

# Diseños experimentales aplicados a una bomba de calor de expansión directa con energía solar

## Design and analysis of experiments applied to direct expansion solar assisted heat pumps

Francis B. Gorozabel-Chata<sup>I</sup>, Tania Carbonell-Morales<sup>II</sup>

I. Universidad Técnica de Manabí. Departamento de Ingeniería Mecánica. Portoviejo, Ecuador

II. Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables. La Habana, Cuba

Correo electrónico: [fgorozabel@utm.edu.ec](mailto:fgorozabel@utm.edu.ec)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 24 de marzo de 2017

Aceptado: 12 de julio de 2017

### Resumen

La bomba de calor de expansión directa con energía solar es un sistema de conversión de energía que se utiliza para aplicaciones de calentamiento de agua, calentamiento de aire para climatizar edificios, desalinización de agua, secado solar entre otras. El presente trabajo revisa los principales diseños y análisis de experimentos con la finalidad de identificar los objetivos fundamentales de todo experimento los cuales pueden ser: determinar los factores que tienen una influencia significativa, la obtención de un modelo matemático y/o la optimización de un rendimiento. Para lograr esta tarea se describen en detalle la

configuración básica y avanzada de este sistema para así caracterizar su rendimiento térmico mediante el análisis de la energía y/o el análisis basado en la exergía. Esta revisión identifica posibles líneas de investigación en el área de diseño y análisis de experimentos que permitan desarrollar esta tecnología de calentamiento de agua para aplicaciones industriales.

**Palabras claves:** bomba de calor, energía solar, expansión directa, análisis exergético, diseño de experimentos

### Abstract

Direct expansion solar assisted heat pump is an energy conversion system used 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 main analysis and design of experiments with the goal of identify the fundamentals objectives of any experimental design which it may be: determining which factors affect significantly the response, obtain a mathematical model and/or optimizing a response. To reach this task, the basic and advanced configuration model of this system are describing in details with the

purpose of characterize the thermal performance of the system, the types of thermal performance analyses used are the coefficient of performance analysis and the energy-exergy efficiency analysis. This review rightly point out to identify potential area of further investigation that allow researchers develop this technology for heating water for industrial applications.

**Key words:** heat pump, solar assisted, direct expansion, exergy analysis, experimental design.

### Introducción

Una bomba de calor de expansión directa con asistencia de energía solar (BCAES-ED) es una tecnología que combina un sistema convencional de calentamiento solar con una bomba de calor, con la particularidad de que 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 por donde pasa a una fase de transición de líquido a vapor debido a la ganancia de energía solar. Existen dos tipos de configuraciones según Omojaro et al. [1] cuando se refieren a una BCAES-ED, la básica y la avanzada, en el modelo de configuración básica el sistema trabaja con el ciclo mecánico de compresión de vapor a una etapa de compresión y en el modelo de configuración avanzada utiliza dos etapas de compresión. Chaturvedi et al. [2] marcan una clara línea divisoria entre las dos configuraciones cuando concluyen que para cumplir una demanda a temperaturas mayores a 70 °C una BCAES-ED que tenga una configuración básica pierde eficiencia y ventajas económicas sobre los sistemas eléctricos.

Para caracterizar el desempeño térmico de una BCAES-ED se utiliza dos tipos de análisis, el análisis de energía, el cual evalúa el coeficiente de desempeño (COP) del sistema y los métodos basados en la exergía, el cual identifica el o los componentes del sistema que tienen un bajo desempeño lo que permite implementar mejoras en el mismo. Desde que se concibió la idea en 1955 de que la energía solar puede evaporar un refrigerante que circula a través de una bomba de calor utilizando un colector solar como evaporador es solo a

finales de la década de 1970 en que se empiezan a desarrollar estudios analíticos, teóricos, numéricos y experimentales. Una amplia revisión sobre la actualidad y perspectivas de esta tecnología la presentan Gorozabel y Carbonell [3].

El objetivo del presente estudio se enfoca en exponer los diseños experimentales que se aplican comúnmente a la tecnología de calentamiento de agua con una BCAES-ED para desarrollar, mejorar y evaluar este sistema de conversión de energía, usando la caracterización de su desempeño térmico mediante el análisis de energía y/o los métodos basados en la exergía. Para cumplir con este objetivo se pretende describir el problema de investigación, precisar los objetivos del experimento, caracterizar el diseño experimental y valorar las conclusiones del experimento que los autores han reportado en cada uno de los artículos científicos objetos de esta revisión.

