

Innovación operativa de un secador asistido por bomba de calor con enfoque energético y aplicación a materiales agroalimentarios

Juan Carlos Gómez-Daza

¹ Departamento de Ingeniería de Alimentos, Universidad del Valle, Ciudad Universitaria Meléndez, Cali, Colombia



Para citaciones: J.C. Gómez Daza, "Innovación operativa de un secador asistido por bomba de calor con enfoque energético y aplicación a materiales agroalimentarios", *Ing-Nova*, vol. 2, no. 2, pp. 132-145, Jul. 2023.
<https://doi.org/10.32997/rin-2023-4345>

Recibido: 13 de junio de 2023
Revisado: 05 de julio de 2023
Aprobado: 10 de julio de 2023

Autor de correspondencia:
juan.gomez.d@correounivalle.edu.co

Editor: Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

Copyright: © 2023. J.C. Gómez Daza. Este es una editorial de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



RESUMEN

Se diseñó y construyó un secador asistido por bomba de calor (SBC) con dos modificaciones fundamentales: se ubicó el compresor del ciclo de refrigeración dentro del circuito del aire y se configuró el control por humedad relativa y no, control de temperatura o temperatura y humedad relativa simultáneamente, como se realiza en general. Se utilizó un diseño experimental central compuesto centrado en la cara con tres variables a tres niveles para un total de 17 experimentos. Las variables consideradas fueron: humedad relativa del aire (%), espesor del material (mm) y velocidad del aire (m/s). Las herramientas estadísticas de análisis usadas son el análisis de varianza ANOVA a un nivel de confianza de 95 %; superficies de respuesta y la prueba de comparación de Snedecor (Fisher). Se trabajó con rodajas de zanahoria de 3 cm de diámetro, con una carga al secador de 1487 ± 98.74 g y con un contenido de humedad inicial de 0.8935 ± 0.024 (bh). Para los aspectos termodinámicos en términos de energía se evaluaron los indicadores [rango encontrado]: velocidad específica de extracción de humedad *SMER* [0.294 – 0.929 kg/kWh], consumo específico de energía *SEC* [1.08 – 3.04 kWh/kg], eficiencia de secado *DE* [64.20 – 71.67 %], velocidad de extracción de humedad *MER* [2.68 – 8.62 kg/h] y velocidad de secado *DR* [0.78 – 1.79 kg/h]. A 50 años de iniciado el uso de este sistema, la configuración de control propuesta se mantiene única.

Palabras clave: secador asistido por bomba de calor; dinámica del secado; análisis termodinámico; simulación.

Operational innovation of a heat pump dryer with an energy focus and application to agri-food materials

ABSTRACT

A heat pump assisted dryer (HPD) was designed and built with two fundamental modifications: the refrigeration cycle compressor was located within the air circuit and the control was configured by relative humidity and not, temperature or temperature and humidity relative simultaneously, as is done in general. A face-centered composite central experimental design with three variables at three levels was used for a total of 17 experiments. The variables considered were: relative air humidity (%), material thickness (mm) and air speed (m/s). The statistical analysis tools used are the ANOVA analysis of variance at a confidence

level of 95%; response surfaces and the Snedecor comparison test (Fisher). Carrot slices of 3 cm in diameter were used, with a load to the dryer of 1487 ± 98.74 g and with an initial moisture content of 0.8935 ± 0.024 (bh). For the thermodynamic aspects in terms of energy, the indicators [found range] were evaluated: specific moisture extraction rate *SMER* [0.294 – 0.929 kg/kWh], specific energy consumption *SEC* [1.08 – 3.04 kWh/kg], *DE* drying efficiency [64.20 – 71.67 %], *MER* moisture extraction rate [2.68 – 8.62 kg/h] and *DR* drying rate [0.78 – 1.79 kg/h]. 50 years after the use of this system began, the proposed control configuration remains unique.

Keywords: heat pump dryer; drying dynamics; thermodynamic analysis, simulation.

1. Introducción

Las primeras aplicaciones del SBC se iniciaron en 1973 y los primeros estudios en la literatura sobre secado asistido por bomba de calor se realizaron en 1976 [1]. La búsqueda de solución al problema de reducir el intensivo consumo de energía en la operación de secado mediante nuevas tecnologías como la asistida por bomba de calor y a la vez incrementar el consumo de alimentos secos sigue vigente, y el análisis de exergía avanzada es una herramienta útil [2].

Algunas aplicaciones son: Simulación de la transferencia de calor y masa de granos de cacao en Malasia [3]; secado de hojas de menta en un SBC asistido por energía solar en Turquía [4]; granos de cacao en Indonesia [5]; características térmicas en jengibre en Tailandia [6]; análisis del comportamiento de un SBC asistido por infrarrojo para zanahoria rayada usando la metodología energía-exergía en Turquía [7]; Diseño y análisis térmico para el secado de alimentos en China [8]; granos de café robusta en China [9] y en Tailandia [10].

Son varias las revisiones que se han realizado respecto al secador asistido por bomba de calor (SBC) [1], [11]-[14]. En esta década, se revisó el uso de varios sistemas de SBC, simple, asistido por energía solar, asistido por infrarrojo, a vacío e intensificado con ultrasonido. Se destaca el control independiente de parámetros de operación (temperatura y humedad), más alta eficiencia energética, mejor desempeño en el secado y menor pérdida de calidad y lo versátil para cultivos frutales sensibles al calor. La difusividad efectiva estuvo en el rango de 10^{-7} a 10^{-11} m²/s. Además, las tecnologías híbridas incrementan el desempeño del sistema [15].

