

# Refrigeración solar de edificaciones. Un estado del arte

## Solar cooling in buildings. A state of the art

D. Bravo <sup>1\*</sup>, F. González \*\*, J. González \*\*\*

\* Universidad San Francisco de Quito, Quito. ECUADOR

\*\* Universidad Autónoma de Occidente, Cali. COLOMBIA

\*\*\* Research Management Learning (RML), Quito. ECUADOR

Fecha de Recepción: 20/02/2018

Fecha de Aceptación: 25/05/2018

PAG 115-126

### Abstract

*Context:* The use of solar energy, rather than an alternative, is the viable solution to the energy demands of our planet for sustainable development. Given the population increase and the quality of life at a global scale, it is very reasonable to forecast an increase in global energy demand. In this context, solar cooling systems are a viable and timely strategy to follow.

*Methods:* This work offers a state of the art on the different methods of obtaining solar cold. The review is generated by using the tools offered by the Scopus directory and using the VOSviewer bibliometric analysis software.

*Results:* Solar thermal cooling in buildings is shown as a trend within these energy practices, followed by photovoltaic solar cooling. Today, the United States of America, Italy, and China are the nations that lead this field. The most fertile research areas in this subject matter are engineering, energy and materials science.

*Conclusions:* The next few years will be decisive for the development of solar cooling technologies since they depend on the incentives and promotion plans offered by those responsible for formulating environmental and energy efficiency policies for buildings.

*Keywords:* Renewable energy source, photovoltaic solar cooling, thermoelectric solar cooling, thermo-mechanical solar cooling, solar thermal cooling

### Resumen

Contexto: La utilización de la energía solar, más que una alternativa, es la solución viable a las exigencias energéticas de nuestro planeta de cara al desarrollo sostenible. Dado el incremento poblacional, y calidad de vida a escala global, es muy razonable pronosticar un aumento en la demanda energética mundial. En este contexto los sistemas de refrigeración o climatización solar se muestran como una viable y oportuna estrategia a seguir.

Métodos: Este trabajo ofrece un estado del arte sobre los diferentes métodos de obtención de frío solar. La revisión se genera utilizando las herramientas que ofrece el directorio Scopus y empleando el software de análisis bibliométrica VOSviewer.

Resultados: La refrigeración solar térmica de edificaciones se muestra como una tendencia dentro de estas prácticas energéticas, seguida por la refrigeración solar fotovoltaica. Estados Unidos de América, Italia y China son las naciones que hoy lideran este campo. Las áreas de investigación más fértiles en esta temática son la ingeniería, la energética y la ciencia de materiales.

Conclusiones: Los próximos años serán decisivos para el desarrollo de tecnologías de refrigeración solar, pues dependen del estímulo y planes de promoción ofrecido por los encargados de formular las políticas ambientales y de eficiencia energética para edificios.

**Palabras clave:** Fuente de energía renovable, Refrigeración solar fotovoltaicos, Refrigeración solar termoeléctrica, Refrigeración solar termo-mecánica, Refrigeración solar térmica

## 1. Introducción

El calentamiento global se produce cuando el dióxido de carbono, originado sobre todo por la quema de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) y otros gases, como el metano, el óxido nitroso, se acumula en la atmósfera inferior (Gibon et al., 2017; H. Sun et al., 2018; Worsoe-Schmidt, 1980).

Los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), que son muy empleados en la refrigeración y la climatización, son gases que posee una fuerte incidencia negativa sobre la capa de ozono. Como resultado del rápido crecimiento de la población mundial, el consumo total de energía y climatización ha incrementado, se prevé que las emisiones contaminantes del medio ambiente aumenten en un 71% desde 2003 hasta 2030 (Antoci et al., 2018; Hwang et al., 2008).

El principal consumo de energía eléctrica en las edificaciones de tipo no industrial está asociado a la refrigeración y la climatización de espacios. Este consumo puede ir de un 40% al 60%, dependiendo de la posición geográfica de la instalación, su estructura y su propósito (Ahmadzadehtalatapeh, 2018; Jing et al., 2018). Por lo que el uso de energía solar en instalaciones de refrigeración constituye una alternativa a las técnicas convencionales de generación de frío. Una alternativa que contribuye a aliviar los problemas de contaminación medioambiental y a disminuir la demanda de energía eléctrica asociadas a los beneficios de la climatización artificial. Además se cuenta con la ventaja de que los horarios de mayor operación de las edificaciones, por lo general coinciden con los horarios de disponibilidad de luz solar (Bravo Hidalgo, 2015b; Valladares-Rendón et al., 2017).

Las condiciones del clima en la región de centro américa y el caribe con temperatura promedio de 26 °C y temperaturas sostenidas en periodos prolongados de tiempo

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

Ms.C. Universidad San Francisco de Quito, Quito. Ecuador.  
E-mail: dbrayanbh@gmail.com



durante el verano por encima de los 32 °C, exigen el uso de sistemas acondicionadores de aire para alcanzar las condiciones de confort térmico (Lara et al., 2015).

