

Actualidad y perspectivas de una bomba de calor de expansión directa con energía solar

Current and future perspectives of direct expansion solar assisted heat pumps

Francis-B. Gorozabel-Chata^I, Tania Carbonell-Morales^{II}

I. Universidad Técnica de Manabí. Departamento de Ingeniería Mecánica, La Habana. Cuba

II. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables. La Habana. Cuba

Correo electrónico: fgorozabel@utm.edu.ec

Recibido: 19 de septiembre de 2015

Aceptado: 20 de diciembre de 2015

Resumen

La bomba de calor de expansión directa con asistencia de energía solar se utiliza en el modo de calefacción para diversas aplicaciones entre las que podemos citar, calentamiento de agua, calentamiento de aire para climatizar edificios, desalinización de agua, secado solar entre otras. El presente trabajo revisa las principales investigaciones sobre esta tecnología enfocando sus aplicaciones para el calentamiento de agua, para lograr este objetivo se describen en detalle la configuración básica y avanzada con la finalidad de caracterizar el coeficiente de desempeño de

cada una de estas configuraciones; también es oportuno analizar esta tecnología de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica para identificar bajos desempeños en los componentes del sistema. Esta revisión bibliográfica apunta a desarrollar esta tecnología para calentamiento de agua en un rango de 60-90 °C, ideal para aplicaciones industriales.

Palabras claves: Bomba de calor, energía solar, expansión directa, aplicaciones a alta temperatura.

Abstract

Direct expansion solar assisted heat pumps have been used in the heating mode for several applications among them we may cite, water heating, heating space for building, water desalination system, solar drying, amongst other. The present work review the most important research about this technology approaching their applications for water heating, to reach this goal the basic and advanced configuration model are describe in details with the purpose of characterize the coefficient of thermal performance; is

relevant too, analyze this technology according to the second law of thermodynamics to point out slow performance in the components of the system. This review rightly point out to develop this technology for heating water in a 60-90 °C range, ideally suited for industrial applications.

Key words: Heat pump, solar assisted, direct expansion, high temperatura applications.

Introducción

Las Bombas de calor son equipos que se utilizan para calefacción y enfriamiento en aplicaciones residenciales y comerciales. Fueron introducidas en la década de 1950 y después de algunas fallas iniciales han ido mejorando y se han convertido en tecnologías más eficientes, seguras y competitivas. Desde la crisis energética de 1973, las fuentes de energía renovable como la energía solar han sido promovidas fuertemente como sustituto para combustibles fósiles como el petróleo. Existe una tecnología que combina la energía solar con la energía convencional denominada bomba de calor con asistencia de energía solar (BCAES), donde se combina un sistema convencional de calentamiento solar con una bomba de calor con la finalidad de hacer la operación de la BCAES más eficiente. Una bomba de calor convencional opera entre dos niveles de temperatura correspondiente a una fuente de baja temperatura, generalmente agua o aire a temperatura ambiente y un disipador de calor a mayor temperatura la cual provee energía para una aplicación. Mediante el uso de un ciclo mecánico por compresión de vapor, el equipo bombea energía térmica desde la fuente hasta el disipador de calor usando el trabajo efectuado en el compresor.

En una BCAES, el colector solar y la bomba de calor son unidades separadas unidas por un intercambiador de calor. El agua o el aire caliente generado por el colector solar circulan a través del intercambiador de calor donde transfieren la energía al circuito refrigerante de la bomba de calor. El refrigerante se evapora debido a la energía solar que ingresa al intercambiador de calor, lo que resulta en una alta temperatura del evaporador y por lo tanto un alto coeficiente de desempeño del sistema (COP). En un segundo tipo de bomba de calor con asistencia de energía solar, denominada bomba de calor de expansión directa con asistencia de energía solar (BCAES-ED), el colector solar y el evaporador se integran en una misma unidad. El fluido de trabajo es un refrigerante, el cual se expande en un panel colector/evaporador integrado por donde pasa a una fase de transición de líquido a vapor debido a la ganancia de energía solar. El presente estudio se enfoca en exponer una revisión de los avances y la tendencia actual de la tecnología de calentamiento de agua con una BCAES-ED para discernir su campo de aplicación en procesos industriales en el rango de temperatura entre 60-90 °C.

Existen algunas ventajas de usar una BCAES-ED en vez de una BCAES convencional, una de ellas es minimizar los problemas de corrosión debido al uso de un refrigerante, esto permite incrementar la vida útil del colector solar con relación a los colectores que utilizan agua como fluido de trabajo. Otra ventaja de importancia es la eliminación de problemas de congelamiento de agua en el colector solar debido a la baja temperatura de congelamiento del refrigerante. Por último se debe destacar entre las ventajas, la reducción de los componentes o unidades en el sistema al eliminar el intercambiador de calor en la BCAES convencional, esto permite alcanzar altas eficiencias y bajar los costos del sistema. Entre las principales desventajas de una BCAES-ED se debe indicar la influencia de la incertidumbre de la energía solar disponible en la fuente de calor, otra desventaja es la necesidad de una correcta configuración de sus componentes así como las pérdidas de calor reportadas en algunos componentes del sistema.

Avances en el desarrollo de BCAES-ED

Los primeros en traer a la luz la idea de que la energía solar puede evaporar un refrigerante que circula a través de una bomba de calor utilizando un colector solar como evaporador son Sporn y Ambrose [1], si bien presentan resultados prometedores, no logran demostrar el verdadero potencial de este concepto debido a un aparente desajuste entre la capacidad de bombeo de flujo másico del compresor y la capacidad de evaporación del colector. Una bomba de calor que utiliza un colector solar como evaporador se lo conoce como BCAES-ED.