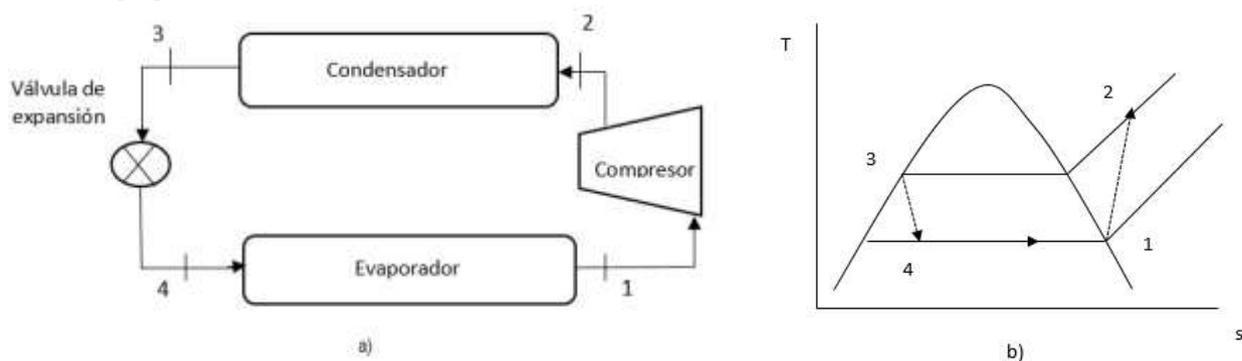
La BCAES-ED es una tecnología con mucho potencial en el mercado mundial, el cual está limitado todavía por algunas barreras económicas y técnicas, que pueden ser superadas con políticas de estado que permitan el desarrollo de la tecnología según concluyen Raisul Islam et al. [4]. Buker y Riffat [5], indican que los promedios de los estudios realizados demuestran que la tecnología de bombas de calor y energía solar térmica tienen el potencial de proveer una alternativa efectiva para diferentes climas y configuraciones.

La presente revisión identifica futuros trabajos de investigación que permitan incrementar la eficiencia energética y exergética de la configuración básica, así como también de la configuración avanzada de una BCAES-ED como tecnología para calentamiento de agua, el cual muestra un gran potencial de desarrollo y una alternativa efectiva para diferentes climas alrededor del mundo.

### Modelo de configuración básica y avanzada de una BCAES-ED

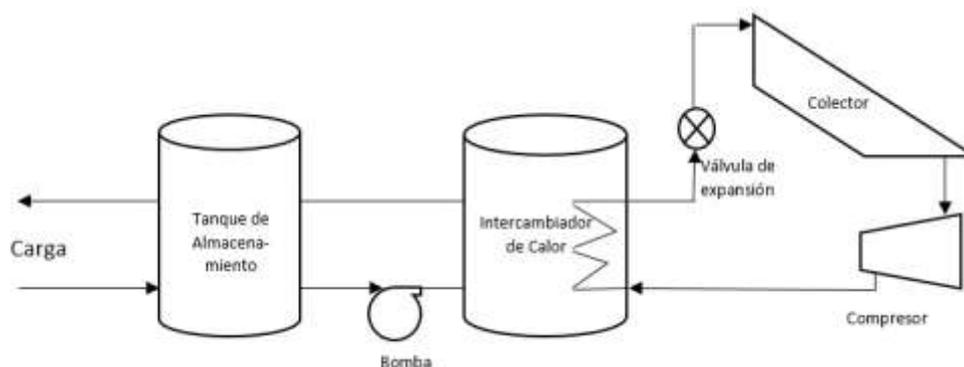
Una BCAES-ED está compuesta por cuatro componentes principales: el panel colector/evaporador, el compresor, la válvula de expansión y el tanque intercambiador de calor conocido como condensador. Amin et al. [6] realizan un exhaustivo estudio sobre el rendimiento térmico de un colector/evaporador solar de dos fases de tipo desnudo cuyos resultados muestran que, en vez de perder energía al ambiente, gana una cantidad significativa de energía debido a la baja temperatura de operación del colector; Gorozabel y Carbonell [7] coinciden con estos resultados cuando analizan experimentalmente el coeficiente de desempeño para zonas tropicales caracterizados por temperaturas ambientales mayores a 25 °C.

La mayoría de las bombas de calor disponibles comercialmente operan en el ciclo mecánico de compresión de vapor como se muestra en la figura 1a, donde el fluido de trabajo es un refrigerante. Un análisis numérico es realizado por Molinari et al. [8] con la finalidad de evaluar el refrigerante 407-C mientras que Kong et al.[9] lo realiza para el Refrigerante 410-A. Entre las principales aplicaciones de una BCAES-ED se encuentran la desalinización de agua reportada por Amin et al. [10] y calentamiento de piscinas para nadar presentada por Starke et al. [11].