La climatización solar se irgue como una solución oportuna y viable ante la situación ambiental y energética global, por las razones expuestas a continuación: representan un ahorro notable en el consumo de energía primaria y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. La climatización solar no maneja refrigerantes peligrosos para el medio ambiente, como los clorofluorocarbonos (CFC), hidroclorofluorocarbonos (HCFC). La reducción de ruidos y vibraciones comparando con las tecnologías de compresión mecánica de vapor refrigerante (Díaz Torres et al., 2015; Nkwetta & Sandercock, 2016).

El presente artículo muestra un análisis de las tecnologías de refrigeración activadas con energía solar más investigadas, y las tendencias futuras. Por ello se sustenta en una revisión bibliográfica de los documentos más citados en esta área del conocimiento.

## 2. Materiales y métodos

El presente artículo se basa en la investigación bibliográfica sobre las tecnologías de refrigeración activadas con energía solar; se desarrolla utilizando las herramientas que ofrece el directorio Scopus. Puesto que este directorio representa muchas de las revistas de mayor impacto y visibilidad que proyectan los resultados en investigación y avances en este tipo de práctica energética. Además, se emplea la herramienta de análisis y mapeo bibliométrico VOSviewer. Este software se utilizó para:

- a) Crear mapas basados en datos de red.
- b) Visualizar y explorar mapas.

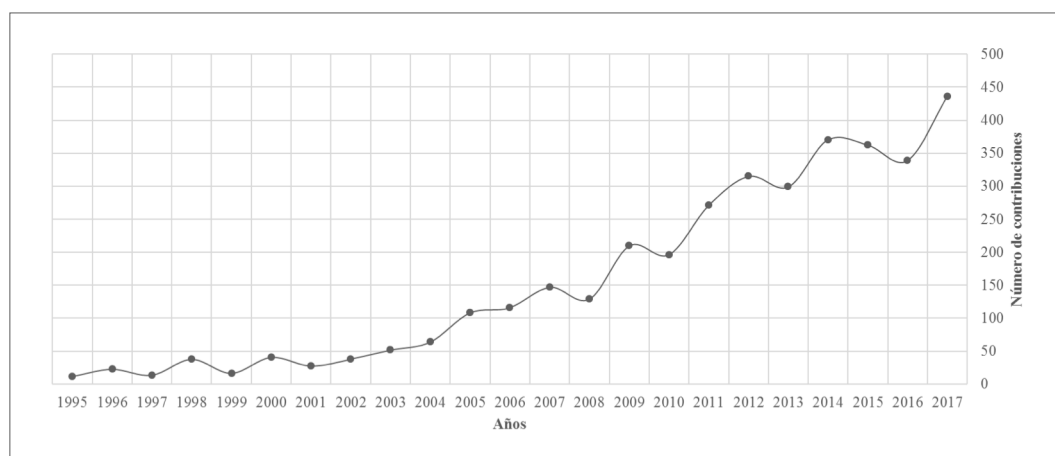
Los datos extraídos del directorio académico Scopus fueron exportados como archivos CSV, para ser procesados en la mencionada herramienta de análisis bibliométrico.

La exploración analiza trabajos desde el año 2013 al 16 de febrero de 2018, bajo el criterio de búsqueda, *solar cooling in buildings*, el cual se aplicó a el título, el resumen y las palabras claves de las contribuciones. La búsqueda mostró un total de 1.873 artículos relacionados y 18.069 patentes registradas, en el periodo anteriormente declarado. De estas se seleccionaron las contribuciones con mayor índice Hirsch (Índice H), y que se referían específicamente a las tecnologías de refrigeración solar como: Sistemas de refrigeración solares fotovoltaicos, Refrigeración solar termoeléctrica, Refrigeración solar termo-mecánica, Técnicas de refrigeración solar térmica.

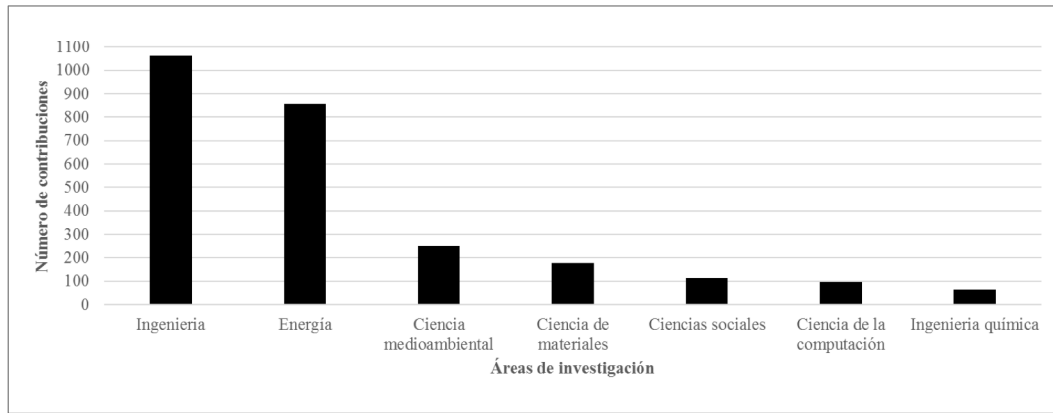
## 3. Resultados

Las investigaciones relacionadas con la refrigeración solar de edificaciones presentan un marcado crecimiento en las últimas décadas. Como se puede apreciar en la Figura 1. La curva de tendencia mostrada en dicha figura presenta un crecimiento, puesto que los ingenieros e investigadores ven en la tecnología de refrigeración solar un camino fértil para alcanzar las condiciones de confort térmico en espacios interiores, mediante el empleo de energía limpia y abundante. Es prudente destacar que para la obtención de este gráfico se consideró un periodo que abarca desde 1995 al 2017. Utilizando el criterio de búsqueda mencionado y demás condiciones destacadas en la sección de métodos de la presente contribución.