En otro estudio, donde se evaluó el rendimiento de diferentes SBC usados para secar biomateriales, se encontró que estos sistemas reducen el tiempo de secado, consiguen altos coeficientes de desempeño y velocidades específicas de extracción de humedad, lo que se refleja en un bajo consumo de energía. Respecto a destrucción de exergía, en la válvula de expansión es mínima y en el compresor máxima. El SBC-solar es prometedor [16].

En este artículo, se presentarán algunos cálculos referidos al secador asistido por bomba de calor realizados, en particular, se evalúan: la velocidad específica de extracción de humedad (*SMER*), el consumo específico de energía (*SEC*), la eficiencia de secado (*DE*), la velocidad de extracción de humedad (*MER*) y la velocidad de secado (*DR*) [17], se mostrará la modificación operativa, principalmente, el control por humedad relativa del aire y trabajos relacionados con él [18], [19].

2. El sistema secador asistido por bomba de calor

El secador asistido por bomba de calor (SBC), es una coexistencia de dos sistemas termodinámicos, el secador y la bomba de calor. El interés en este sistema se pone de manifiesto en trabajos orientados a la optimización para establecer la factibilidad termo-económica [20], análisis energético y exergético [21], análisis de exergía avanzado [2] y análisis exergoeconómico [22].

Todos los secadores que usan la convección como modo primario de entrada de calor al secador (con o sin entrada de calor suplementario por otros modos de transferencia) pueden adaptarse a una bomba de calor con un diseño apropiado [23]. Los secadores de bomba de calor se pueden clasificar de manera general según el modo de procesamiento, el número de etapas de la bomba de calor, los tipos de entrada de calor auxiliares, y la operación [24]. Además, el secador de bomba de calor se encuentra dentro de los avances en operaciones de secado multipropósito donde se presentan transiciones de fase y estado [25].

En la Figura 1, se representa una distribución esquemática de los componentes de la bomba de calor integrados con la cámara de secado como se ha venido operando convencionalmente [1], [11]-[16].

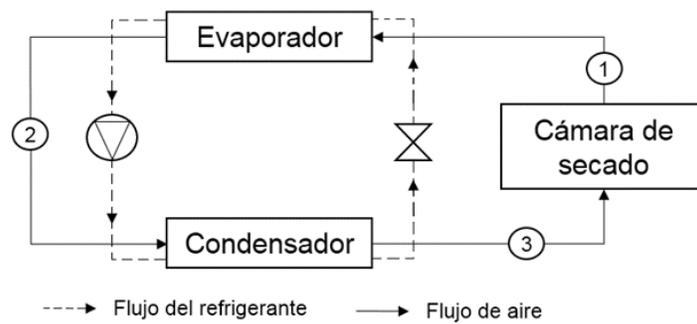


Figura 1. Configuración clásica del SBC [18] (basado en [11])

Y respecto a las variables de operación, además de las presentadas en [17] y [19], en la Tabla 1, se presentan las configuraciones de control u operación convencional.

Tabla 1. Principales variables operativas usadas para el sistema SBC

Material	T_{aire} (°C)	HR_{aire} (%)	V_{aire} (m/s)	Otras	Referencia
Cacao	X	X	X		[3]
Hojas menta	X				[4]
Cacao	X				[5]
Jengibre	X				[6]
Zanahoria	X		X		[7]
Alimentos	X				[8]
Café	X	X	X		[9]
Café	X	X			[10]
Manzana	X	X		Bypass	[26]
Agrícola	X	X		Tiempo	[27]
Cúrcuma	X	X	X		[28]
Trigo	X				[29]
Rodajas ajo	X			Bypass aire	[30]

Tomate	X	X	X		[31]
Maní	X	X			[32]
Algas	X		X	Carga	[33]
Algas mar	X	X			[34]
Guanábana	X				[35]
Uvas	X		X		[36]
Setas shiitake	X				[37]
Semillas	X				[38]
Arroz	X	X			[39]
Ñame	X		X	Voltaje	[40]

3. Modificación operativa del sistema secador asistido por bomba de calor

Se diseñó y construyó un secador asistido por bomba de calor SBCM [17], [41], que se muestra en las figuras 2 y 3. Consiste de un circuito frigorífico conformado por una unidad condensadora de 2.9 kW, una unidad evaporadora de 3.7 kW, un compresor tipo reciprocante de pistón de 0.2 kW (marca Tecumseh) para refrigerante R-22 y una válvula de expansión que lleva la presión de 220 psi a 30 psi. Todos los elementos anteriores se encuentran ubicados dentro del circuito del aire, lo que lo hace diferente a los diseños originales de este tipo de secadores. El caudal de aire es de 0.54 m³/s. La cámara de secado consiste de 5 bandejas de 0.36 x 0.36 m y una separación de 7.5 cm entre ellas. El registro del peso de las bandejas (y la muestra) se realiza con una balanza (marca Lexus, modelo Fenix) [41].

