuevo sistema de refrigeración por frío solar que logrará satisfacer más del 70% de las necesidades energéticas de grandes instalaciones de almacenamiento. El presupuesto del proyecto es de 6 700 000 €. La instalación permitirá ahorrar 794.827 kWh al año. Evitará la emisión de 186 toneladas de CO ₂ anuales
Qatar estadio Lusail Iconic Stadium	H ₂ O/LiBr DE750 kW	1408m ² Captadores lineales Fresnel	Destinado a ser uno de los escenarios de la Copa Mundial de Fútbol 2022 El agua fría producida por esta máquina será almacenada en tanques eutécticos colocados bajo el campo de juego para su uso nocturno en Unidades de Tratamiento de Aire (UTA). Las UTAs serán del tipo ruedas desecantes y serán los sistemas encargados de controlar la temperatura y humedad del estadio (gradas y campo de fútbol).

Fuente. Ehrismann, 2013 - Consejería de Economía y Hacienda; Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2011.

de media y gran capacidad, al igual que las que han combinado eficazmente sus ventajas térmicas. Las mismas ayudan a cerrar la brecha entre el hoy y un futuro orgánico, limpio, y energéticamente sostenible.

Los próximos años serán decisivos para el éxito de estos sistemas que dependen del estímulo y planes de promoción ofrecido por los encargados de formular políticas, del esfuerzo realizado por los fabricantes para el desarrollo de mejores tecnologías, más eficiente a menor costo.

AGRADECIMIENTOS

Al colectivo del CEEMA en especial al Dr. Juan J. Cabello por las enseñanzas impartidas.

REFERENCIAS

- Albert, J., Kunt, A., Petersen, S., & Ziegler, F. (2008). Control of absorption chillers by insight: the characteristic equation. *Czasopismo Techniczne*, 1-12.
- Bukoski, J., Gheewala, S. H., Mui, A., Smead, M., & Chirattananon, S. (April de 2014). The life cycle assessment of a solar-assisted absorption chilling system in Bangkok,

- Thailand. (Elsevier, Ed.) *Energy and Buildings*, 72, 150-156.
- Calm, J. M. (August de 2006). Comparative efficiencies and implications for greenhouse gas emissions of chiller refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, 29(5), 833-841.
- Climasol. (2005). *Guideline for solar cooling feasibility studies & Analysis of the feasibility studies*. Obtenido de www.raee.org/climasol
- Consejería de Economía y Hacienda; Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2011). *Guía del Frío Solar. Ahorro y eficiencia energética con refrigeración solar*. Obtenido de <http://www.fenercom.com/pages/publicaciones/publicacion.php?id=159>
- Ehrismann, B. (23 de 07 de 2013). *Collated and updated list of solar cooling installations in participating countries. Task Report 5.3.1*. Obtenido de http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/projects/QAiST/QAiST_results/QAiST%20D5.3%20TR5.3.1%20List%20of%20solar%20cooling%20installations.pdf
- Ehyaiei, M. A., Mozafari, A., Ahmadi, A., Esmaili, P., Shayesteh, M., & Sarkhosh, M. (December de 2010). Potential use of cold thermal energy storage systems for better efficiency and cost effectiveness. *Energy and Buildings*, 42(12), 2296-2303.
- Eicker, Ú., & Pietruschka, D. (2009). Optimization and Economics of Solar Cooling Systems. (T. F. Online, Ed.) *Advances in Building Energy Research*, 3(1), 45-81.
- Fong, K. F., Chow, T. T., Lee, C. K., Lin, Z., & Chan, L. S. (2010). Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city. *Solar Energy*, 84(2), 227-244.
- Ghaith, F. A., & Abusitta, R. (February de 2014). Energy analyses of an integrated solar powered heating and cooling systems in UAE. (Elsevier, Ed.) *Energy and Buildings*, 70, 117-126.
- Hassan, H. Z., & Mohamad, A. A. (2012). A review on solar cold production through absorption technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5331-5348.
- Herold, K. E., Radermacher, R., & Klein, S. (1996). *Absorption Chiller and Heat Pumps*. CRC Press.
- Instituto para la diversificación de la energía. (2011). *Evaluación del potencial de climatización con energía solar térmica en edificios. Estudio técnico 2011-2020*. Obtenido de www.absorsistem.com
- Instituto para la diversificación de la energía. (2011). *Evolución tecnológica y prospectiva de costos de la energías renovables. Estudio técnico 2011-2020*. Obtenido de http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11227_e2_tecnologia_y_costes_7d24f737.pdf
- International Energy Agency. (2010). *Technology Roadmap: Solar Heating and Cooling*. Paris: IEA.
- Larbus, J. M., Bruno, J. C., & Coronas, A. (2013). Review on absorption technology with emphasis on small capacity absorption machines. *Thermal Science*, 739-762.
- Lorenzini, G. (2010). *Solar thermal and biomass energy*. London: WIT Press.
- McLinden, M. O., Kazakov, A. F., Brown, J. S., & Domanski, P. A. (February de 2014). A thermodynamic analysis of refrigerants: Possibilities and tradeoffs for Low-GWP refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, 38, 80-92.
- Mokhtar, M., Ali, M., Bräuniger, S., Afshari, A., Sgouridis, S., Armstrong, P., & Chiesa, M. (2010). Systematic comprehensive techno-economic assessment of solar cooling technologies using location-specific climate data. *Applied Energy*, 87(12), 3766-3778.
- Mugnier, D. (2011). *IEA Task 48. Quality assurance and support measures for solar cooling*. Obtenido de <http://task48.iea-shc.org/>
- Navarro Rivero, P., & Ehrismann, B. (2012). *Durability issues, maintenance and cost of solar cooling systems. Task report 5.3.2. Quality Assurance in Solar Heating and Cooling Technology*. Obtenido de http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/projects/QAiST/QAiST_results/QAiST%20D5.3%20TR5.3.2%20Durability%20issues%20maintenance%20and%20costs%20of%20solar%20cooling%20systems.pdf
- Rococo project final report: "Reduction of costs of Solar Cooling systems", (2008). Disponible http://cordis.europa.eu/projects/rcn/85644_en.html
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (December de 2013). Review of solar refrigeration and cooling systems. *Energy and Buildings*, 67, 286-297.
- SOLCASA, P. (2010). *Instituto para la diversificación y ahorro de la energía*. (E. E. Instalador, Ed.) Obtenido de www.idae.es
- SOLCO. (2009). *Frío solar. Descripción y recomendaciones*. Obtenido de www.solcoproject.net
- Tsoutsos, T., Aloumpi, E., Gkouskos, Z., & Karagiorgas, M. (2010). Design of a solar absorption cooling system in a Greek hospital. *Energy and Buildings*, 42(2), 265-272.
- Zhai, X. Q., Qu, M., Li, Y., & Wang, R. Z. (December de 2011). A review for research and new design options of solar absorption cooling systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4416-4423.