Hasta el momento las áreas de investigación que más resultados muestran en esta temática son la ingeniería y la energética. Como se puede observar en la Figura 2. Esto se debe a la marcada presencia de las tecnologías de climatización activadas con energía solar en las edificaciones de tipo industrial, comercial y residencial. Las áreas de investigación mostradas en este gráfico fueron detectadas dentro del directorio Scopus y bajo los criterios de búsqueda y condiciones establecidas en la sección de métodos.



**Figura 1.** Comportamiento del número de investigaciones relacionadas en refrigeración solar de edificios en las últimas décadas



**Figura 2.** Numero de contribuciones por áreas de investigación en la refrigeración solar de edificaciones

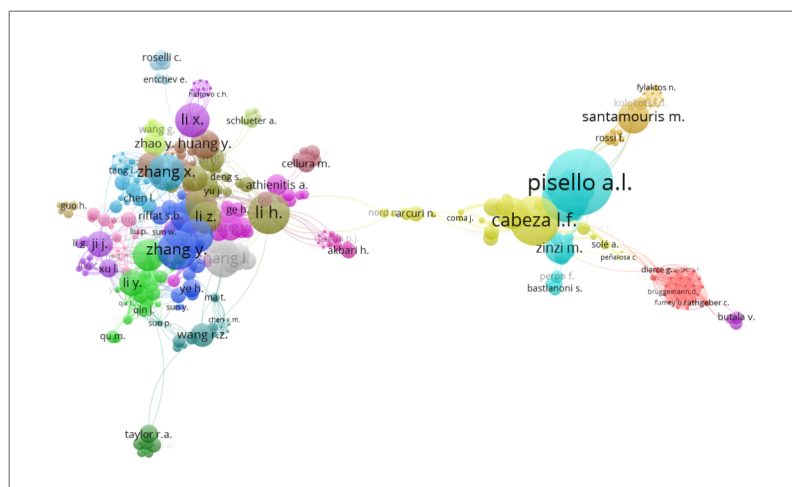
El autor que más contribuciones posee en esta temática es Anna Laura Pisello, profesora en la Universidad de Perugia, Italia. Con un total de 25 trabajos en revistas registradas en el directorio científico analizado.

El último trabajo de estado del arte que se escribió referente a este tema fue (Kim & Infante Ferreira, 2008) el cual tiene como objetivo, una revisión del estado de la técnica de las diferentes tecnologías disponibles en ese momento para suministrar refrigeración a partir de la energía solar. Los principales resultados de esta investigación destacan que los sistemas fotovoltaicos y termo-mecánicos son más caros que los sistemas de absorción y adsorción. Estos dos últimos, a su vez, son comparables en términos de rendimiento, pero las enfriadoras de adsorción son más caras y más voluminosas que las enfriadoras de absorción.

Las investigaciones en refrigeración solar de edificaciones dentro del directorio analizado están protagonizadas por un grupo de autores los cuales se

relaciona del modo que se presentan en la Figura 3. Esta figura fue generada con el software VOSviewer. Se evidencia que existen dos núcleos centrales. A la izquierda del gráfico existe un mayor número de autores, los cuales representan países asiáticos en su mayoría. Mientras que a la derecha del mencionado gráfico se puede observar la relación entre autores que representan mayormente a Europa y los Estados Unidos de América. Se puede observar que existen poca relación entre estos grupos de investigación; y el extendido interés entre los diversos autores asiáticos, por esta temática.

Utilizando el programa VOSviewer se generó la Figura 4. Dicha figura muestra la relación entre las naciones que más resultados exponen en investigaciones referentes a la temática tratada. Estados Unidos, Italia y China son las naciones a la cabeza. Evidentemente las potencias del eje económico mundial ven en la refrigeración solar de edificaciones una alternativa eficiente, segura y práctica.



**Figura 3.** Red de correlación entre los autores de mayor impacto en la investigación de refrigeración activada con energía solar, para edificios





**Tabla 1.** Resumen de las investigaciones, más citadas, por tecnologías de refrigeración

Tecnologías de refrigeración activadas con energía solar	Título	Autor/es	Año	Publicado en:	Tipo de publicación	Índice H	Número de citas	Objetivo	Referencia bibliográfica
Refrigeración solar fotovoltaica	A review on photovoltaic / thermal hybrid solar technology	T.T. Chow	2010	Applied Energy	Artículo	685	460	Mostrar un estado del arte de las tecnologías fotovoltaicas térmicas desde la década de los setenta a la primera década del siglo XXI.	(Chow, 2010)
	A review of solar photovoltaic technologies	Bhubaneswari Parida S. Iniyank Ranko Goic	2011	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Artículo	620	394	Este artículo revisa la tecnología fotovoltaica, su capacidad generadora de energía, los diferentes materiales absorbentes de luz utilizados, su aspecto medioambiental y una variedad de aplicaciones.	(Parida, Iniyank, & Goic, 2011)
	Hybrid photovoltaic/thermal solar systems	Y. Tripanagnostopoulos Th. Nousia M. Souliotis P. Yianoulis	2002	Solar Energy	Artículo	417	306	Presentar los resultados de las pruebas en sistemas solares híbridos, compuestos por módulos fotovoltaicos y colectores térmicos (sistemas híbridos PV / T).	(Tripanagnostopoulos, Nousia, Souliotis, & Yianoulis, 2002)
	Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems	Lon E. Bell	2008	Science	Artículo	1917	1456	Los materiales termoelectricos son convertidores de energía de estado sólido cuya combinación de propiedades térmicas, eléctricas y semiconductoras les permite ser utilizados para convertir calor residual en electricidad o energía eléctrica directamente en refrigeración y calefacción. Estos principios se ilustran con varias aplicaciones	(Bell, 2008)