Si bien el concepto de BCAES-ED se lo conoce desde 1955, es a finales de la década de 1970 que empiezan a desarrollarse estudios sobre esta tecnología, esto se debe principalmente a los altos precios del petróleo que logra motivar a los investigadores a desarrollar nuevas tecnologías que permitan utilizar fuentes alternativas para la producción de energía; los estudios teóricos de Chaturvedi et al. [2] evalúan el coeficiente de desempeño (COP) de una BCAES-ED que utiliza un colector solar de plato plano sin capa de vidrio (colector desnudo) que se limita a funcionar para el análisis respectivo como un evaporador a temperatura constante sin sobrecalentamiento o subenfriamiento. Un análisis teórico mejorado es presentado por Chaturvedi et al. [3], los resultados concuerdan con la combinación colector solar desnudo y compresor hermético disponible en el comercio de la época. Chaturvedi y Shen [4] estudian experimentalmente la operación térmica de estado estable de una BCAES-ED; el sistema fue operado a varias condiciones ambientales, y el COP y la eficiencia del colector fueron obtenidos mediante la medición del flujo másico del refrigerante, la presión, la temperatura, a diferentes puntos del circuito térmico, la predicción teórica en [2] concuerdan con los datos medidos experimentalmente.

Chaturvedi y Abazeri [5] demuestran que la eficiencia de un sistema de BCAES-ED es influenciada sustancialmente por el área del colector, la velocidad del compresor, la carga de temperatura y las propiedades del refrigerante, por otro lado la velocidad del viento y el volumen almacenado influyen muy poco en el rendimiento del sistema. Ito y Miura [6], Ito et al. [7] investigan la influencia de varios parámetros en el rendimiento del colector concluyendo que la radiación solar influye en la temperatura de evaporación y en el COP, estudios numéricos realizado por Kong et al. [8] analizan el efecto de varios parámetros incluyendo radiación solar, temperatura ambiental, velocidad del viento y velocidad del compresor, concluyendo que a mayor velocidad del viento se mejora el desempeño del sistema pero a bajas temperaturas ambientales y radiación solar. Hawlader et al. [9] analizan teórica y experimentalmente una BCAES-ED diseñada para las condiciones ambientales de Singapur usando R-134A como refrigerante, sus resultados demuestran que el rendimiento del sistema está influenciado por el área del colector, la velocidad del compresor y la radiación solar.

Mohanraj et al. [10] muestran la conveniencia de predecir el desempeño de una BCAES-ED usando redes neuronales artificiales mientras Scarpa et al. [11] y Tagliafico et al. [12] logran desarrollar un enfoque de estado estable para analizar el desempeño promedio de una BCAES-ED, el cual utiliza el ciclo inverso de Carnot simplificado y el concepto de eficiencia de acuerdo a la segunda ley. Facão y Carvalho [13] desarrollan dos nuevas metodologías de ensayo para medir el desempeño de BCAES-ED con aplicaciones a calentamiento de agua.

Ozgener y Hepbasli [14] analizan y resumen diversos análisis de energía y exergía para una BCAES-ED para calefacción de espacios. Hepbasli y Kalinci [15] revisa bibliográficamente sistemas de calentamiento de agua que usan bombas de calor con la perspectiva de evaluar su desempeño usando los métodos de análisis de energía y exergía. Kara et al. [16], comparan diversas fuentes bibliográficas y estudios realizados en BCAES-ED las cuales presenta consolidada en una tabla, concluyendo que los tipo de colectores más investigados son los colectores desnudos, con áreas en el rango de 1,82 - 10,5 m², COP entre 1, 5 a 9, cayendo la mayoría de valores en el rango de 2 a 3, los refrigerantes comúnmente investigados son el R-12 y el R-22. Omojaro y Breikopf [17] compacta y sintetiza varias investigaciones y análisis realizados a BCES-ED, las cuales muestran las diversas formas de evaluar la tecnología y los factores que determinan el desempeño del sistema. Raisul Islam et al. [18] presentan una visión amplia de las tecnologías de calentamiento de agua con asistencia de energía solar mostrando su potencial en el mercado mundial, el cual está limitado todavía por algunas barreras económicas y técnicas, las cuales pueden ser superadas con políticas de estado que permitan el desarrollo de la tecnología.

Las BCAES-ED logran desarrollarse a partir de los años 1980, impulsada por investigadores alrededor del mundo que han contribuido a identificar los parámetros que influyen en su desempeño termodinámico, los numerosos estudios teóricos, numéricos y experimentales y las diversas configuraciones desarrollados en los últimos 35 años permiten visualizar los potenciales impactos de esta tecnología en el ámbito económico, ambiental y de conservación de energía.

Componentes de una bomba de calor que utiliza el ciclo mecánico de compresión de vapor

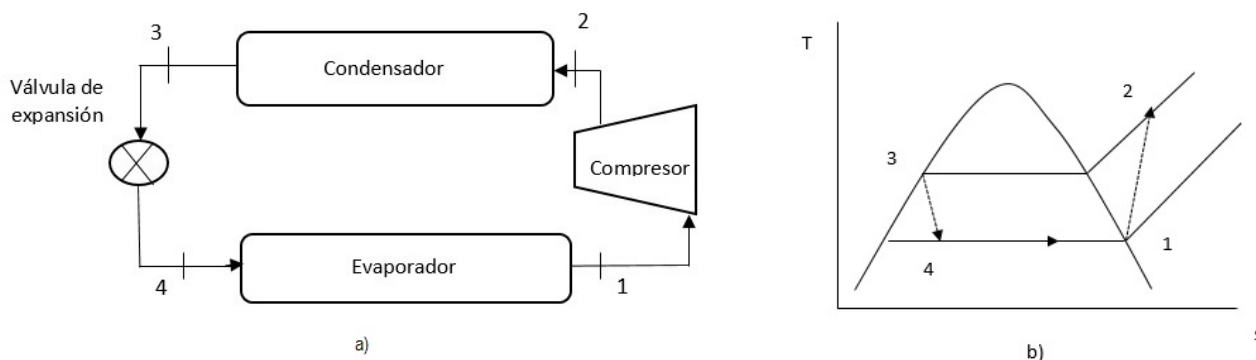


Fig. 1 Ciclo mecánico de compresión de vapor

Una BCAES-ED está compuesta por cuatro componentes principales: el panel colector/evaporador, el compresor, la válvula de expansión y el tanque intercambiador de calor conocido como condensador. La mayoría de las bombas de calor disponibles comercialmente operan en el ciclo mecánico de compresión de vapor como se muestra en la Fig. 1a, donde el fluido de trabajo es un refrigerante.