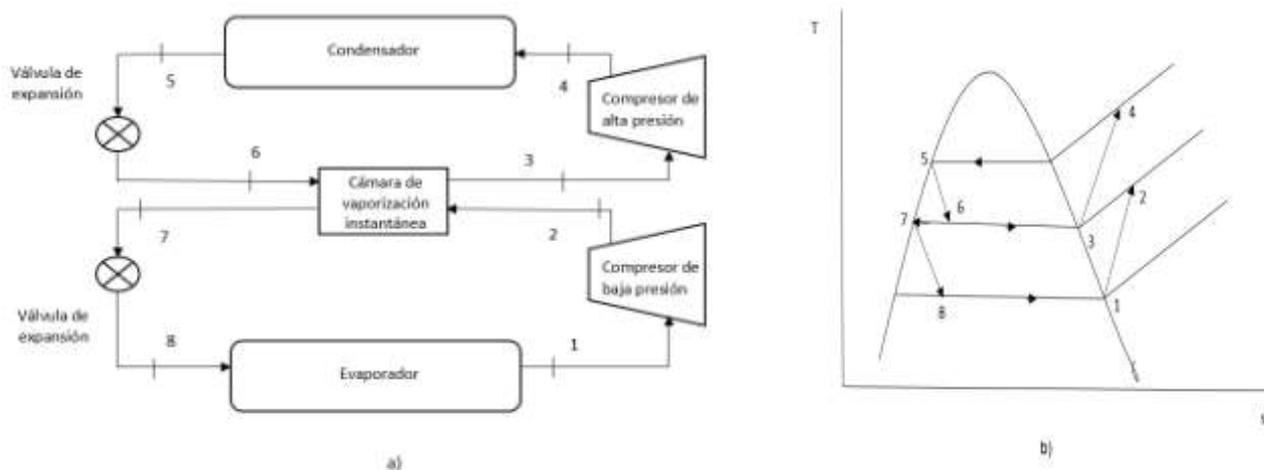
**Fig. 1.** Ciclo mecánico de compresión de vapor

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. En la actualidad Scarpa et al. [12] y Tagliafico et al. [13] han logrado desarrollar un enfoque de estado estable basado en el ciclo de Carnot y el concepto de eficiencia basado en la segunda ley de la termodinámica para relacionar las principales características del sistema y sus interrelaciones con el ambiente sin necesidad de calcular las propiedades del fluido refrigerante.



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

Un análisis teórico de BCAES-ED que utiliza dos etapas de compresión para alcanzar aplicaciones de temperaturas correspondiente entre 60 °C - 90 °C es propuesto por Chaturvedi et al. [14]. Un ciclo mecánico de compresión de dos etapas se muestra en la figura 3a y un diagrama T-s en la figura 3b. El ciclo que se muestra en la figura 3a, 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.



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

En general el  $COP$  para una configuración avanzada de una BCAES-ED está en función de varios parámetros, como el fluido refrigerante, la eficiencia de los componentes del sistema, la temperatura de la fuente y del disipador. Chaturvedi et al. [14] 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.

La tecnología de BCAES-ED es en la actualidad de sumo interés para investigadores quienes ven un gran potencial de desarrollo en la configuración básica como en la avanzada, así lo demuestran los estudios analíticos, numéricos y experimentales reportados en los últimos cinco años con la finalidad de mejorar su rendimiento térmico e introducir nuevas aplicaciones como desalinización de agua, calentamiento de piscinas y secado solar.

### Análisis de energía y métodos de análisis basado en la exergía de una BCAES-ED

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

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

Donde  $W_c$  es la potencia de ingreso del compresor y  $Q_H$  es el flujo de calor entregado, en general, el  $COP$  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.

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

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

Donde  $\Sigma W$  es el trabajo total que ingresa y se calcula de la siguiente manera

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

Se entiende por exergía al trabajo teórico máximo disponible que se obtiene de un sistema de conversión de energía cuando este es llevado a un equilibrio termodinámico con el ambiente, mientras interactúa únicamente con este ambiente. Para realizar un 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 Tsatsaronis y Morosuk [15] los análisis exergéticos identifican el lugar, la magnitud y las causas de las ineficiencias termodinámicas, estas ineficiencias termodinámicas vienen en forma de destrucción o pérdidas de exergía, la destrucción de la exergía se debe a las irreversibilidades existentes dentro del sistema, y las pérdidas de exergía se relacionan con la exergía perdida en el ambiente. Para identificar y cuantificar las pérdidas cuando se realiza un análisis exergético ya sea del sistema, proceso o componente se debe calcular la exergía destruida, la exergía suministrada y la eficiencia exergética.

La exergía destruida se calcula mediante la siguiente ecuación:

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

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.

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

Según Lazzaretto y Tsatsaronis [16] un análisis exergo-económico es una combinación única de análisis de exergía y de costos conducido a nivel de cada componente, que permite al diseñador o al investigador de un sistema de conversión de energía contar con información crucial para el diseño de un sistema costo-efectivo. La exergo-economía es un enfoque para reducir costos basado en la exergía que utiliza el principio de "coste de exergía". Este principio establece que la exergía es la única base racional para asignar valores monetarios al transporte de energía y a las ineficiencias termodinámicas dentro del sistema. El principio del costo de exergía es la base para calcular los costos asociados con cada material y cada flujo de energía en un sistema de conversión de energía. Un análisis exergo-económico completo consiste primero en un análisis exergético, luego un análisis económico y por último una evaluación exergo-económica.

Un análisis exergo-ambiental según Meyer et al. [17] descansa en la premisa de que la exergía es la única base racional para asignar no solo un valor monetario, sino también un valor de impacto ambiental al transporte de energía y a las ineficiencias dentro de cada componente, esto se lo conoce como coste exergo-ambiental. Un análisis exergo-ambiental consiste en un análisis de exergía, una evaluación del ciclo de vida de cada componente relevante del sistema y para todas las corrientes relevantes que ingresan al sistema y por último el cálculo del impacto ambiental asociado con cada flujo de exergía y con la destrucción de la exergía dentro de cada componente del sistema.