El sistema cuenta con 5 puntos de medición de temperatura y humedad relativa: 2 termohigrómetros análogos ubicados en el retorno de la cámara de secado y dentro de la cabina antes de pasar a través del condensador; 1 termohigrómetro digital ubicado a la entrada de la cámara de secado que hace el control del set point del sistema de refrigeración y 2 termómetros digitales para monitorear la temperatura de evaporación y refrigeración, respectivamente. El control de la humedad relativa se hace mediante un controlador digital MT-530 super (marca Full Gauge) con un rango de control de 20 hasta 85% ± 5% HR (con resolución de 0.1%HR). Se dispusieron termocuplas adicionales para el monitoreo de la temperatura de la cámara y de la muestra en el centro y la superficie (al interior de la cabina de secado). El agua retirada al material se recoge en el colector de condensado ubicado en la parte inferior del equipo [41].



Figura 2. Fotografía del sistema SBCM [41]

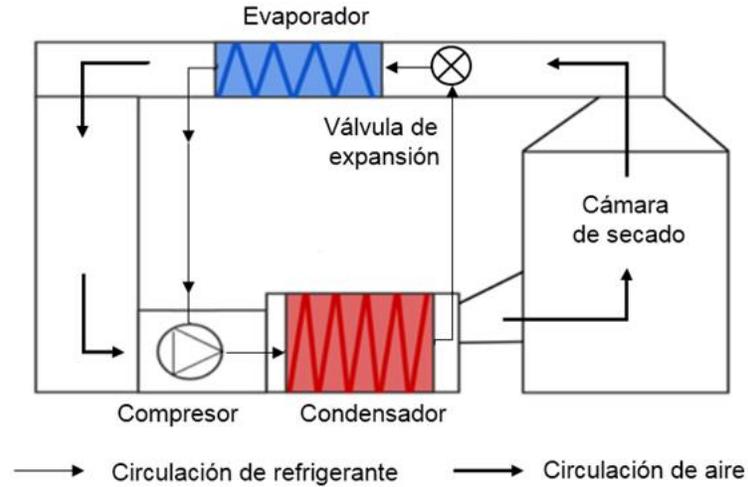


Figura 3. Esquema de configuración SBCM [18] (basado en [17])

4. Resultados

A partir de un diseño central compuesto centrado en la cara de tres factores (humedad relativa del aire, velocidad del aire, espesor del material) [42], se realizó: modelado y simulación de parte de la cámara de secado, aspectos cinéticos y aspectos termodinámicos [17]. En la Figura 4, se presenta el efecto de la humedad relativa en el proceso de secado para tres experimentos [17].

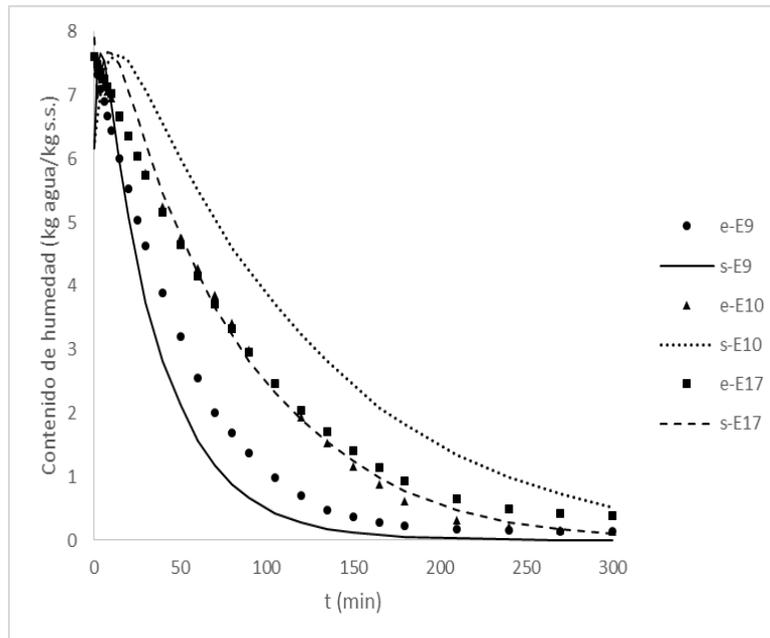


Figura 4. Efecto de la humedad relativa del aire (HR, %) en el comportamiento del contenido de humedad en un alimento [17].

Para validar el control por humedad relativa, en la Figura 5, se presenta el comportamiento de la temperatura en la muestra (a) y la humedad relativa (HR, %), en varios puntos del sistema para uno de los experimentos [17].