Los principales parámetros para seleccionar un refrigerante son la temperatura en el medio ambiente donde está ubicado el panel colector/evaporador y la temperatura de condensación. Gorozabel et al. [19] analizan la degradación del coeficiente de desempeño de una BCAES-ED, debido a la sustitución obligada del R-12 por otros refrigerantes como el R-22, R-134A, R-404A, R-407C, R-410A. Mohanraj et al. [20] comparan el desempeño de una BCAES-ED, para un refrigerante R-22 y una mezcla del refrigerante R-407C y gas licuado de petróleo en una relación de 70/30, los resultados confirman que la mezcla es una alternativa amigable a la capa de ozono para reemplazar al R-22, cuando este salga del mercado definitivamente. Molinaroli et al. [21] muestran un estudio numérico que investiga las características energéticas de una BCAES-ED que utiliza refrigerante R-407C como fluido de trabajo. En otro trabajo Raisul Islam et al. [22] utilizan dióxido de carbono (R-744) como refrigerante natural de mínimo impacto en la naturaleza.

La firma del protocolo de Montreal prohíbe el uso de los refrigerantes R-12 y R-22 por causar daños irreversibles a la capa de ozono provocando que muchos estudios sobre BCAES-ED queden obsoletos; en los últimos cinco años, refrigerantes como el R-134A, R-407C, RM-30 y R-744 toman un rol de importancia en el desarrollo de las tecnologías de BCAES-ED.

Panel colector/evaporador

Al panel colector/evaporador se lo clasifica como colectores solares planos con y sin capa de vidrio; los parámetros investigados en los colectores solares son: eficiencia del colector, área del colector, condiciones ambientales, propiedades de los refrigerantes, temperatura del agua, temperatura de evaporación de diferentes refrigerantes, entre otros. Zhu et al. [23] comparan los colectores planos de una o dos cubiertas de vidrio en similares condiciones con los colectores desnudos, encuentran que a mayor radiación solar y temperatura ambiental una BECAES-ED que utiliza colectores planos sin capa de vidrio tienen mejor desempeño que los colectores con una o dos capas de vidrio. Garg et al. [24] comparan experimentalmente dos colectores solares, uno con y otro sin capa de vidrio relacionándolos con el desempeño térmico de una BCAES-ED. Los resultados muestran que los colectores con capa de vidrio mejoran el COP de los colectores desnudos de 3,16 a 3,32 respectivamente. La contradicción de ambos estudios se debe a la inestabilidad de dos de los parámetros más importantes en el panel colector/evaporador como la temperatura ambiental y la cantidad de radiación solar. Ito et al. [7] reportan incrementos muy pequeños en el COP cuando se incrementa el área del colector mientras que Garg et al. [24] concluyen que aumentar el área del colector incide en la mejora del COP del sistema pero reduce la eficiencia del colector e incrementa la carga de trabajo del compresor. Sun et al. [25] estudian experimentalmente una BCAES-ED para calentamiento de agua usando un canal optimizado en el panel colector/evaporador, un canal en forma de T y uno en forma de panel de abeja, fueron diseñados, fabricados y probados; los resultados muestran que en comparación con los canales paralelos convencionales la forma de canales en T, mejoran el COP del sistema en 16,5 % y la capacidad de calentamiento en un 17,3 %.

Entre otros tipos de colectores solares se tiene la tecnología híbrida fotovoltaica/térmica (PV/T) la cual integra módulos fotovoltaicos y un colector solar térmico, los que pueden generar simultáneamente electricidad y energía térmica, Fu et al. [26] realizan un conjunto de experimentos complementados con análisis de energía-exergía para estudiar un colector PV/T en el desempeño de una BCAES-ED, los cuales encuentran que el

COP promedio de la bomba de calor alcanzo el valor de 4,01 cuando es expuesta a una fuerte radiación solar. Otro tipo de colector solar es el de tubo evacuado de cañería en U, utilizado por Raisul Islam et al [22] en el estudio del desempeño de una BCAES que usa CO₂ en un ciclo transcrito. Una aplicación novedosa la presenta Yang et al. [27] al utilizar un colector solar integrado al techo de una vivienda para la calefacción de una casa en la ciudad de Tianjin, China; obteniendo un COP en el rango de 2,97- 4,16 y reportándose condiciones confortables en la habitación.

La mayoría de los estudios sobre colectores solares planos como evaporador de una BCAES-ED son de colectores desnudos, los cuales deben mantener un rango de 5 - 10 °C centígrados por encima de la temperatura ambiental para incrementar el desempeño del sistema y mantener una alta eficiencia. Otros tipos de colectores solares como los PV/T o de tubos evacuados de cañería en U podrían incidir en el costo inicial del sistema, pero otros aspectos económicos y serios cuestionamientos ambientales incentivan en la actualidad el estudio de estas aplicaciones.

Compresor

Los parámetros investigados en los compresores de una BCAES-ED son la eficiencia y la velocidad del compresor, también es frecuente encontrar en la literatura el desajuste que existe entre la capacidad de bombeo de flujo másico del compresor y la disponibilidad de energía captada en el colector solar lo cual afecta el desempeño del sistema. Los resultados experimentales de Chaturvedi et al. [28] concluyen que el COP del sistema mejora considerablemente reduciendo la velocidad del compresor cuando la temperatura del ambiente se incrementa como sucede al pasar los meses de invierno a verano. Otro estudio realizado por Chow et al. [29] describen las ventajas de utilizar tres velocidades de diseño para el compresor en un sistema que opera todo el año ya que esto mejora el COP del sistema promedio anual. Análisis numéricos realizados por Raisul Islam et al. [22] estudian del desempeño de una BCAES que usa dióxido de carbono en un colector/evaporador de tubo evacuado de cañería en U, muestran que disminuyendo la velocidad del compresor de 1500 a 900 rpm el COP del sistema se incrementa en un 57 %.Hawlder et al. [30] desarrollan una BCAES-ED para desalinizar agua, sus resultados muestran una eficiencia máxima del colector de 88,4 % cuando simultáneamente se incrementa la radiación solar y la velocidad del compresor a 1800 rpm. Este incremento de radiación solar y aumento de la velocidad del compresor produce un incremento en la ganancia de calor en el condensador según Raisul Islam et al. [22], el problema radica en el probable desajuste con la temperatura ambiental lo que inevitablemente reduce su COP según lo demuestra Soldo et al. [31] en sus estudios. Amin y Hawlder [32] analizan un sistema de desalinización conformada por una BCAES-ED y una unidad evaporadora de efecto simple los resultados concluyen que para alcanzar una óptima producción de agua destilada la velocidad del compresor debe ser acoplada correctamente a un rango particular de radiación solar.