Según Tsatsaronis [18] se conoce como Análisis Avanzado cuando se realiza una división de la parte evitable/inevitable y de la parte endógena/exógena de la destrucción de la exergía, del costo de inversión y del componente constructivo relacionado al impacto ambiental en cada componente de importancia en el sistema así como también al costo de la destrucción de la exergía y al impacto ambiental asociado con la destrucción de la exergía; en este análisis se estiman las interacciones entre diferentes componentes para mejorar la calidad de las conclusiones obtenidas de una evaluación exergética, exergo-económica o exergo-ambiental. Entre las principales aplicaciones reportadas por los investigadores se resalta la de Gungor et al. [19, 20] quienes estudian la destrucción de la exergía en la parte evitable e inevitable, así como presentan un análisis exergo-económico avanzado de una bomba de calor impulsada por un motor a gas.

Los análisis de exergía y los análisis basados en la exergía son herramientas de importancia a la hora de evaluar, desarrollar, y optimizar sistemas de conversión de energía como lo es una BCAES-ED en su configuración básica y avanzada. Los análisis avanzados basados en la exergía tienen el potencial de mejorar la calidad de las conclusiones de una evaluación exergética, exergoeconómica, y exergoambiental aplicadas a una BCAES-ED.

## Análisis y diseño de experimentos en una BCAES-ED

Un diseño experimental pretende obtener la máxima información de un proceso, de la forma más rápida, económica, simple y precisa, entre los objetivos de un diseño experimental, según Montgomery [21], se tiene en primer lugar identificar los factores más influyentes en un rendimiento, en segundo lugar es relacionar las

variables independientes o factores con la variable dependiente o rendimiento, y el tercer objetivo es determinar la región de los factores más importantes que conducen al mejor rendimiento posible. En la tabla 1 se muestran diversos estudios experimentales sobre análisis de energía y basados en la exergía aplicados a una configuración básica y avanzada de una BCAES-ED contrastados con los objetivos de un diseño experimental.

**Tabla 1.** Análisis de energía y basados en la exergía, aplicados a una configuración básica y avanzada de una BCAES-ED

No	Objetivos del Diseño Experimental	Referencias (Ref.)	
		Configuración básica	Configuración avanzada
1	Determinar los factores que influyen significativamente en el desempeño térmico de una BCAES-ED.	[22, 23, 24, 26, 27, 29,30, 31, 35, 36, 37, 38]	
2	Obtener un modelo matemático de una BCAES-ED.	[25, 28, 32, 33, 34]	
3	Optimizar el desempeño térmico de una BCAES-ED.	[39, 40, 41, 42, 43, 44, 45]	

En la tabla 2 se muestran los factores investigados que más influyen en el rendimiento de una BCAE-ED en donde el COP es el rendimiento más investigado y la temperatura de evaporación del refrigerante, la radiación solar, la temperatura del agua al ingreso y a la salida del condensador, la temperatura ambiental están entre los factores más investigados.

**Tabla 2.** Factores que más influyen en el rendimiento de una BCAE-ED

Rendimiento	Factores Investigados	Referencias (Ref.)	
		Configuración básica	Configuración avanzada
COP	Temperatura de evaporación del Refrigerante	[22,23,24,30,31,36]	
	Eficiencia del colector	[23, 26-28,35-36]	
	Radiación Solar	[23,24,26,29-31, 35,38]	
	Temperatura ambiental	[23, 26, 29-31,38]	
	Incremento de temperatura	[23]	
	Hora local	[23]	
	Tiempo en días	[26]	
	Tiempo en minutos	[27,29,35]	
	Compresor de frecuencia variable	[24]	
	Temperatura del agua al ingreso y salida del condensador	[24,27,30,31,35, 36,37,38]	
	Temperatura de condensación del refrigerante	[30,31]	
	Calor ganado en el condensador	[24, 36]	
	Caída de presión en el condensador	[30,31]	
	Caída de presión en el colector solar	[30,31]	
	Caída de presión en el compresor	[31]	
	Tipo de colector solar	[35,36,37]	
Consumo de energía en el compresor	[35,36]		
Tecnología de calentamiento de agua	[38]		

Al objetivo de determinar los factores que influyen significativamente en el desempeño térmico de una BCAES-ED podemos resumir las siguientes conclusiones: Kush [22] recomiendan evitar temperaturas de evaporación mayores de 25 °C - 30 °C debido a una mejora marginal del COP ya que estas imponen una penalidad en la eficiencia del colector. Chaturvedi y Shen [23] demuestran la importancia de acoplar correctamente el área del colector solar y la masa de bombeo del compresor. Más adelante Chaturvedi et al. [24] encuentran mejoras significativas en el rendimiento del sistema bajando la velocidad del compresor cuando la temperatura ambiental se incrementa. De los estudios realizados por Hawlader et al. [26], Kuang et al. [27] y Zhu et al. [35] el COP del sistema es afectado significativamente, por los siguientes factores: velocidad del compresor, la radiación solar, el área del colector y el volumen almacenado. Li et al. [29] encuentran que el sistema alcanzará rendimientos térmicos importantes en condiciones climáticas favorables y valores de COP entre 3,11 y 3,23 en condiciones de radiación solar cero. Sun et al. [38] concluyen que un análisis de rendimiento anual el COP promedio de una BCAES-ED es mucho mayor que el sistema convencional. Las configuraciones y los tipos de colectores afectan el COP del sistema según Zhu et al. [35], Garg et al. [36], y Sun et al. [37].