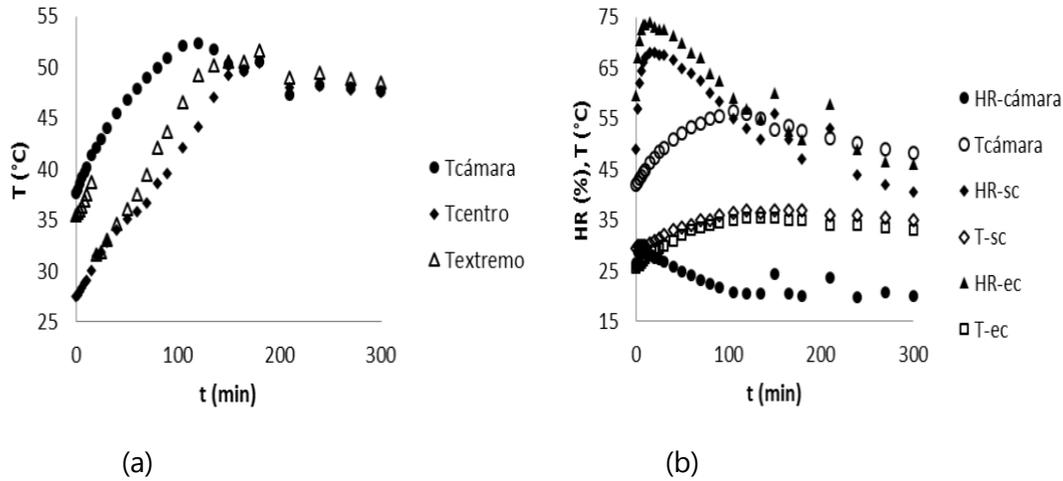


Figura 5. Evidencia experimental de condición isotérmica para el material (a); Evolución de la humedad relativa que evidencia mantener el potencial de secado (b) [17].

Desde el punto de vista energético (termodinámico), un indicador de desempeño que se utiliza para definir el comportamiento de un secador es la velocidad específica de extracción de humedad (*SMER*) que se define según la Ecuación 1:

$$SMER \left[\frac{kg}{kWh} \right] = \frac{\text{cantidad de agua evaporada}}{\text{energía de entrada al secador}} \quad (1)$$

Alternativamente, otro indicador conocido como consumo específico de energía (*SEC*) que es el recíproco de *SMER*, se usa para comparar la eficiencia energética de diferentes tipos de secadores. El consumo específico de energía está dado por la Ecuación 2:

$$SEC \left[\frac{kWh}{kg} \right] = \frac{\text{energía de entrada al secador}}{\text{cantidad de agua evaporada}} \quad (2)$$

La eficiencia de secado (*DE*) está dada por la Ecuación 3:

$$DE [\%] = \left(\frac{T_{\text{aire entrada}} - T_{\text{aire salida}}}{T_{\text{aire entrada}} - T_{\text{aire saturado}}} \right) 10^2 \quad (3)$$

La velocidad de extracción de humedad (*MER*) se calcula empleando la Ecuación 4:

$$MER \left[\frac{kg \text{ agua}}{h} \right] = \dot{m}_a (\omega_{\text{salida}} - \omega_{\text{entrada}}) \quad (4)$$

Y la velocidad de secado (*DR*) se evalúa mediante la Ecuación 5:

$$DR = \frac{\text{agua evaporada}}{\text{tiempo de secado}} \left[\frac{kg \text{ agua}}{h} \right] \quad (5)$$

En la Tabla 2, se presentan los valores calculados para los indicadores energéticos del SBC determinados a partir de las Ecuaciones (1) a (5).

Tabla 2. Indicadores de energía para el SBC [17]

EXP	$SMER_t$	$SMER_o$	$SMER_e$	SEC	MER	DR	DE
1	0.198	0.230	0.377	2.65	2.68	1.47	68.31
2	0.448	0.478	0.783	1.28	7.77	0.79	70.25
3	0.212	0.245	0.402	2.49	4.30	1.61	70.68
4	0.480	0.512	0.840	1.19	7.34	0.78	68.55
5	0.263	0.303	0.497	2.01	4.68	1.79	67.06
6	0.539	0.566	0.929	1.08	7.98	1.16	65.00
7	0.221	0.256	0.420	2.38	3.88	1.71	64.20
8	0.424	0.442	0.725	1.38	8.62	1.12	65.04
9	0.156	0.179	0.294	3.40	5.14	1.33	69.48
10	0.358	0.378	0.619	1.62	6.72	0.78	67.80
11	0.255	0.270	0.442	2.26	5.93	0.87	68.67
12	0.351	0.370	0.606	1.65	5.08	1.29	70.30
13	0.355	0.378	0.620	1.61	5.08	1.11	71.26
14	0.294	0.308	0.505	1.98	4.86	1.31	67.68
15	0.245	0.258	0.423	2.37	4.67	0.87	70.12
16	0.329	0.348	0.571	1.75	6.76	1.08	69.23
17	0.322	0.337	0.552	1.81	6.75	1.22	71.67

En la Tabla 2, los subíndices t , o y e indican que el parámetro $SMER$ fue evaluado al tiempo total (considerando el tiempo de preparación del equipo), al tiempo de operación y escalado, respectivamente. El valor escalado corresponde al valor al tiempo de operación por la razón entre el $SMER$ obtenido a carga plena (10 kg) y el $SMER$ obtenido con la carga de material en cada experimento.

Para tener un panorama más objetivo, aprovechando el diseño experimental ejecutado, se construyeron superficies de respuesta para cada uno de los indicadores de energía. En la Figura 6, se presenta el efecto de la humedad relativa del aire (HR, %) y la velocidad del aire (V, m/s) sobre la velocidad específica de extracción de humedad (SMER).