El 86 % de los estudios revisados utiliza compresores recíprocos, también se utilizan compresores de tipo rotativo y de tornillo, conservar la velocidad del compresor a baja velocidad no solo mejora el COP del sistema sino que también prolonga la vida útil del mismo. Una BCAES-ED tiene mejor desempeño cuando usa compresores de velocidad variable.

Condensador

Algunas BCAES-ED para calentamiento de agua utilizan el condensador al mismo tiempo como intercambiador de calor y tanque de almacenamiento, una tubería de cobre es el material comúnmente utilizado para que fluya el refrigerante y se produzca el efecto de transferencia de calor con el agua fría en el tanque de agua. Hawlder et al. [9] reportan el uso de un condensador de fibra de vidrio en sus investigaciones, en estudios posteriores Hawlder et al. [30] aplican un sistema de BCAES-ED para desalinización de agua, utilizando un condensador con una tubería que alimenta agua mediante rociadores. Chow et al. [29] analizan numéricamente una BCAES-ED para calentamiento de agua y encuentra que el incremento de calor ganado en el condensador puede ser influenciado por varias velocidades de diseño del compresor, al realizar esto se obtienen un mayor COP y una mayor radiación solar. Zhang et al. [33] estudian los efectos de la carga de refrigerante y los parámetros estructurales de una BCAES-ED para calentamiento de agua, sus resultados muestran que más del 50% del refrigerante existe en el condensador y que el sistema es más productivo con una longitud de tubería en el condensador de 70 m con un diámetro interno de 9 mm.

En el diseño de condensadores se debe tener en cuenta la velocidad óptima del refrigerante para obtener una presión óptima a la hora deseleccionar el tamaño de la tubería, además se debe recalcar la importancia de reducir el flujo de calor por radiación para un mejor desempeño del condensador. Otros parámetros de importancia que influyen en el diseño de un condensador son la temperatura del agua, la temperatura ambiental, el coeficiente de transferencia de calor y las propiedades del refrigerante que se condensa.

Válvula de expansión

Existen varios tipos de válvulas de expansión, la termostática, la electrónica, y el tubo capilar. Li et al.[34] sugieren utilizar una válvula de expansión electrónica y un compresor de frecuencia variable para acoplar correctamente la capacidad de bombeo de calor del compresor y la capacidad de evaporación del colector para un amplio rango de condiciones ambientales. Soldo et al. [31] realizan el control del flujo refrigerante al evaporador a través de una válvula de expansión electrónica la cual intenta mantener al mínimo estable la

estabilidad del sobrecalentamiento a la salida del evaporador, cuando la estabilidad del refrigerante sobrecalentado es baja la válvula de expansión electrónica incrementa el sobrecalentamiento y la mantiene en el rango de diseño. Chow et al. [29] y Garg et al. [24] utilizan un tubo capilar en su investigación. La mayoría de estudios reportan el uso de la válvula de expansión termostática para reducir la presión del refrigerante de condensación y ajustar el flujo de masa del refrigerante.

Modelo de configuración básica de una BCAES-ED

Una BCAES-ED se muestra en la figura 2, el cual trabaja con el ciclo mecánico de compresión de vapor que se ilustra en la figura 1a, y cuyos procesos termodinámicos se muestran en la figura 1b, los cuales son ampliamente explicado por Cengel y Boles [35].