En la tabla 3 se revisan los modelos matemáticos desarrollados para mejorar el desempeño térmico de una BCAES-ED, entre los principales objetivos propuestos por los investigadores tenemos a Ito et al. [25] quien determina el efecto que tiene el espesor de cobre y la distancia entre tubos en el plato absorbedor de una BCAES-ED. Soldo et al [28] desarrollan un modelo matemático que permita la optimización de los componentes del sistema y los parámetros de operación. Fernández-Seara et al. [32] determinan el efecto de tener radiación solar en el desempeño térmico de una BCAES-ED. Moreno Rodríguez et al. [33-34] desarrollan y validan un modelo que determina los parámetros de operación de una BCAES-ED y Cervantes y Torres Reyes [40] determinan una expresión para describir el COP óptimo considerando las irreversibilidades internas y externas en la optimización termodinámica de una BCAES-ED.

**Tabla 3.** Modelos Matemáticos reportados en una BCAES-ED

Modelo matemático	Rango de aplicación	Ref.
$W_c = 4,3 (T_{w,1} - 273,15) + 151$ $COP = a_i + b_i(T_{w,p} - T_e) \quad (i = 1 \text{ a } 4)$ $T_{w,1} = \text{Temperatura del agua al ingreso}$ $T_{w,p} = \text{Temperatura del agua promedio}$ $T_e = \text{Temp. de evaporación del refrigerante}$	$a_1 = 8,0; b_1 = -0,17; \text{para } 0 < (T_{wp} - T_e) \leq 20 \text{ K}$ $a_2 = 6,6; b_2 = -0,10; \text{para } 0 < (T_{wp} - T_e) \leq 30 \text{ K}$ $a_3 = 5,7; b_3 = -0,07; \text{para } 0 < (T_{wp} - T_e) \leq 50 \text{ K}$ $a_4 = 3,7; b_4 = -0,03; \text{para } 0 < (T_{wp} - T_e) \leq 60 \text{ K}$	[25]
$\eta_{col} = 0,684 - 13,4 \frac{(T_e - T_a)}{I} R^2 = 0,86$ $\eta_{comp} = 0,32 \ln(f \cdot \dot{m}_{ref}) + 0,885$ $\eta_{col} = \text{Eficiencia del colector}$ $\eta_{comp} = \text{Eficiencia del compresor}$ $f = \text{Frecuencia}$ $\dot{m}_{ref} = \text{masa del refrigerante}$	$700 < I < 1000 \frac{W}{m^2}; 10 < pc < 13,5 \text{ bar}$ $15 < T_a < 30 \text{ }^\circ\text{C}; 14 < T_c < 26 \text{ }^\circ\text{C}$ <p>Válido en el rango 25 a 55 HZ</p>	[28]
$\eta_v = 0,9953 - 0,037 PRR^2 = 0,86$ $COP = -0,0501(T_w - T_a) + 3,980 R^2 = 0,9718$ $W_c = 5,2032 (T_w - T_a) + 310,62 R^2 = 0,993$ $W_c = 4,9538 (T_w - T_a) + 275,56 R^2 = 0,978$ $W_c = 4,2037 (T_w - T_a) + 256,80 R^2 = 0,987$ $W_c = 4,0703 (T_w - T_a) + 234,87 R^2 = 0,982$	<p>Válido para <math>3 &lt; PR &lt; 7</math></p> <p>Válido para <math>7,8^\circ\text{C} &lt; T_a &lt; 21,9^\circ\text{C}</math></p> <p>Válido para <math>T_a = 21,9^\circ\text{C}</math></p> <p>Válido para <math>T_a = 16,9^\circ\text{C}</math></p> <p>Válido para <math>T_a = 11,3^\circ\text{C}</math></p> <p>Válido para <math>T_a = 7,8^\circ\text{C}</math></p>	[32]
$Tcd = 20^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C} + (0,8 T_e + 7^\circ\text{C})$ $Tcd = \text{Temperatura de condensación}$	$Dg = 0,8$ $Dg = \text{Término de arrastre}$	[33-34]
$COP_{max} = \frac{\frac{1}{4} U A T_a [\tau_c^{-1} - \tau^{-1}] - Q_i}{\dot{W}k}$	$U = \text{Coeficiente de transferencia de calor}$ $T_a = \text{Temperatura del ambiente}$ $\tau_c = \text{radio de temperatura entre la temperatura del refrigerante en el evaporador y el condensador}$ $\tau = \text{radio de temperatura entre la temperatura del ambiente y la temperatura del aire}$ $Q_i = \text{Transferencia de calor interna}$ $\dot{W}k = \text{Potencia eléctrica}$	[40]