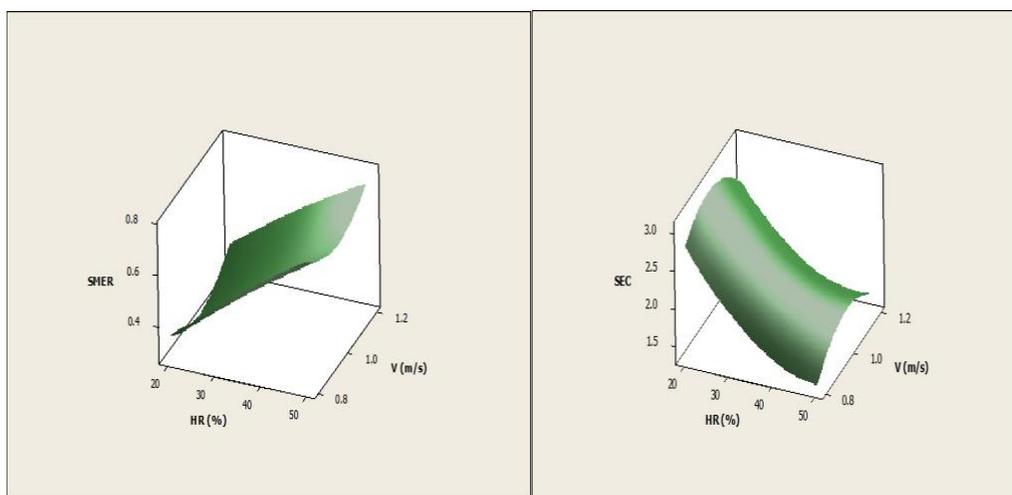


Figura 6. Efecto de la HR (%) y la V (m/s) sobre el SMER y el SEC.

Y mediante la función deseabilidad, en la Tabla 3, se presentan las condiciones que permiten obtener los mejores valores de los indicadores evaluados. Las condiciones se refieren a *HR* (%)-espesor (mm)-velocidad (m/s).

Tabla 3. Resumen de las mejores condiciones para obtener el mejor valor de los indicadores

Criterio	Condiciones
<i>SMER</i>	50-2-1.2
<i>SEC</i>	50-2-1.2
<i>MER</i>	50-4-1.2
<i>DR</i>	20-2-1.2
<i>DE</i>	35-3-1.2

Teóricamente, la hipótesis inicial, del beneficio de disponer el compresor dentro del sistema de flujo de aire, se cumple. Suponiendo velocidades mínimas en el flujo de aire dentro del sistema y con las condiciones establecidas se obtuvo un aporte de 213 W de calor generado por el compresor a través de la convección natural y la radiación, es decir, un aporte del 7.53%. De igual manera, asegurando una velocidad del aire (1.2 m/s) y con las condiciones de fábrica del secador asistido por bomba de calor se obtuvo una disminución de 236 W del calor necesario para aumentar la temperatura del aire para una contribución del 8.34%. También, se comprobó que existen combinaciones de velocidad del aire, temperatura superficial y área superficial del compresor que beneficia el proceso de transferencia de calor llegando a un máximo de ganancia de 415 W es decir el 14.67% del calor total. Las ganancias de calor generadas por el compresor se traducen en una disminución del calor necesario utilizado en la unidad condensadora. Esto, significa que el condensador podría estar sobredimensionado y en consecuencia se obtendría un posible cambio en el diseño de éste [18].

5. Discusión de resultados

De la Tabla 1, es posible inferir que, a la fecha no se ha configurado el secado asistido por bomba de calor, con control por humedad relativa, en todos los casos se privilegia el control de la temperatura, o temperatura-humedad relativa.

De la Tabla 2, se puede inferir que, cuando se determinan indicadores energéticos, es recomendable especificar las condiciones a las cuales fueron evaluados, tanto para que la comparación tenga validez, y no se obtengan valores por fuera de rangos.

La Figura 4, muestra que la humedad relativa del aire tiene efecto sobre el proceso de secado en este sistema. Y de la Figura 5, se evidencia que, por tratarse de un sistema cerrado, el secador trabaja en condiciones definidas por la pareja *HR-T*, que definen la fuerza impulsora o potencial de secado, calculado a partir de la presión de vapor en la superficie del alimento y la presión parcial del vapor de agua en el aire. La fuerza impulsora depende de la *HR* y la temperatura simultáneamente. A *HR* más bajas y temperaturas mayores se logran mayores fuerzas impulsoras. Existen por lo tanto diferentes combinaciones *HR-T* que permiten tener una fuerza impulsora similar. Sin embargo, al conseguirse a un tiempo determinado condición isotérmica, el fenómeno queda gobernado por la parte difusional, asociada a la humedad relativa del aire.

La Figura 6 y la Tabla 3, son soportes cuantitativos que, permiten resaltar la pareja de control humedad relativa del aire (HR , %) y velocidad del mismo (V , m/s), siendo un diferencial innovador, de acuerdo al barrido de la literatura presentado en la Tabla 1, donde siempre se controla también la temperatura.

Para los indicadores de energía (velocidad específica de extracción de humedad, $SMER$; consumo específico de energía, SEC ; velocidad de extracción de humedad, MER ; velocidad de secado, DR ; eficiencia de secado, DE) presentados en la Tabla 2, se tiene que para obtener altos valores del $SMER$ se debe trabajar a HR altas, lo que a su vez permite obtener valores bajos de SEC . Así mismo, para el MER y para el COP se obtienen mayores valores a HR altas. La DR se ve favorecida a condiciones de baja HR y velocidad del aire alta, mientras que para la DE resultan favorables las condiciones experimentales medias.