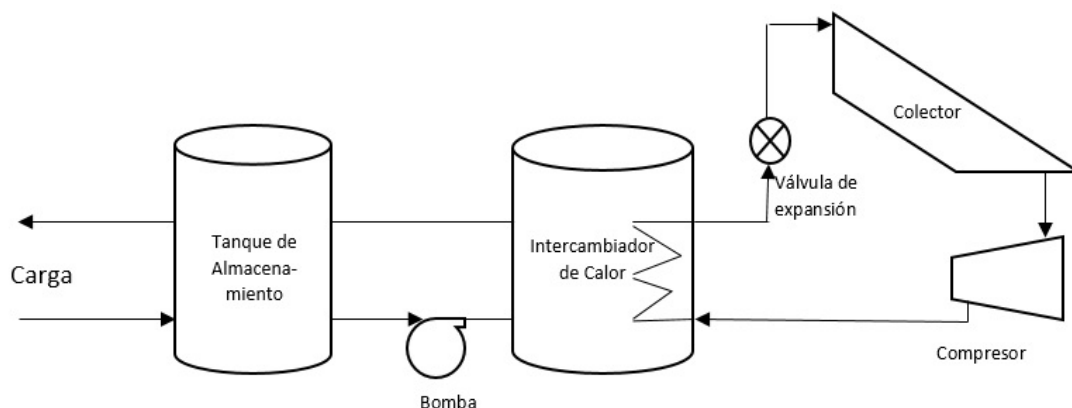


Fig. 2 Bomba de calor de expansión directa asistida por energía solar

Una BCAES-ED es comparada con un sistema convencional solar que utiliza un colector solar plano para calentamiento de agua a temperatura de 45 °C, por Scarpa et al. [36], ambos sistemas utilizan como energía suplementaria un quemador de gas estándar para equilibrar la carga o cantidad de agua caliente de una familia compuesta de cuatro personas, la simulación confirma una alta eficiencia del panel colector/evaporador cuando funciona a una temperatura cercana a la temperatura ambiental, además sus resultados muestran que la BCAES-ED duplica su desempeño con relación al sistema de calentamiento de agua convencional a que usa colectores solares planos. Sun et al. [37] comparan una BCAES-ED y una bomba de calor convencional aplicados al calentamiento de agua, el COP de ambos sistemas es investigados numéricamente y experimentalmente resultando que el COP promedio anual de una BCAES-ED es impresionantemente mucho más alto que el sistema convencional. Yousefi y Moraladi [38] realizan un análisis termodinámico de una BCAES-ED para calentamiento de agua y sus resultados confirman que el COP de la BCAES-ED es considerablemente mayor que la bomba de calor convencional para calentamiento de agua. Fernández-Seara et al. [39] evalúan experimentalmente el desempeño de una BCAES-ED para calentamiento de agua bajo la condición de cero radiación solar, la cual se obtiene junto a un ambiente estable de temperatura ambiental colocando el panel colector/evaporador en una cámara climática, logrando obtener un COP de 3,23 en estas condiciones.

De los estudios presentados se concluye que el desempeño de la tecnología de calentamiento de agua de una BCAES-ED es superior a la tecnología de calentamiento de agua convencional que usa colectores solares planos, así como bombas de calor convencional de calentamiento de agua.

Modelo de configuración avanzada de una BCAES-ED

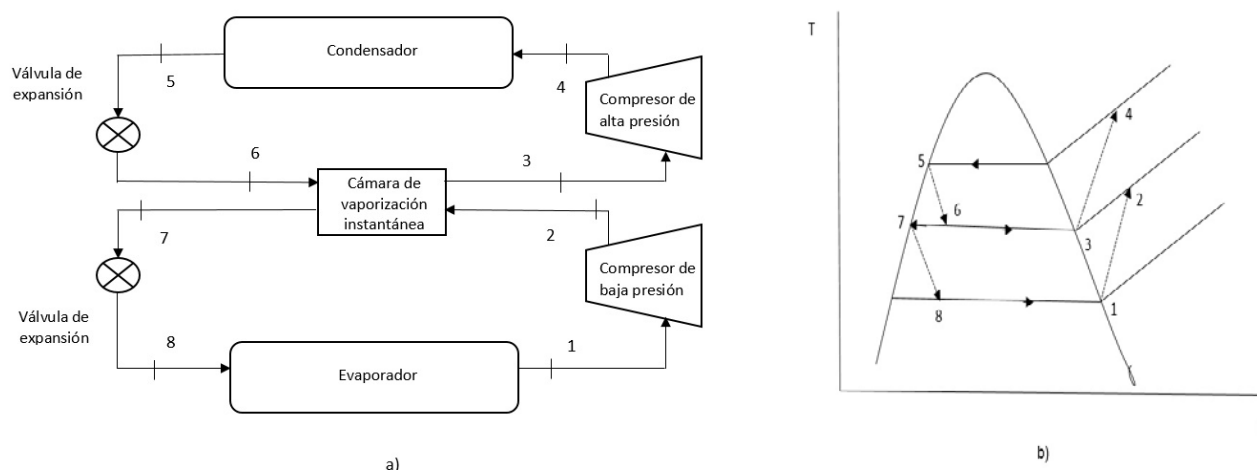


Fig. 3 Bomba de calor de expansión directa de dos etapas asistida por energía solar

Un análisis teórico de BCAES-ED que utiliza dos etapas de compresión para alcanzar aplicaciones de temperaturas correspondiente entre 60-90 °C es propuesto por Chaturvedi et al. [40]. Un ciclo mecánico de compresión de dos etapas se muestra en la Fig. 3a y un diagrama T-s en la figura 3b. El ciclo que se muestra en la Fig. 4a, asume que no existe caída de presión en la transferencia de calor en el panel colector/evaporador y en el condensador. El proceso de compresión se asume no isentrópico y es caracterizado para los dos compresores por la eficiencia de un compresor adiabático. También la caída de presión en las tuberías de conexión es depreciable.

Cuando la temperatura de condensación aumenta por encima de los 55 °C, el desempeño de un sistema que emplea colectores solares planos en una bomba de calor de una sola etapa se deterioran. Se puede utilizar concentradores solares para alcanzar temperaturas en el rango de 75 a 100 °C, pero debido a sus altos costos el uso de bombas de calor de expansión directa de dos etapas con la asistencia de energía solar usando colectores solares planos es una propuesta novedosa que vale considerar.

Coficiente de desempeño de un sistema de configuración básica

El rendimiento térmico de una bomba de calor es caracterizado por el coeficiente de desempeño COP_H definido:

$$COP_H = \frac{Q_H}{W_c} \quad (1)$$

Donde W_c es la potencia de ingreso del compresor y Q_H es el flujo de calor entregado, en general, el COP_H de una bomba de calor está en función de varios parámetros entre los que podemos mencionar al refrigerante, la eficiencia de los componentes estructurales del sistema, la temperatura de la fuente y del disipador de calor. Chaturvedi et al. [28] obtienen de estudios experimentales un coeficiente de operación entre un rango de 2.5 y 4 usando un compresor de velocidad variable. Soldo et al. [31] analizan teórica y experimentalmente una BCAES-ED, mediante el uso de dos colectores solares planos y un compresor recíproco de frecuencia variable y obtienen COP en el rango de 4 – 9, y una eficiencia en el colector solar de 60 a 85% caracterizado durante un periodo de alta radiación solar. Kuang and Huang [41] calculan un coeficiente de desempeño para calentamiento de 2,7 para un BCAES-ED multifuncional que ofrece calentamiento de aire en invierno, aire acondicionado en verano y agua caliente durante todo el año.