Entre las principales conclusiones de obtener un modelo matemático para mejorar el rendimiento de una BCAES-ED tenemos a Ito et al [25] quienes indican que el espesor del plato de cobre de 1mm usado en el experimento se puede reducir a 0,5 mm con muy poca reducción del COP, además la distancia entre los tubos de cobre en el plato de 100 mm puede ser cambiado a 190 mm obteniendo una reducción del COP del 4 %. Soldo et al [28] concluyen que, para prevenir un alto deterioro del COP debido a las inconsistencias entre las condiciones climáticas y la radiación solar, cada componente del sistema debe optimizarse en función del área del colector solar, la capacidad del compresor y las temperaturas de evaporación y condensación. Fernández Seara et al [32] obtienen un COP de 3,23 cuando se evalúa en condición de cero radiaciones solares. Moreno Rodríguez et al [33, 34] encuentran un COP de 1,7 y 2,9 para una temperatura del tanque de agua de 51 °C.

Cervantes y Torres Reyes [40] encuentran que el modelo obtenido representa muy de cerca el rendimiento real del sistema.

En la tabla 4 se muestra un resumen de los análisis basados en la exergía aplicados a una configuración básica y avanzada de una BCAES-ED, entre los varios objetivos de las investigaciones revisadas se encuentran determinar la eficiencia exergetica[39, 41-43], la destrucción de exergía de cada componente[39] y la destrucción total de exergía [39] con la finalidad de identificar las principales fuentes de irreversibilidad en una BCAES-ED y en algunos casos comparar el uso de dos refrigerantes [45] o determinar una expresión [40] para describir el COP óptimo considerando las irreversibilidades internas y externas en la optimización termodinámica de una BCAES-ED.

**Tabla 4.** Análisis de exergía aplicados a una configuración básica y avanzada de una BCAES-ED

No	Objetivos del Diseño Experimental	Configuración	Tipo de Análisis Exergético			
			Convencional	Exergo-económico	Exergo-Ambiental	Avanzado
3	Optimizar el desempeño térmico de una BCAES-ED.	Básica	[39, 40, 41, 42, 43, 44, 45]			
		Avanzada				

Al objetivo de optimizar el desempeño térmico mediante el uso de análisis basados en la exergía de una BCAES-ED podemos resumir las siguientes conclusiones: Torres Reyes et al [39] encuentran que la operación de una BCAES-ED muestra una baja eficiencia exergetica, la mayor destrucción de la exergía ocurre en el panel colector/evaporador solar. Cervantes y Torres Reyes [41] también coinciden en que la principal fuente de irreversibilidad es en el panel colector/evaporador solar resaltando que la radiación solar que ingresa no es totalmente aprovechada. Li et al. [42] al contrario encuentran que la mayor pérdida de exergía ocurre en el compresor, seguida por el colector/evaporador solar, condensador y válvula de expansión respectivamente. Kara et al. [43] concluyen que la eficiencia exergetica de los componentes individuales de una BCAES-ED están en el rango de 10,74% a 88,87 %. Torres Reyes y Cervantes [40] obtienen un modelo donde representa muy de cerca el rendimiento real del sistema. Mohanraj et al [44] confirman con sus resultados que es aceptable utilizar redes neuronales artificiales para predecir la destrucción de la exergía y la eficiencia exergetica de una BCAES-ED. Mohanraj et al.[45] encuentran que el rendimiento exergetico promedio de una BCAES-ED que funciona con RM30 fue ligeramente menor en comparación con el R-22. Sin embargo, el RM30 es una alternativa amigable con la capa de ozono cuando el R22 salga del mercado.

Los estudios experimentales que se presentan desde la tabla 1 hasta la 4, y que se obtienen de las referencias [22-45] concuerdan con recientes estudios analíticos y numéricos presentados por diversos autores entre los que podemos citar a Yousefi et al. [46] quienes analizan y optimizan termodinámicamente una BCAES-ED con aplicación a calentamiento de agua, Kumar et al. [47] y Paradeshi et al. [48] quienes realizan estudios paramétricos de esta tecnología confirmando el uso de redes neuronales artificiales integrada con algoritmos genéticos para predecir el rendimiento térmico de una BCAES-ED, así como caracterizar su funcionamiento en un ambiente cálido y húmedo, Malali et al [49] logran desarrollar una herramienta analítica mediante la combinación de dos modelos para determinar el rendimiento térmico de una BCAES-ED

Los diseños y análisis de experimentos aplicados a una BCAES-ED han permitido identificar los factores que influyen significativamente en el desempeño térmico de una BCAES-ED, así como obtener modelos matemáticos para predecir el comportamiento de la tecnología y optimizar el funcionamiento de esta. Los análisis de energía y los análisis exergeticos convencionales son los más utilizados por los investigadores.

## Incertidumbre experimental

La incertidumbre de diseños experimentales relacionados a una BCAES-ED se encuentran resumidos en la Tabla 5, y han sido estimados según Holman [50], la presión, la temperatura, la radiación solar, el consumo de potencia, el flujo de masa del refrigerante y la velocidad del aire son medidos con los instrumentos catalogados en la columna sensor. La incertidumbre que se presentan en el cálculo de un parámetro en función de varias variables independientes es dada por la siguiente ecuación:

$$W_r = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

Donde  $R$  es una función dada,  $W_r$  es la incertidumbre total,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  son las variables independientes, y  $w_1, w_2, w_3$  es la incertidumbre en las variables independientes.