El $SMER$ es el método más usado para determinar la eficiencia de un sistema de SBC [1]. Se encontraron valores entre 0.294 y 0.929 kg/kWh para el SBC [17]. En general, la eficiencia ($SMER$) y la capacidad (MER) de un SBC son proporcionales al incremento en la temperatura y la humedad del material [43]. Prasertsan & Saensaby [47], encontraron que se obtienen valores mayores para estos parámetros cuando la carga en el secador es mayor. No obstante, Sosle [48], encontró que el $SMER$ se incrementa con la carga pero hasta cierto valor de carga, a partir de la cual disminuye y luego vuelve a incrementarse, obteniendo valores entre 0.334 y 0.356 kg/kWh. El $SMER$ aumenta con el aumento en la HR en varios sistemas de secado incluido el SBC [14], [43].

Respecto a la ubicación del compresor, se sugiere [18] que, con el objetivo de realizar un rediseño adecuado y obtener los resultados esperados para sembrar la idea de la mejora en el funcionamiento del equipo, es necesario determinar las condiciones reales y realizar un análisis más profundo con mediciones exactas y corroborando las condiciones de funcionamiento. Para esto, se plantea la necesidad de realizar un monitoreo o medición de las variables que participan en la transferencia de calor. Por lo tanto, se plantea la necesidad de realizar un monitoreo o medición de las variables que participan en la transferencia de calor. En la Figura 7, se ilustra de manera general los parámetros y los puntos de toma de datos requeridos para el establecimiento de protocolizar la ubicación de compresor [18].

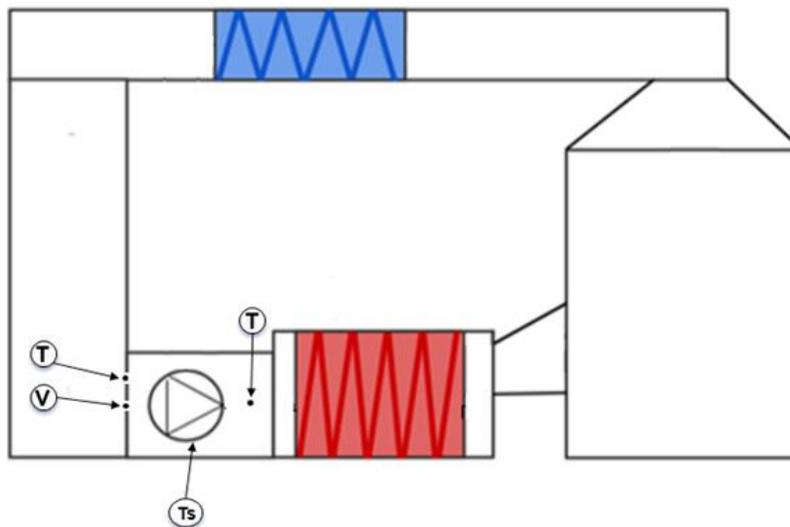


Figura 7. Monitoreo necesario para ratificar la disposición del compresor dentro del circuito de aire [18].

Al 2023, la investigación en torno a este sistema de secado se mantiene activa [27], [29], [31], [38]-[40], [44]-[46].

Entonces, a pesar de que la ubicación del compresor dentro del circuito de aire, tiene un antecedente [49], éste queda difuso en la literatura, pues aparece en un capítulo de secadores de bandeja y túnel. Sin embargo, el control por humedad relativa, si se configura en una innovación para este tipo de sistema, de acuerdo a lo presentado en las figuras 4, 5 y 6, y en las tablas 2 y 3 [17].

6. Conclusiones

Existen combinaciones de humedad relativa y velocidad del aire en el proceso de secado mediante SBC que reducen el consumo energético. Los indicadores son la velocidad específica de extracción de humedad (*SMER*) y el consumo específico de energía (*SEC*).

Se desarrolló y validó una configuración para el SBC que aún no había sido considerada en la investigación que se ha realizado en el mundo. En particular, sólo hay un antecedente de ubicación del compresor dentro del circuito de aire, pero queda difuso, pues aparece en un capítulo ajeno al sistema de secado asistido por bomba de calor. En cuanto a la estrategia de control, este trabajo es innovador, pues no hay antecedentes donde se gobierne el sistema mediante el control de la humedad relativa, siempre se ha realizado por temperatura o combinación temperatura-humedad relativa.

Se apoya la posición favorable que se encontró en la revisión de la literatura para el secador asistido por bomba de calor, donde también se encontró la presencia implícita de resultados contradictorios. Adicionalmente, se logró un conocimiento detallado del comportamiento del sistema que aún no se ha implementado en todo su potencial en Colombia, y al parecer, ni en el mundo, esto permitirá hacer un mejor uso de los recursos energéticos, colaborando así con el desarrollo sostenible.

Finalmente, si hay algo que se pueda llamar conclusión, es el hecho que el desarrollo y análisis del proceso de secado aún continúa siendo un campo fructífero para la investigación. Y hoy, a 50 años de haberse iniciado el uso de esta tecnología, sigue estando abierta la posibilidad de innovación.