En el 2010, Chow et al. [29] visualiza la potencial aplicación de una BCAES-ED para calentamiento de agua en una ciudad subtropical como Hong Kong, el estudio numérico muestra que esta tecnología de calentamiento de agua puede alcanzar un COP de 6,46 en promedio anual. Moreno-Rodríguez et al. [42] y Moreno-Rodríguez et al. [43] desarrollan un modelo teórico y experimental de una BCAES-ED para las condiciones del sur de Madrid, para calentamiento de agua para uso doméstico, encuentran un COP en un rango de 1,7 a 2,9 para una temperatura en el tanque-condensador de 51 °C.

Estudios analíticos, teóricos, numéricos y experimentales han sido ampliamente estudiados por los investigadores con la finalidad de caracterizar el desempeño térmico de una BCAES-ED, obteniéndose el COP en un rango de 1,5 a 9 para diferentes configuraciones y condiciones climáticas de países ubicados en diversas partes del mundo como China, India, Estados Unidos, Italia, México, España, Croacia entre otros.

Coficiente de desempeño de un sistema de configuración avanzado

En una bomba de calor de dos etapas se usa una versión modificada de la ecuación 1 para calcular el COP_H que tome en cuenta el efecto de la doble etapa

$$COP_H = \frac{Q_H}{\Sigma W} \quad (2)$$

Donde ΣW es el trabajo total que ingresa y se calcula de la siguiente manera

$$\Sigma W = W_{12} + W_{34} \quad (3)$$

En general COP_H de una bomba de calor de expansión directa en un sistema de dos etapas está en función de varios parámetros, como refrigerante, la eficiencia de los componentes del sistema, la temperatura de la fuente y del disipador. Chaturvedi et al. [40] encuentran una mejora significativa del coeficiente de operación del sistema cuando se usa las dos etapas de compresión para alcanzar altas temperaturas de condensación. Sin embargo a los mismos niveles de temperatura el sistema de dos etapas requiere un área de colector mayor que los sistemas de una sola etapa.

Eficiencia de acuerdo a la Segunda Ley de la Termodinámica

Los análisis exergéticos identifican los componentes del sistema que tienen un bajo desempeño lo que permite implementar mejoras en el sistema. Para realizar este análisis de eficiencia y pérdidas es necesario expresar en forma general la ecuación de balance de energía que se muestra a continuación.

$$\Sigma \dot{E}_{in} = \Sigma \dot{E}_{out} \quad (4)$$

Para identificar y cuantificar las pérdidas cuando se realiza un análisis exergético ya sea del sistema o de cada uno de sus componentes se debe tener en cuenta la exergía destruida.

$$\Sigma \dot{E}x_{in} = \Sigma \dot{E}x_{out} + \Sigma \dot{E}x_{destruida} \quad (5)$$

La exergía suministrada se expresa mediante la siguiente ecuación

$$\dot{E}x_{suministrada} = \dot{m}[(h - h_o) - T_o(s - s_o)] \quad (6)$$

Donde \dot{m} es el flujo de masa del refrigerante, h es la entalpía específica, s es la entropía específica, T es la temperatura, mientras que el subíndice o significa el estado del punto muerto del refrigerante. La eficiencia exergética será el ratio entre la exergía recuperada y la exergía suministrada.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{recuperada}}{\dot{E}x_{suministrada}} \quad (7)$$

La investigación experimental de Li et al. [34] para las condiciones de Shanghái, presentan un análisis exergético para cada componente de una BCAES-ED, este estudio muestra que la destrucción máxima de exergía ocurre en el compresor seguido del colector solar, el condensador y la válvula de expansión respectivamente. Los estudios exergéticos de Torres-Reyes et al. [44] encuentran una baja eficiencia exergética en la operación de una BCAES-ED, la mayor destrucción de exergía ocurre en el colector/evaporador, seguido por el condensador, compresor y la válvula de expansión. Torres-Reyes y Cervantes [45] concluyen que la eficiencia exergética aumenta cuando se incrementa la carga de calefacción, la mayor pérdida de exergía se encuentran en el panel colector/evaporador. Cervantes y Torres-Reyes [46] deducen del análisis de exergía efectuado que la principal fuente de irreversibilidad se encuentran en el panel colector/evaporador, enfatizando que la radiación solar no es aprovechada en su totalidad en esta parte del sistema. Los estudios de Kara et al. [16], se enfocan en cálculos individuales de eficiencia exergética en cada uno de los componentes de una BCAES-ED, los cuales están en el rango de 10,74 a 88,8 %. La mayor destrucción de exergía ocurre en el compresor, seguido del condensador, el colector solar, la válvula de expansión respectivamente.

Estudios exergéticos teóricos y experimentales realizados por Mohanraj et al. [47] mediante el uso de redes neuronales artificial (ANN) encuentra que la eficiencia exergética promedio del sistema es de 0,26 %; el colector solar tiene la destrucción de exergía más alta. Al colector solar le sigue en destrucción de exergía el condensador, el compresor y la válvula de expansión. Mohanraj et al. [48] presentan estudios teóricos exergéticos usando R-22 y RM30 como refrigerantes, el desempeño exergético del RM30 es un poco menor que el R22 para diferentes condiciones ambientales. Liu y Zhang [49] reportan de estudios numéricos de energía-exergía donde la mayor destrucción de exergía ocurre en el compresor. Kokila y Rajakumar [50] simulan numéricamente en MATLAB una BCAES-ED la cual comparan mediante el COP con otra BCAES-ED ya optimizada mediante análisis de energía-exergía, la BCAES-ED optimizada obtiene un COP máximo de 6,85 muy por encima de la BCAES-ED no optimizada.

Varios estudios numéricos y experimentales analizan la eficiencia de acuerdo a la segunda ley, algunos estudios analizan el sistema en su totalidad y otros lo hacen en cada uno de sus componentes con la finalidad de conocer cuál de ellos presentan pobre desempeño. La mayoría de investigaciones concluyen que las mayores pérdidas de exergía ocurren en el compresor, seguida del panel colector/evaporador.