**Tabla 1.** Resumen de las investigaciones, más citadas, por tecnologías de refrigeración

Tecnologías de refrigeración activadas con energía solar	Título	Autor/es	Año	Publicado en:	Tipo de publicación	Índice H	Número de citas	Objetivo	Referencia bibliográfica
Refrigeración solar termoeléctrica	Thermoelectrics: a review of present and potential applications	S.B Riffat Xiaoli Ma	2003	Applied Thermal Engineering	Artículo	872	536	<p>probadas y potenciales de la termoeléctrica.</p> <p>Los dispositivos termoeléctricos son dispositivos de estado sólido. Son convertidores de energía confiables y no tienen ruido ni vibración ya que no hay partes móviles mecánicas. En este trabajo se dan los conocimientos básicos de los dispositivos termoeléctricos y una visión general de estas aplicaciones. También se discuten las perspectivas de las aplicaciones de los dispositivos termoeléctricos.</p>	(Riffat & Ma, 2003)
	Development and applications of solar-based thermoelectric technologies	Hongxia Xi Lingai Luo Gilles Fraise	2007	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Artículo	172	104	<p>En este trabajo se presenta un estudio de las tecnologías termoeléctricas impulsadas por energía solar y sus aplicaciones. Las aplicaciones típicas de la refrigeración termoeléctrica y el alcance de otras aplicaciones. Las áreas de aplicación descritas en este documento muestran que las tecnologías termoeléctricas impulsadas por energía solar podrían ser utilizadas en una amplia variedad de campos.</p>	(Xi, Luo, & Fraise, 2007)

**Tabla 1.** Resumen de las investigaciones, más citadas, por tecnologías de refrigeración

Tecnologías de refrigeración activadas con energía solar	Título	Autor/es	Año	Publicado en:	Tipo de publicación	Índice H	Número de citas	Objetivo	Referencia bibliográfica
<b>Refrigeración solar termo-mecánica</b>	Solar refrigeration options – a state-of-the-art review	Kim, D. S. Infante Ferreira, C. A.	2008	International Journal of Refrigeration	Artículo	381	224	Se presenta una revisión del estado de la técnica de las diferentes tecnologías disponibles para suministrar refrigeración a partir de la energía solar. La revisión abarca la energía solar eléctrica, térmica solar y algunas nuevas tecnologías emergentes. Los sistemas solares térmicos incluyen soluciones termo-mecánicas, de absorción, adsorción y desecante. Se hace una comparación entre las diferentes soluciones tanto desde el punto de vista de la eficiencia energética como de la viabilidad económica.	(Kim Infante Ferreira, 2008)
<b>Refrigeración solar térmica</b>	Solar thermal collectors and applications	Soteris A. Kalogirou	2004	Progress in Energy and Combustion Science	Artículo	1676	974	En este trabajo se presenta un estudio de los diferentes tipos de colectores solares térmicos y aplicaciones. Inicialmente se presenta un análisis de los problemas ambientales relacionados con el uso de fuentes convencionales de energía y se describen los beneficios que ofrecen los sistemas de energía renovable.	(Kalogirou, 2004)



**Tabla 1.** Resumen de las investigaciones, más citadas, por tecnologías de refrigeración

Tecnologías de refrigeración activadas con energía solar	Título	Autor/es	Año	Publicado en:	Tipo de publicación	Índice H	Número de citas	Objetivo	Referencia bibliográfica
Refrigeración solar térmica	A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications	Y. Tian C.Y. Zhao	2013	Applied Energy	Artículo	380	264	Este artículo se centra en los últimos desarrollos y avances en aplicaciones de energía solar térmica, proporcionando una revisión de los colectores solares y sistemas de almacenamiento de energía térmica.	(Tian & Zhao, 2013)
	Perspectives of solar cooling in view of the developments in the air-conditioning sector	A.M. Papadopoulos S. Oxizidis N. Kyriakis	2003	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Artículo	112	25	El análisis que se discute en el artículo se centra en el estado de la técnica del uso de sistemas solares térmicos y en las posibilidades de combinarlos con tecnologías de vanguardia en refrigeración por sorción para cubrir la demanda de refrigeración de edificios residenciales y comerciales.	(Papadopoulos, Oxizidis, & Kyriakis, 2003)
	Review on sorption materials and technologies for heat pumps and thermal energy storage	Cabeza, L. F. Solé, A. Barreneche, C.	2016	Renewable Energy	Artículo	2	1	Los sistemas de refrigeración por adsorción y absorción, así como su integración con sistemas de almacenamiento térmico son las temáticas tratadas en esta revisión. Esta es la primera revisión en la que se muestran juntos las investigaciones sobre ambas aplicaciones.	(Cabeza, Solé, & Barreneche, 2016)



Considerando la dependencia que presenta la producción de energía solar del horario y las condiciones meteorológicas, la utilización exitosa de todos estos sistemas de refrigeración es en gran medida dependiente de la capacidad del sistema de acumulación o almacenamiento de energía empleado (Bravo Hidalgo et al., 2017). Las distintas tecnologías de los sistemas de climatización solar con acumulación de energía se muestran en la Tabla 2 (Chidambaram et al., 2011).