Referencias

- [1]. N. Colak, A. Hepbasli. "A review of heat pump drying: Part 1 – Systems, models and studies". Energy Conversion and Management, vol. 50, pp. 2180-2186, 2009. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.04.031>
- [2]. Z. Erbay, A. Hepbasli. "Advanced exergy analysis of a heat pump drying system used in food drying". Drying Technology, vol. 31, pp. 802-810, 2013. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2012.763044>
- [3]. C.L. Hii, C.L. Law, M.C. Law. "Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer". Applied Thermal Engineering, vol. 54, pp. 264-271, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.010>
- [4]. I. Ceylan, A.E. Gürel. "Solar-assisted fluidized bed dryer integrated with a heat pump for mint leaves". Applied Thermal Engineering, vol. 106, pp. 899-905, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.077>

- [5]. M. Yahya. "Experimental study on a solar tunnel heat pump dryer for cocoa beans". *Contemporary Engineering Science*, vol. 9, no. 7, pp. 325-336, 2016. <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2016.6210>
- [6]. K. Chapchaimoh, N. Poomsa-ad, L. Wiset, J. Morris. "Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying". *Applied Thermal Engineering*, vol. 106, pp. 899-905, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.025>
- [7]. M. Aktas, A. Khanlari, A. Amini, S. Sevik. "Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology". *Energy Conversion and Management*, vol. 132, pp. 327-338, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.027>
- [8]. H. Liu, K. Yousaf, K. Chen, R. Fan, J. Liu, A. Soomro. "Design and thermal analysis of an air source heat pump dryer for food drying". *Sustainability*, vol. 10, 3216, 2018. <http://doi:10.3390/su10093216>
- [9]. W. Dong, R. Hu, Z. Chu, J. Zhao, L. Tan. "Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans". *Food Chemistry*, vol. 234, pp. 121-130, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.156>
- [10]. F. Kulapichitr, C. Borompichaichartkul, I. Suppavorasatit, K.R. Cadwallader. "Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee". *Food Chemistry*, vol. 291, pp. 49-58, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.152>
- [11]. N. Colak, A. Hepbasli. "A review of heat pump drying: Part 2 – Applications and performance assessments". *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 2187-2199, 2009. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.04.0317>
- [12]. V. Minea. "Drying heat pumps – Part I: System integration. Review". *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, pp. 643-658, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.11.025>
- [13]. V. Minea. "Drying heat pumps – Part II: Agro-food, biological and wood products. Review". *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, pp. 659-673, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.11.0256>
- [14]. V. Minea. "Heat-pump-assisted drying: Recent technological advances and R&D needs". *Drying Technology*, vol. 31, pp. 1177-1189, 2013. <http://dx.doi.org/10.1080.07373937.2013.781623>
- [15]. F. Salehi. "Recent applications of heat pump dryer for drying of fruit crops: A review". *International Journal of Fruit Science*, vol. 21, no. 1, pp. 546-555, 2021. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1911746>
- [16]. A.B. Loemba, B. Kichonge, T. Kivevele. "Comprehensive assessment of heat pump dryers for drying agricultural products: Review". *Energy Science & Engineering*. <http://doi.org/10.1002/ese3.1326>
- [17]. J.C. Gómez-Daza. "Secado asistido por bomba de calor: Modelamiento, simulación y validación en zanahoria". Tesis PhD, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2014.
- [18]. J.D. Benavides Rodríguez. "Análisis y optimización con fines de rediseño de los componentes de un secador asistido por bomba de calor (HPD)". Tesis Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2018.

- [19]. M.A.M. Daza-Gómez, C.A. Gómez-Velasco, J.C. Gómez-Daza, N. Ratkovich. "3D computational fluid dynamics analysis of a convective drying chamber". *Processes*, 10, 2721, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10122721>
- [20]. M.S. Söylemez. "Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery". *Journal of Food Engineering*, vol. 74, pp. 292-298, 2006.
- [21]. I. Ceylan, M. Aktas, H. Dogan. "Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump". *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 216-222, 2007.
- [22]. A. Hepbasli, N. Colak, E. Hancioglu, F. Icier, Z. Erbay. "Exergoeconomic analysis of plum drying in a heat pump conveyor dryer". *Drying Technology*, vol. 28, pp. 1385-1395, 2010. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2010.482843>
- [23]. A.S. Mujumdar. *Handbook of Industrial Drying-Third Edition*, Taylor & Francis Group, 2006
- [24]. K.J. Chua, S.K. Chou, J.C. Ho, M.N.A. Hawlader. "Heat pump drying: recent developments and future trends". *Drying Technology*, vol. 20, no. 8, pp. 1579-1610, 2002.
- [25]. O. Alves-Filho, Y.H. Roos. "Advances in multi-purpose drying operations with phase and state transitions". *Drying Technology*, vol. 24, pp. 383-396, 2006.
- [26]. M. Jokiel, M. Bantle, C. Kopp, E.H. Verpe. "Modelica-based modelling of heat pump-assisted apple drying for varied drying temperatures and bypass ratios". *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 19, 100575, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100575>
- [27]. A. Sing, J. Sarkar, R.R. Sahoo. "Experimental performance analysis of novel indirect-expansion solar-infrared assisted heat pump dryer for agricultural products". *Solar Energy*, vol. 206, pp. 907-917, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.065>
- [28]. R. Hasibuan, M. Yahya, H. Fahmi, Edison. "Comparative performance of a solar assisted heat pump dryer with a heat pump dryer for Curcuma". *International Journal of Power Electronics and Drive System*, vol. 11, no. 3, pp. 1617-1627, 2020. <https://doi.org/10.1159/ijpeds.v11.i3.pp1617-1627>
- [29]. H.H. Ismaeel, R. Yumrutas. "Investigation of a solar assisted heat pump wheat drying system with underground thermal energy storage tank". *Solar Energy*, vol. 199, pp. 538-551, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.022>
- [30]. H. Liu, K. Yousaf, Z. Yu, A. Riaz, I. Nyalala, M.W.A. Chattha, K. Chen. "Drying process optimization of garlic slices in close-loop heat pump drying system by Box-Behnken design". *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16190>
- [31]. S. Kumar, S.V. Jadhav, B.N. Thorat. "Life cycle assessment of tomato drying in heat pump and microwave vacuum dryers". *Materials Today: Proceedings*, vol. 57, pp. 1700-1705, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.333>