Conclusiones

De la literatura revisada sobre BCAES-ED se muestra que el modelo básico ha sido extensamente investigado con relación al análisis de eficiencia térmica así como análisis exergéticos del sistema, estos mismo trabajos también muestran la importancia de la radiación solar disponible sobre el panel colector/evaporador y sobre el compresor. El modelo de configuración avanzado de una BCAES-ED ha demostrado teóricamente funcionar con mejor eficiencia en relación a la configuración del modelo básico lo que potencialmente lo convierte en un tema de interés para futuras investigaciones encaminadas a elaborar modelos matemáticos que permitan predecir el desempeño termodinámico de un sistema de calentamiento con la tecnología de bomba de calor a temperaturas en un rango entre 60 a 90 °C alcanzables con la asistencia de la energía solar.

Referencias

- Sporn P, Ambrose ER. The heat pump and solar energy. In: Proceedings of the world symposium on applied solar energy; Phoenix, AZ. 1955.
- Chaturvedi SK, Robert Jr AS, Mei V. Solar Collector as Heat Pump Evaporators. In: Proceedings of the 13th intersociety Energy Conversion Conference; Boston, Mass; 1979.
- Chaturvedi SK, Chiang YF, Robert Jr AS. Analysis of two phase flow solar collector with applications to heat pumps. Solar Energy Engineering. 1980;104:358. ISSN 0199-6231.
- Chaturvedi SK, Shen JY. Thermal performance of a direct expansion solar-assisted heat pump. Solar Energy. 1984;33(2):155-62. ISSN 0038-092X. DOI 10.1016/0038-092X(84)90233-0.
- Chaturvedi SK, Abazeri M. Transient simulation of a capacity-modulated, direct-expansion, solar-assisted heat pump. Solar Energy. 1987;39(5):421-8. ISSN 0038-092X. DOI 10.1016/S0038-092X(87)80060-9.
- Ito S, Miura NA. A comparison of heat pump systems using different types of direct expansion solar collectors. In: Proceedings of biennial congress of the International; Denver, USA.: Solar Energy Society; 1991.
- Ito S, Miura N, Wang K. Performance of a heat pump using direct expansion solar collectors. Solar Energy. 1999;65(3):189-96. ISSN 0038-092X.
- Kong XQ, Zhang D, Li Y, et al. Thermal performance analysis of a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater.

- Energy. 2011;36(12):6830-8. ISSN 0360-5442. DOI 10.1016/j.energy.2011.10.013.
9. Hawlader MNA, Chou SK, Ullah MZ. The performance of solar assisted heat pump water heating system. *Applied Thermal Engineering*. 2001;21(10):1049-65. ISSN 1359-4311.
 10. Mohanraj M, Jayaraj S, Muraleedharan C. Performance prediction of a direct expansion solar assisted heat pump using artificial neural networks. *Applied Energy*. 2009;86(9):1442-9. ISSN 0306-2619. DOI 10.1016/j.apenergy.2009.01.001.
 11. Scarpa F, Tagliafico LA, Bianco V. A novel steady-state approach for the analysis of gas-burner supplemented direct expansion solar assisted heat pumps. *Solar Energy*. 2013;96:227-38. ISSN 0038-092X. DOI 10.1016/j.solener.2013.07.016.
 12. Tagliafico LA, Scarpa F, Valsuani F. Direct expansion solar assisted heat pumps – A clean steady state approach for overall performance analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2014;66(1/2):216-26. ISSN 1359-4311. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.016.
 13. Facão J, Carvalho MJ. New test methodologies to analyse direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water. *Solar Energy*. 2014;100:66-75. ISSN 0038-092X. DOI 10.1016/j.solener.2013.11.025.
 14. Ozgener O, Hepbasli A. A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2007;11(3):482-96. ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/j.rser.2004.12.010.
 15. Hepbasli A, Kalinci Y. A review of heat pump water heating systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2009;13(6):1211-29. ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/j.rser.2008.08.002.
 16. Kara O, Ulgen K, Hepbasli A. Exergetic assessment of direct-expansion solar-assisted heat pump systems: Review and modeling. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2008;12(5):1383-401. ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/j.rser.2006.12.001.
 17. Omojaro P, Breitkopf C. Direct expansion solar assisted heat pumps: A review of applications and recent research. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2013;22:33-45. ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/j.rser.2013.01.029.
 18. Raisul Islam M, Sumathy K, Khan SU. Solar water heating systems and their market trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;17:1-25. ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.011>.
 19. Gorozabel Chata FB, Chaturvedi SK, Almgobel A. Analysis of a direct expansion solar assisted heat pump using different refrigerants. *Energy Conversion & Management*. 2005;49(15):2614-24. ISSN 0196-8904. DOI 10.1016/j.enconman.2004.12.001.
 20. Mohanraj M, Jayaraj S, Muraleedharan C. A comparison of the performance of a direct expansion solar assisted heat pump working with R22 and a mixture of R407C-liquefied petroleum gas. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A. Journal of Power & Energy*. 2009;223:821-33. ISSN 0957-6509. DOI 10.1243/09576509JPE764.
 21. Molinaroli L, Joppolo CM, Antonellis SD. Numerical analysis of the use of R-407C in direct expansion solar assisted heat pump. *Energy Procedia*. 2014;48:938-45. ISSN 1876-6102. DOI 10.1016/j.egypro.2014.02.107.
 22. Raisul Islam M, Sumathy K, Gong J, et al. Performance study on solar assisted heat pump water heater using CO₂ in a transcritical cycle, in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12)*. En. Santiago de Compostela (Spain) 2012.
 23. Zhu M, Xie H, Zhang B, et al. The Characteristics of the Evaporator/Evaporator for Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump System. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2013;1:73-6. ISSN 2327-5901.
 24. Garg R, Kumar A, Kapoor N. An Experimental Thermal Performance Analysis & Comparison of a Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump Water Heater With Unglazed and Single Glazed Collector. *IJRMET*. 2014;4(2):7-10. ISSN 2249-5770.
 25. Sun X, Wu J, Dai Y, et al. Experimental study on roll-bond collector/evaporator with optimized-channel used in direct expansion solar assisted heat pump water heating system. *Applied Thermal Engineering*. 2014;66(1):571-9. ISSN 1359-4311. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.060
 26. Fu HD, Pei G, Ji J, et al. Experimental study of a photovoltaic solar-assisted heat-pump/heat-pipe system. *Applied Thermal Engineering*. 2012;40:343-50. ISSN 1359-4311. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.036.
 27. Yang Z, Wang Y, Li Z. Building Space Heating with a Solar-Assisted Heat Pump Using Roof-Integrated Solar Collectors. *Energies*. 2011 (4):504-2016. ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en4030504.
 28. Chaturvedi SK, Chen DT, Kheireddine A. Thermal performance of a variable capacity direct expansion solar-assisted heat pump. *Energy Conversion & Management*. 1998;39:181-91. ISSN 0196-8904. DOI 10.1016/S0196-8904(96)00228-2.
 29. Chow TT, Pei G, Fong KF, et al. Modeling and application of direct-expansion solar-assisted heat pump for water heating in subtropical Hong Kong. *Applied Energy*. 2010;87(2):643-9. ISSN 0306-2619. DOI 10.1016/j.apenergy.2009.05.036.
 30. Hawlader MNA, Dey PK, Diab S, et al. Solar assisted heat pump desalination system. *Desalination*. 2004;168(168):49-54. ISSN 0011-9164. DOI 10.1016/j.desal.2004.06.168.
 31. Soldo V, Curko T, Balem I. Thermal Performance of a direct expansion solar assisted heat pump in International refrigeration and air conditioning conference. In: 2004.
 32. Amin ZM, Hawlader MNA. Analysis of solar desalination system using heat pump. *Renewable Energy: An International Journal*. 2015;74:116-23. ISSN 0960-1481. DOI 10.1016/j.renene.2014.07.028.
 33. Zhang D, Wu QB, Li JP, et al. Effects of refrigerant charge and structural parameters on the performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump system. *Applied Thermal Engineering*. 2014;73(1):522-8. ISSN 1359-4311. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.077.
 34. Li YW, Wang RZ, Wu JY, et al. Experimental performance analysis on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater. *Applied Thermal Engineering*. 2007;17:2858-68. ISSN 1359-4311. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2006.08.007.
 35. Cengel YA, Boles MA. *Termodinámica*. 7ma ed. México: Mac. Graw Hill/Interamericana editores; 2012. p. 1009. ISBN 978-607-15-0743-3.
 36. Scarpa F, Tagliafico LA, Tagliafico G. Integrated solar-assisted heat pumps for water heating coupled to gas burners; control criteria for dynamic operation. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(1):59-68. ISSN 1359-4311. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2010.08.012.
 37. Sun X, Wu J, Dai Y, et al. Performance comparison of direct expansion solar-assisted heat pump and conventional air source heat pump for domestic hot water. *Energy Procedia*. 2015;70:394-401. ISSN 1876-6102. DOI 10.1016/j.egypro.2015.02.140.
 38. Yousefi M, Moradali M. Thermodynamic analysis of a direct expansion solar assisted heat pump water heater. *Journal of Energy in Southern Africa*. 2015;26:110-7. ISSN 1021-447X.
 39. Fernández-Seara J, Piñeiro C, Alberto Dopazo J, et al. Experimental analysis of a direct expansion solar assisted heat pump with integral storage tank for domestic water heating under zero solar radiation conditions. *Energy Conversion & Management*. 2012;59:1-8. ISSN 0196-8904. DOI 10.1016/j.enconman.2012.01.018.
 40. Chaturvedi SK, Abdel Salam TM, Sreedharan SS, et al. Two-stage direct expansion solar-assisted heat pump for high temperature applications. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(10):2093-9. ISSN 1359-4311. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2008.10.010.
 41. Kuang YH, Wang RZ. Performance of a multi-functional direct-expansion solar assisted heat pump system. *Solar Energy*.