En comparación con los sistemas convencionales de compresión mecánica de vapor refrigerante, un importante ahorro de energía eléctrica puede esperarse de los sistemas de enfriamiento solar, de este modo la demanda de energía para la climatización es menor, y por consiguiente se reduce la huella ecológica de estos procesos (Bravo Hidalgo, 2015a).

La refrigeración solar se puede lograr a través de cuatro métodos básicos: refrigeración solar fotovoltaica, refrigeración solar termoeléctrica, refrigeración solar termo mecánica y refrigeración solar térmica. El primer método consiste en un sistema de captación de energía solar empleando paneles fotovoltaicos, donde la energía solar se convierte en energía eléctrica y se utiliza para accionar lo motores eléctricos de los sistemas de compresión mecánica de vapor refrigerante (Chen et al., 2017; Florides et al., 2002). El segundo método consiste en la producción de frío

mediante procesos termoeléctricos (Zhao & Tan, 2014). El tercer método lo compone un sistema en el que, la energía térmica se convierte en energía mecánica. Y luego la energía mecánica se utiliza para producir el efecto de refrigeración (Papadopoulos et al., 2003). El cuarto método consiste en la activación de un sistema de compresión térmica, donde un colector solar calienta directamente un fluido de trabajo accionando el generador de una máquina de absorción, provocando esta última el efecto refrigerante (Díaz Torres et al., 2015; Z. Sun et al., 2017; Thirugnanasambandam et al., 2010). El rendimiento de los sistemas de refrigeración se determina sobre la base de indicadores de energía de estos sistemas. El COP (coeficiente de rendimiento) se puede calcular de la siguiente manera expresada por la Ecuación [1] (Arora, 2010):

$$COP = E_u/E_c \quad (1)$$

Donde:

$E_u$  es el efecto refrigerante obtenido;  $E_c$  es la energía consumida por el sistema para lograr tal efecto.

Tabla 2. Sistemas de refrigeración solar

Fuente de suministro de energía	Conversión de energía	Sistema de acumulación térmica (fluido caliente)	Principio de funcionamiento de la máquina enfriadora.	Sistema de acumulación térmica (fluido frío)	Aplicación
Energía solar	*Solar fotovoltaica		<ul style="list-style-type: none"> <li>Compresión mecánica de vapor refrigerante.</li> <li>Termoeléctrico</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Aire acondicionado en:                             <ol style="list-style-type: none"> <li>Hoteles</li> <li>Edificios</li> <li>Oficinas</li> </ol> </li> <li>Procesos Industriales:                             <ol style="list-style-type: none"> <li>Farmacéutica</li> <li>Química</li> <li>Láctea</li> </ol> </li> <li>Frigoríficos:                             <ol style="list-style-type: none"> <li>Carne y pescado</li> <li>Frutas y vegetales</li> </ol> </li> </ul>
	Solar térmica. <ul style="list-style-type: none"> <li>Captadores de placa plana</li> <li>Captadores tubulares</li> <li>Captadores parabólicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calor sensible</li> <li>Calor latente</li> <li>Termoquímica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eyector</li> <li>Desecante</li> <li>Absorción:                             <ol style="list-style-type: none"> <li>Simple efecto</li> <li>Doble efecto</li> </ol> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calor sensible</li> <li>Calor latente</li> <li>Termoquímica</li> </ul>	

\*Nota: El empleo de energía Solar fotovoltaica en la climatización maneja tecnologías de acumulación de energía mediante distintos tipos de baterías de corriente directa. Las cuales varían en forma, tamaño y material de composición en función de la capacidad de almacenamiento para las que son diseñadas.

#### 4. Contribuciones en las diferentes tecnologías de refrigeración activadas con energía solar

La figura 6 muestra el comportamiento de las contribuciones por cada una de estas técnicas de refrigeración activada con energía solar, en el directorio

Scopus. Se aprecia una notable tendencia al incremento en investigaciones relacionadas con la refrigeración solar térmica en la última década. Seguido por un modesto despegue en las investigaciones en la refrigeración solar fotovoltaica. Las temáticas más recurrentes tratadas en las diferentes tecnologías de refrigeración activadas con energía solar son modelado y optimización de eficiencia, investigaciones sobre fluidos de trabajo, y optimización de costos de operación (Fan et al., 2007; Haller et al., 2012).