- [32]. K.N. Cerci, E. Hürdoğan. "Performance assessment of a heat pump assisted rotary desiccant dryer for low temperature peanut drying". *Biosystems Engineering*, vol. 223, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemeng.2022.08.009>
- [33]. Z. Hu, Y. Li, H.S. El-Mesery, D. Yin, H. Qin, F. Ge. "Design of new heat pump dryer system: A case study in drying characteristics of kelp knots". *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 32, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101912>
- [34]. J-H. Cheng, W. Yu, X. Cao, L-L. Shao, C-L. Zhang. "Evaluation of heat pump dryers from the perspective of energy efficiency and operational robustness". *Applied Thermal Engineering*, vol. 215, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118995>
- [35]. N.D. Vu, N.T.Y. Tran, T.D. Le, N.T.M. Phan, P.L.A. Doan, L.B. Huynh, P.T. Dao. "Kinetics model of moisture loss and polyphenol degradation during heat pump drying of soursop fruit (*Annona muricata L.*)". *Processes*, vol. 10, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10102082>
- [36]. C. Tunckal, M. Direk, I. Doymaz, Z. Göksel, A. Atak. "Drying kinetics and energy-exergy analysis of an experimental heat pump dryer utilized horseshoe heat recovery heat pipes for drying different grapes". *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 36, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101487>
- [37]. L.Z. Zhang, L. Jiang, Z.C. Xu, X.J. Zhang, Y.B. Fan, M. Adnoui, C.B. Zhang. "Optimization of a variable-temperature heat pump drying process of shiitake mushrooms using response surface methodology". *Renewable Energy*, vol. 198, pp. 1267-1278, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.094>
- [38]. G. Liu, K. Xu, Q. Yang, Y. Zhao, L. Li. "Flow field and drying process analysis of double-layer drying chamber in heat pump dryer". *Applied Thermal Engineering*, vol. 209, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118261>
- [39]. M. Yahya, H. Fahmi, R. Hasibuan, A. Fudholi. "Development of hybrid solar-assisted heat pump dryer for drying paddy". *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 45, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102936>
- [40]. Z. Meng, X. Cui, H. Zhang, Y. Liu, Z. Wang, F. Zhang. "Study on drying characteristics of yam slices under heat pump-electrohydrodynamics combined drying". *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 41, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102601>
- [41]. DARTICO S.A.S. (Cali-Colombia). Manual del usuario para secador de bomba de calor con circuito de operación cerrado-Referencia DSBC1, 2010.
- [42]. J.C. Gómez-Daza, C.I. Ochoa-Martínez. "Kinetics aspects of a dried thin layer carrot in a heat pump dryer". *Dyna*, vol. 83, no. 195, pp. 16-20, 2016. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83.n195.47114>
- [43]. C.O. Perera, M.S. Rahman. "Heat pump dehumidifier drying of food". *Trends in Food Science & Technology*, vol. 8, pp. 75-79, 1997.
- [44]. S. Wei, M. Dongxu, L. Zhifei, J. Weixue, W. Feng, X. Zhang. "A novel absorption-based enclosed heat pump dryer with combining liquid desiccant dehumidification and mechanical vapor recompression: Case study and

performance evaluation". Case Studies in Thermal Engineering, vol. 35, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102091>

[45]. J. Yan, H. Wei, Z. You, H. Wu, J. Zhang, K. Chen, H. Xie. "Design and experiment of a box-type heat-pump dryer with side-ventilating and rack moving". Case Studies in Thermal Engineering, vol. 35, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102641>

[46]. A.D. Le, V.K. Pham, T.T. Nguyen, T.S. Doan, V.N. Nhanh, X.N. Ngoc. "Heat and mass transfer in drying of carrot by radio frequency assisted heat pump drying". Frontiers in Heat and Mass Transfer, vol. 20, no. 25, 2023.
<https://doi.org/10.5098/hmt.20.25>

[47]. S. Prasertsan, P. Saensaby. "Heat pump drying of agricultural materials". Drying Technology, vol. 16, no. 1 y 2, pp. 235-250, 1998.

[48]. V. Sosle. "A heat pump dehumidifier assisted dryer for agri-foods". PhD Thesis, McGill University: Canada, 2002.

[49]. J. Ahmed, M.S. Rahman. "Handbook of food process design". Wiley, 2012.