- 2006;80(7):795-803. ISSN 0038-092X.
DOI 10.1016/j.solener.2005.06.003.
42. Moreno Rodríguez A, González Gil A, Izquierdo M, et al. Theoretical model and experimental validation of a direct-expansion solar assisted heat pump for domestic hot water applications. *Energy*. 2012;45(1):704-15. ISSN 0360-5442. DOI 10.1016/j.energy.2012.07.021.
43. Moreno Rodríguez A, García Hernando N, González Gil A, et al. Experimental validation of a theoretical model for a direct-expansion solar-assisted heat pump applied to heating. *Energy*. 2013;60:242-53. ISSN 0360-5442. DOI 10.1016/j.energy.2013.08.021.
44. Torres Reyes E, Pico Nuñez M, Cervantes JG. Exergy analysis and optimization of a solar assisted heat pump. *Energy*. 1998;23:337-44. ISSN 0360-5442. I
45. Torres Reyes E, Cervantes JG. Optimal performance of an irreversible solar assisted heat pump. *Energy*. 2001;1:107-11. ISSN 0360-5442.
46. Cervantes JG, Torres Reyes E. Experiments on a solar-assisted heat pump and a an exergy analysis of the system. *Applied Thermal Engineering*. 2002;22:1289-97. ISSN 1359-4311.
47. Mohanraj M, Jayaraj S, Muraleedharan C. Exergy analysis of direct expansion solar-assisted heat pumps using artificial neural networks. *International Journal of Energy Research*. 2009;33(11):1005-20. ISSN 0363-907X. DOI 10.1002/er.1534.
48. Mohanraj M, Jayaraj S, Muraleedharan C. Exergy Assessment of a Direct Expansion Solar-Assisted Heat Pump Working with R22 and R407C/LPG Mixture. *International Journal of Green Energy*. 2010;7(1):65-83. ISSN 1543-5083 DOI 10.1080/15435070903501274.
49. Liu L, Zhang H. Energy-exergy analysis of a direct expansion solar assisted heat pump floor heating system. In: *International conference on materials for renewable energy & environment (ICMREE 2011)*; 2011.
50. Kokila RN, Rajakumar S. Thermal Performance Analysis and Optimizaion Of Solar Assisted Heat Pump Water Heater. *Applied Mechanics & Materials*. 2014;592-594:2416-21. ISSN 1662-7482. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.2416.