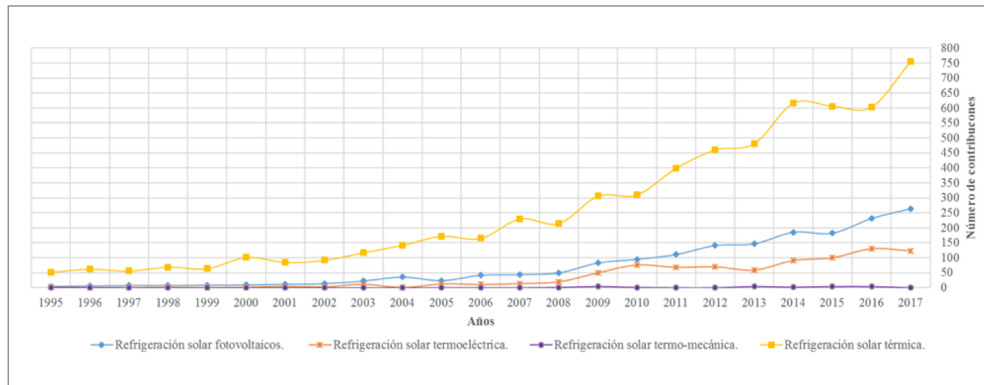


Figura 6. Número de publicaciones por las diferentes tecnologías de refrigeración activadas con energía solar

## 5. Discusión

Aunque estas tecnologías de refrigeración solar se consideran maduras, poseen una discreta representación a nivel global. Esto se debe a un conjunto de barreras o limitaciones que han frenado, y frenan el establecimiento de estas tecnologías en el mercado de la refrigeración de espacios. A continuación, se exponen las principales limitantes:

- Los sistemas de refrigeración activados con energía solar, en la actualidad, son más costosos si los cotejamos con los precios de las enfriadoras convencionales. Esta condición tiene mayor acentuación en los casos de enfriadoras de baja potencia, comúnmente empleadas en viviendas y en pequeños centros comerciales.
- El uso de las enfriadoras accionadas con energía solar térmica requiere generalmente de torres de enfriamiento. Estos elementos están sujetos a legislaciones específicas para evitar la posibilidad de surgimiento de la peligrosa bacteria legionela en sus conductos. Por otra parte, el mantenimiento de las torres de enfriamiento es relativamente caro.
- En la actualidad es muy limitado el mercado existente para máquinas de potencias frigoríficas bajas (Ajib, 2010).
- La reducción de impuestos y otros incentivos financieros para el desarrollo de la refrigeración solar son limitados e insuficientes para promover esta tecnología.
- Es necesaria una guía para sistemas de refrigeración asistidos por energía solar a nivel gubernamental. Estas instalaciones a menudo son olvidadas en los esquemas de incentivos financieros tanto para productores como consumidores. Los incentivos financieros deben estar dirigido a mitigar los altos costos iniciales de este tipo de inversiones (Bravo Hidalgo, 2015a; Mokheimer et al., 2017).

A pesar del hecho de que la adopción de la tecnología solar está reconocida como una respuesta realista a los problemas de tipo energético y medioambiental que captan la atención de ingenieros y arquitectos; las evaluaciones económicas son a menudo no favorables. Los factores críticos que asegurarán la extensión de los sistemas de refrigeración solar son la madurez tecnológica y la mejora de la viabilidad económica de estos.

Los análisis económicos de los sistemas de refrigeración solar indican que estos sistemas no serán competitivos comparados con los sistemas de refrigeración convencionales teniendo en cuenta el precio actual de la energía eléctrica.

Relacionadas con la refrigeración convencional existen 156.325 patentes más que las relacionadas con la refrigeración solar. Se necesita de modo imperioso tanto incentivos para la inversión como el establecimiento de impuestos que reflejen el coste medioambiental total de los combustibles convencionales; para vencer las limitantes al desarrollo de la tecnología de refrigeración activada con energía solar. Los trabajos (Boopathi Raja & Shanmugam, 2012; Dickinson et al., 2010; Testi et al., 2016) destacan los costos de la implementación y explotación de este tipo de tecnologías, llegando incluso a establecer comparaciones entre ella.

Respecto a la dirección futura del desarrollo de la refrigeración solar, será conveniente centrarse en sistemas de sorción a baja temperatura. Esto se debe a que, en primer lugar, el coste de un sistema colector solar tiende a aumentar con la temperatura de trabajo, más rápidamente que el Coeficiente de Operación (COP) de una máquina de sorción. Y, en segundo lugar, las enfriadoras de alta temperatura no serían compatibles con los sistemas de captación solar que fueron originalmente diseñados para producir agua caliente sanitaria y que son muy comunes en las viviendas, escuelas, centros comerciales, etc. En la Figura número 8 de la publicación (Kim & Infante Ferreira, 2008; Linjawi et al., 2017) se establecen costos en función de potencias de trabajo y temperaturas de activación de estas máquinas térmicas que sustentan lo anteriormente expresado.

Los sistemas de refrigeración solar se pueden utilizar, ya sea como sistemas autónomos o con sistemas integrados a técnicas convencionales de obtención de frío, para mejorar la calidad del aire interior de diversos tipos de edificaciones.

Junto con los sistemas fotovoltaicos, los sistemas de refrigeración activados con energía solar térmica se están utilizando en diversas regiones, con una tendencia al incremento de estas prácticas (Hashe, 2017; van Straaten, 1977; Worsoe-Schmidt, 1980).