Tabla 5. Incertidumbre experimental en BCAES-ED

Sensor	Precisión	Parámetro	Incertidumbre	Referencia
Sensor de temperatura	$\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$	PC (W)	5,2 %	[30-31, 44-45]
Termómetros	$\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$	Qcd (W)	4,2 %	
Captador de Presión	$\pm 1 \%$	COP	6,2 %	
Manómetros	$\pm 2 \%$	Td ( $^\circ\text{C}$ )	3,9 %	
Fluxómetros	$\pm 1 \%$	SEPR	7,8 %	
Vatímetro	$\pm 0,5 \%$	$\dot{E}x_{destruida} ; \eta_{ex} \text{ compresor}$	7,6 %	
Medidor de energía digital	$\pm 0,5 \%$	$\dot{E}x_{destruida} ; \eta_{ex} \text{ condensador}$	7,3 %	
Piranómetro	$\pm 5 \text{ W/m}^2$	$\dot{E}x_{destruida} ; \eta_{ex} \text{ válvula exp}$	6,4 %	
Anemómetro	$\pm 0,01 \text{ m/s}$	$\dot{E}x_{destruida} ; \eta_{ex} \text{ colector}$	8,1 %	
Resistencia Térmica	$\pm 0,1 \text{ K}$	Qev	$\pm 4,9 \%$	[33-34]
Fluxómetro	$\pm 0,5 \%$	Qcd	$\pm 4,9 \%$	
Captador de Presión	$\pm 3\%$	COP	$\pm 4,1 \%$	
Vatímetro	$\pm 0,25 \%$			
Anemómetro	$\pm 0,2 \%$			
Piranómetro	$\pm 0,5 \%$			
Sistema de adquisición de datos	$\pm 0,05 \%$			

En los experimentos realizados sobre una BCAES-ED se obtienen datos con muestra únicas cuyas incertidumbres no se pueden descubrir por repetición, al contrario de datos con muestras múltiples cuyos resultados son confiables gracias a las aplicaciones de métodos estadísticos. Entre los tipos de errores que pueden causar incertidumbre tenemos aquellas equivocaciones causadas por los instrumentos de medición, por errores fijos o sistemáticos y aquellos causados por errores aleatorios. Los errores de los parámetros investigados reportan incertidumbres en el rango de 4,1 a 8,1 %.

## Conclusiones

De la literatura revisada sobre análisis y diseño de experimentos sobre una BCAES-ED se muestra que el modelo de configuración básica ha sido ampliamente estudiado con respecto al análisis de energía, logrando caracterizar los factores que influyen significativamente en el rendimiento térmico, así como obtener modelos matemáticos y optimizar la eficiencia de este sistema energético. Con relación a los análisis basados en la exergía el modelo de configuración básica muestra resultados en análisis de exergía convencional, quedando por explorar análisis exergo-económicos y exergo-ambientales de esta tecnología, así como análisis avanzados que logren mejorar las conclusiones a la hora de desarrollar, evaluar y mejorar este sistema de conversión de energía. En relación a los modelos de configuración avanzada, la literatura revisada no reporta diseños experimentales de análisis de energía y análisis basado en la exergía que permitan demostrar los beneficios de esta tecnología reportados en análisis teóricos.

## Referencias

- Omojaro P, Breitkopf C. Direct expansion solar assisted heat pumps: A review of applications and recent research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;22:33-45.
- Chaturvedi SK, Gagrani VD, Abdel-Salam TM. Solar-assisted heat pump – A sustainable system for low-temperature water heating applications. *Energy Conversion and Management*. 2014;77:550-7.
- Gorozabel-Chata F-B, Carbonell-Morales T. Actualidad y perspectivas de una bomba de calor de expansión directa con energía solar. *Ingeniería Mecánica*. 2016;19(1):49-58.
- Raisul Islam M, Sumathy K, Ullah Khan S. Solar water heating systems and their market trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;17:1-25.
- Buker Mahmut S, Riffat SB. Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 3(55):399-413.
- Amin ZM, Hawlader MNA, Shaochun Y. Analysis and Modeling of Solar Evaporator-Collector. *IJUM Engineering*. 2015;16(2):13-29.
- Gorozabel Chata FB, Carbonell Morales T. Análisis del Coeficiente de Desempeño de una Bomba de Calor de Expansión Directa con Energía Solar. In: XVIII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura; La Habana Cuba: Universidad Tecnológica de La Habana; 2016. [Citado octubre de 2016] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/311294467\\_ANALISIS\\_DEL\\_COEFICIENTE\\_DE\\_DESEMPEÑO\\_DE\\_UNA\\_BOMBA\\_DE\\_CALOR\\_DE\\_EXPANSION\\_DIRECTA\\_CON\\_ENERGIA\\_SOLAR](https://www.researchgate.net/publication/311294467_ANALISIS_DEL_COEFICIENTE_DE_DESEMPEÑO_DE_UNA_BOMBA_DE_CALOR_DE_EXPANSION_DIRECTA_CON_ENERGIA_SOLAR)
- Molinari L, Joppolo CM, De Antonellis S. Numerical Analysis of the Use of R-407C in Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump. *Energy Procedia*. 2014;48:938-45.
- Kong XQ, Li Y, Lin L, et al. Modeling evaluation of a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater using R410A. *International Journal of Refrigeration*. 2017; 76(Abril 2017):136-146
- Amin ZM, Hawlader MNA. Analysis of solar desalination system using heat pump. *Renewable Energy*. 2015;74:116-23.
- Starke AR, Cardemil JM, Escobar R, et al. Thermal analysis of solar-assisted heat pumps for swimming pool heating. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017; 39(6):2289-2306.