Por último, es prudente destacar que los sistemas de refrigeración solar son más ecológicos tanto en el periodo de producción como en el de explotación, que los sistemas de refrigeración convencionales debido al empleo de fluidos de trabajo libre de contaminación como el bromuro de litio, el agua y el amoniaco en lugar de clorofluorocarbonos (Toppi et al., 2016; Weber et al., 2014)

## 6. Conclusiones

A continuación, se esgrime las consideraciones finales de la investigación a modo conclusivo:

- a) Las investigaciones relacionadas con la refrigeración solar presentan una tendencia al crecimiento, puesto que los ingenieros e investigadores ven en la tecnología de refrigeración solar un camino fértil para alcanzar las condiciones de confort térmico en espacios interiores, mediante el empleo de energía limpia y abundante.
- b) El grueso de las investigaciones en refrigeración solar, se centran en la ingeniería, la energética y la ciencia de materiales de estos procesos.
- c) Las futuras prácticas energéticas apuntan a las tecnologías de refrigeración solar térmica. Esta condición está dada por el potencial de acumulación térmica de esta práctica.
- d) El liderazgo en estas investigaciones lo presentan investigadores de Estados Unidos de América, Italia y China. Las investigaciones en Europa y América están concentradas en productivos pero pocos investigadores. En China la investigación en refrigeración solar de edificaciones es un tema abordado por un gran número de autores.
- e) Envoltente del edificio, rendimiento térmico y confort térmicos; representa un grupo de términos fuertemente relacionados o de mayor coocurrencia, dentro de las investigaciones en el campo de la refrigeración de edificaciones con energía solar.
- f) Los próximos años serán decisivos para el éxito y desarrollo de mejores tecnologías en sistemas de refrigeración solar, las cuales dependen del estímulo y planes de promoción ofrecido por los encargados de formular las políticas ambientales y de eficiencia energética.
- g) Las investigaciones en refrigeración termo mecánica para la climatización de edificaciones son un área en la cual existen muy pocos trabajos. La ciencia de materiales, y el control de la eficiencia térmica del proceso son nichos investigativos en este tipo de refrigeración para edificios.

## 6. Referencias

- Ahmadzadehtalatpeh M. (2018)**, Solar assisted desiccant evaporative cooling system for office buildings in Iran: An annual simulation model. *Scientia Iranica*, 25(1), 280-298. doi:10.24200/sci.2017.4323
- Ajib S. (2010)**, An overview on solar thermal energy for cooling and air conditioning. *Annals of Arid Zone*, 49(3-4), 275-284.
- Antoci A., Galeotti M. & Sordi S. (2018)**, Environmental pollution as engine of industrialization. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 58, 262-273. doi:10.1016/j.cnsns.2017.06.016
- Arora R. C. (2010)**, Refrigeration and air conditioning: PHI Learning Pvt. Ltd.
- Bell L. E. (2008)**, Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science*, 321(5895), 1457-1461. doi:10.1126/science.1158899
- Boopathi Raja V. & Shanmugam V. (2012)**, A review and new approach to minimize the cost of solar assisted absorption cooling system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6725-6731. doi:10.1016/j.rser.2012.08.004
- Bravo Hidalgo D. (2015a)**, CLIMATIZACIÓN SOLAR DE EDIFICACIONES. *Centro Azúcar*, 42, 72-82.
- Bravo Hidalgo D. (2015b)**, Energía y desarrollo sostenible en Cuba. *Centro Azúcar*, 42, 14-25.
- Bravo Hidalgo D., González Alonso J. A. & Martínez Pérez Y. (2017)**, COSTOS DE LAS TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA. *Centro Azúcar*, 44, 67-76.
- Cabeza L. F., Solé A. & Barreneche C. (2016)**, Review on sorption materials and technologies for heat pumps and thermal energy storage. *Renewable Energy*. doi:10.1016/j.renene.2016.09.059
- Chen J. F., Dai Y. J. & Wang R. Z. (2017)**, Experimental and analytical study on an air-cooled single effect LiBr-H<sub>2</sub>O absorption chiller driven by evacuated glass tube solar collector for cooling application in residential buildings. *Solar Energy*, 151, 110-118. doi:10.1016/j.solener.2017.05.029
- Chidambaram L. A., Ramana A. S., Kamaraj G. & Velraj R. (2011)**, Review of solar cooling methods and thermal storage options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3220-3228. doi:http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.018
- Chow T. T. (2010)**, A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, 87(2), 365-379. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037
- Díaz Torres Y., Monteagudo Yanes J. P. & Bravo Hidalgo D. (2015)**, Análisis energético de un sistema híbrido de producción de frío. *Ingeniería Energética*, 36, 38-49.
- Dickinson J. K., Hess R. O., Seaton J., Van Lambalgen H. & Burnham A. L. (2010)**, Cost and performance analysis of a solar thermal cooling project.
- Fan Y., Luo L. & Souyri B. (2007)**, Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1758-1775. doi:10.1016/j.rser.2006.01.007
- Florides G. A., Tassou S. A., Kalogirou S. A. & Wrobel L. C. (2002)**, Review of solar and low energy cooling technologies for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(6), 557-572. doi:http://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00016-3



- Gibon T., Arvesen A. & Hertwich E. G. (2017)**, Life cycle assessment demonstrates environmental co-benefits and trade-offs of low-carbon electricity supply options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1283-1290. doi:10.1016/j.rser.2017.03.078
- Haller M. Y., Bertram E., Dott R., Afjei T., Ochs F., Hadorn J. C. (2012)**, Review of component models for the simulation of combined solar and heat pump heating systems.
- Hashe V. T. (2017)**, Solar Heating and Cooling in Buildings – How Sustainable? *Procedia Manufacturing*, 7, 92-97. doi:10.1016/j.promfg.2016.12.024
- Hwang Y., Radermacher R., Alili A. A. & Kubo I. (2008)**, Review of solar cooling technologies. *Hvac&R Research*, 14(3), 507-528.
- Jing Y., Li Z., Liu L., Lu S., Lv S. (2018)**, Exergoeconomic-optimized design of a solar absorption-subcooled compression hybrid cooling system for use in low-rise buildings. *Energy Conversion and Management*, 165, 465-476. doi:10.1016/j.enconman.2018.03.083
- Kalogirou S. A. (2004)**, Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231-295. doi:http://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001
- Kim D. S., Infante Ferreira C. A. (2008)**, Solar refrigeration options - a state-of-the-art review. *International Journal of Refrigeration*, 31(1), 3-15. doi:10.1016/j.ijrefrig.2007.07.011
- Lara B. G. V., Molina L. M. C., Yanes J. P. M. (2015)**, Modeling and identification of the cooling dynamics of a tropical island hotel. *Energy and Buildings*, 92, 19-28.
- Linjawi M. T., Talal Q., Al-Sulaiman F. A. (2017)**, Evaluation of solar thermal driven cooling system in office buildings in Saudi Arabia. Paper presented at the 17th World Renewable Energy Congress, WREC 2016.
- Mokheimer E. M. A., Shakeel M. R., Al-Sadah J. (2017)**, A novel design of solar chimney for cooling load reduction and other applications in buildings. *Energy and Buildings*, 153, 219-230. doi:10.1016/j.enbuild.2017.08.011
- Nkwetta D. N., Sandercock J. (2016)**, A state-of-the-art review of solar air-conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1351-1366. doi:10.1016/j.rser.2016.03.010
- Papadopoulos A. M., Oxizidis S. & Kyriakis, N. (2003)**, Perspectives of solar cooling in view of the developments in the air-conditioning sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(5), 419-438. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321(03)00063-7
- Parida B., Iniyar S., Goic R. (2011)**, A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625-1636. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032
- Riffat S. B., Ma X. (2003)**, Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(8), 913-935. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7
- Sun H., Wang A., Zhai J., Huang J., Wang Y., Wen S., Zeng X., Su B. (2018)**, Impacts of global warming of 1.5 °C and 2.0 °C on precipitation patterns in China by regional climate model (COSMO-CLM). *Atmospheric Research*, 203, 83-94. doi:10.1016/j.atmosres.2017.10.024
- Sun Z., Zhao Y., Xu W., Zhang X., Li H., Wang M., He T., Wang D. (2017)**, A Solar Heating and Cooling System in a Nearly Zero-Energy Building: A Case Study in China. *International Journal of Photoenergy*, 2017. doi:10.1155/2017/2053146
- Testi D., Schito E., Conti P. (2016)**, Cost-optimal Sizing of Solar Thermal and Photovoltaic Systems for the Heating and Cooling Needs of a Nearly Zero-energy Building: Design Methodology and Model Description.
- Thirugnanasambandam M., Iniyar S., Goic R. (2010)**, A review of solar thermal technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 312-322. doi:http://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.014
- Tian Y., Zhao C. Y. (2013)**, A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538-553. doi:http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051
- Toppi T., Aprile M., Guerra M., Motta M. (2016)**, Numerical investigation on semi-GAX NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O absorption cycles. *International Journal of Refrigeration*, 66, 169-180. doi:10.1016/j.ijrefrig.2016.02.009
- Tripanagnostopoulos Y., Nousia T., Souliotis M., Yianoulis P. (2002)**, Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy*, 72(3), 217-234. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00096-2
- Valladares-Rendón L. G., Schmid G., Lo S. L. (2017)**, Review on energy savings by solar control techniques and optimal building orientation for the strategic placement of façade shading systems. *Energy and Buildings*, 140, 458-479. doi:10.1016/j.enbuild.2016.12.073
- Van Straaten J. F. (1977)**, utilization of solar energy - 4. Solar space heating and cooling and other uses of solar energy in warm countries. 67-87.
- Weber C., Berger M., Mehling F., Heinrich A., Núñez T. (2014)**, Solar cooling with water-ammonia absorption chillers and concentrating solar collector - Operational experience. *International Journal of Refrigeration*, 39, 57-76. doi:10.1016/j.ijrefrig.2013.08.022
- Worsoe-Schmidt P. (1980)**, Solar Cooling for Rural Districts in Developing Countries. *Ki Klima Kaelte Heizung*, 8(4), 163-166.
- Xi H., Luo L., Fraisse G. (2007)**, Development and applications of solar-based thermoelectric technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5), 923-936. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.008
- Zhao D., Tan G. (2014)**, A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. *Applied Thermal Engineering*, 66(1-2), 15-24. doi:http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.074