12. 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; 96:227-238.
13. 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.
14. 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.
15. Tsatsaronis G, Morosuk T. Understanding and improving energy conversion systems with the aid of exergy-based methods. *International Journal of Exergy*. 2012;11(4):518-42.
16. Lazzaretto A, Tsatsaronis G. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*. 2006;31(8–9):1257-89.
17. Meyer L, Tsatsaronis G, Buchgeister J, et al. Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. *Energy International Journal*. 2009;34:75-89.
18. Tsatsaronis G. Recent developments in exergy analysis and exergoeconomics. *Exergy*. 2008;5(5-6):489-99.
19. Gungor A, Erbay Z, Hepbasli A, et al. Splitting the exergy destruction into avoidable and unavoidable parts of a gas engine heat pump (GEHP) for food drying processes based on experimental values. *Energy Conversion and Management*. 2013; 73:309-16.
20. Gungor A, Tsatsaronis G, Gunerhan H, et al. Advanced exergoeconomic analysis of a gas engine heat pump (GEHP) for food drying processes. *Energy Conversion and Management*. 2015; 91:132-139.
21. Montgomery DC. Design and analysis of experiments. 8 th ed. 2013. New Jersey, USA: John Wiley & Sons; 2013.
22. Kush EA. Performance of Heat Pumps at Elevated Evaporating Temperatures with Applications to Solar Input. *Journal of Solar Energy*. 1980;102:203-10.
23. Chaturvedi SK, Shen JY. Thermal performance of a direct expansion solar-assisted heat pump. *Solar Energy*. 1984; 33(2):155-62.
24. Chaturvedi SK, Chen DT, Kheireddine A. Thermal performance of a variable capacity direct expansion solar-assisted heat pump. *Energy Conversion and Management*. 1998;39(3-4):181-91.
25. Ito S, Miura N, Wang K. Performance of a heat pump using direct expansion solar collectors. *Solar Energy*. 1999;65(3):189-96.
26. Hawlader MNA, Chou SK, Ullah MZ. The Performance of Solar Assisted Heat Pump Water Heating System. *Applied Thermal Engineering*. 2001;21(10):1049-1065.
27. Kuang YH, Sumathy K, Wang RZ. Study on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heating system. *International Journal of Energy Research*. 2003;27(5):531-48.
28. Soldo V, Curko T, Balem I. Thermal Performance of a direct expansion solar assisted heat pump In: International refrigeration and air conditioning conference; Indiana, USA. Purdue University; 2004. [Citado octubre de 2016] Disponible en: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/724>.
29. 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;27(17/18):2858-68.
30. 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.
31. 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. *Journal of Power and Energy*. 2009;223(7):821-33.
32. 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 and Management*. 2012;59:1-8.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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(1-2):571-9.
38. Sun X, Dai Y, Novakovic V, 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.
39. Torres-Reyes E, Pico Núñez M, Cervantes JG. Exergy analysis and optimization of a solar assisted heat pump. *Energy*. 1998;23:337-44.
40. Torres-Reyes E, Cervantes JG. Optimal performance of an irreversible solar assisted heat pump. *Exergy*. 2001;1:107-11.
41. Cervantes JG, Torres-Reyes E. Experiments on a solar-assisted heat pump and an exergy analysis of the system. *Applied Thermal Engineering*. 2002;22:1289-97.
42. Li YW, Wang RZ, Wu JY, et al. Experimental performance analysis and optimization of a direct expansion solar-assisted heat pump water heater. *Energy*. 2007;32(8):1361-74.
43. Kara O, Ulgen K, Hepbasli A. Exergetic assessment of direct-expansion solar-assisted heat pump systems: Review and modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008;12(5):1383-401.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. Kumar KV, Paradeshi L, Srinivas M, et al. Parametric Studies of a Simple Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump Using ANN and GA. *Energy Procedia*. 2016, 90:625-34.
48. Paradeshi L, Srinivas M, Jayaraj S. Parametric Studies of a Simple Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump Operating in a Hot and Humid Environment. *Energy Procedia*. 2016, 90:635-44.
49. Malali PD, Chaturvedi SK, Abdel-Salam TM. An approximate method for prediction of thermal performance of direct expansion-solar assisted heat pump (DX-SAHP) systems for water heating applications. *Energy Conversion and Management*. 2016;127:416-23.
50. Holman JP. Experimental methods for engineers 8th ed. New York, USA: Mc Graw Hill; 2012.