

FABRICACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SECADOR SOLAR DE PLANTAS AROMÁTICAS

Por Dr. C. Yanoy Morejón Mesa*, Ing. Ismael Lázaro Jiménez Rodríguez*, M. Sc. Yarián Reyes Suárez*
e Ing. Raúl Torres Cepero*

* Universidad Agraria de La Habana.
E-mail: ymm@unah.edu.cu

Resumen

La presente investigación se orientó en el diseño y fabricación de un secador solar de plantas aromáticas. Para el cumplimiento de este objetivo se establecieron las bases teórico-metodológicas necesarias y se utilizaron las herramientas informáticas pertinentes. Entre los principales resultados obtenidos se evidenció que los fundamentos teóricos planteados posibilitaron establecer los parámetros de diseño para un secador solar de plantas aromáticas. Con el empleo de la herramienta informática SolidWorks se realizó el diseño del prototipo. El secador solar fabricado se evaluó empleando 0,8 kg de hojas de laurel; durante el proceso se obtuvo una pérdida de peso de 25 % y una tasa de reducción de humedad de 4,34 %/h, evidenciándose cambios en las principales propiedades físicas y organolépticas de las hojas de laurel. Termodinámicamente se alcanzó un flujo de calor total de 23,86 kW y una eficiencia térmica de 37,4 %, demostrándose que el prototipo desarrollado posee una eficiencia adecuada. Desde el punto de vista económico se alcanzó un costo específico para secar un kilogramo de hojas de laurel de 37,25 peso/kg; teniéndose un valor actual neto (VAN) de 1806,39 peso, una tasa de rentabilidad interna (TIR) del 118,69 %, un plazo de recuperación de la inversión (PRO) de 0,83 años, con una relación beneficio/costo de 2,21, elementos que validan la factibilidad económica del prototipo desarrollado.

Palabras clave: Secador solar, eficiencia térmica, factibilidad económica.

MANUFACTURE AND EVALUATION OF A SOLAR DRYER FOR AROMATIC PLANTS

Abstract

The present investigation was oriented in the design and manufacture of a solar dryer for aromatic plants. For the fulfillment of the proposed objective, the theoretical-methodological bases referring to the subject were established and the pertinent computer tools were used for this purpose. Among the main results obtained, it was evident that the theoretical foundations proposed made it possible to establish the design parameters for a solar dryer for aromatic plants. Using the SolidWorks computer tool, the developed prototype was designed. The manufactured solar dryer was evaluated using 0.8 kg of bay leaves; During the process, a weight loss of 25% and a moisture reduction rate of 4,34 % / h were obtained, showing changes in the main physical and organoleptic properties of the bay leaves. Thermodynamically, a total heat flux of 23,86 kW and a thermal efficiency of 37,4% were achieved, demonstrating that the developed prototype has adequate efficiency. From the economic point of view, a specific cost was reached to dry one kilogram of bay leaves of 37,25 weight / kg; having a net present value (NPV) of 1806,39 pesos, an internal rate of return (IRR) of 118,69 %, a payback period of investment (PRO) of 0,83 years, with a benefit / cost of 2,21, elements that validate the economic feasibility of the developed prototype.

Keywords: Solar dryer, thermal efficiency, economic feasibility.

Introducción

En la actualidad, de 10 a 40 % de los productos cosechados nunca llegan al consumidor. Este comportamiento se presenta principalmente en los países en vías de desarrollo, debido a su descomposición y contaminación [Esper y Muhlbauer, 1998].

Existe una diversa gama de tecnologías poscosecha aplicadas a la preservación de los alimentos perecederos. Sin embargo, siendo el método de secado uno de los métodos más antiguos, es también uno de los más prácticos extendiendo la vida útil del producto y garantizando las propiedades físicas, químicas y nutricionales de los alimentos [Balladin y Headley, 1999].

El secado es un proceso de alto costo, el cual representa entre 35 y 40 % del costo total de producción. Entre los procesos de secado que se aplican en la actualidad se encuentran los métodos industriales de secado, el secado solar y la combinación de ambos como una manera de reducir el consumo de energía y mejorar la calidad del producto [Sagar y Suresh, 2010].

Como los secadores industriales no están al alcance de la mayoría de los pequeños agricultores, el empleo de energías alternativas y/o renovables, de bajo costo y no contaminantes, incrementa la viabilidad económica del proceso al reducir sus costos de aplicación [Curcio *et al.*, 2008; Purohit *et al.*, 2006; Tshewang, 2005].

Los secadores solares son una alternativa para el secado en los países en desarrollo, donde el secado al aire libre es el método de conservación más utilizado por los pequeños agricultores [Purohit *et al.*, 2006].

Teniendo en cuenta que un alto porcentaje de estos agricultores no tienen acceso a la red eléctrica, y el uso de energías mediante combustibles fósiles no ha sido factible debido a los costos, una alternativa eficaz de secado de sus productos es el uso de energías renovables. Varios tipos de secadores solares de pequeña escala se han desarrollado y evaluado teniendo en cuenta su implementación en las regiones tropicales y subtropicales [Esper y Muhlbauer, 1998].

Existen factores económicos, sociales, medioambientales y culturales que son relevantes para el diseño de las tecnologías de secado. Para los productores agrícolas a pequeña escala solamente son significativas las actividades e inversiones que aumentan considerablemente sus ingresos, bien sea reduciendo directamente los costos o aumentando la productividad. Por lo tanto, a menos que los sistemas de secado solar ofrezcan beneficios excepcionalmente atractivos en comparación con el secado al aire libre u otros sistemas de secado, no será posible en la práctica acrecentar su aceptación [Purohit *et al.*, 2006].

Partiendo de esta situación es necesario conocer y mejorar el proceso actual de secado solar de productos agrícolas, y así, reducir las pérdidas poscosecha, aumentar la calidad de los productos, incrementar la eficiencia del proceso y lograr una mayor aceptación por los agricultores [Sagar y Suresh, 2010].

En 2006, las importaciones mundiales de plantas aromáticas registraron operaciones por más de 1 055 000 dólares, cifra que revela un incremento interanual entre 7 % y 44 % durante el quinquenio en estudio.

Los Estados Unidos, Alemania y Japón se consolidaron como los principales consumidores de estos productos. El mercado estadounidense destinó para la importación de estos productos un monto de 188 000 000 dólares, valor que representó un incremento de 9 % respecto a 2005. En el caso específico de Alemania, acumuló compras por un monto de 128 000 000 y un alza quinquenal de 63 %. El mercado japonés, por su parte, se erigió como el tercer destino de las importaciones mundiales de plantas aromáticas y, pese a haber experimentado en 2006 una leve disminución de 3 % respecto a los montos importados en 2005, sus compras en el transcurso del período 2002-2006 oscilaron entre 90 000 000 y 100 000 000 de dólares. Es importante destacar que se aprecia una divergencia en cuanto a los destinos de las importaciones, siendo Europa, Asia y América del Norte los principales compradores de plantas aromáticas.

Todas las especias, plantas aromáticas y condimentos que derivan de ellos tienen propiedades estimulantes para el apetito y la digestión; las excreciones digestivas, incluso el peristaltismo, son favorecidos por el uso de estos ingredientes. Estas propiedades dependen de su composición química, que varía según el grupo vegetal al que pertenece la especie o planta aromática [Tonguino, 2011].

Dentro de la poscosecha el secado es el paso más importante, y sirve para lograr la calidad del producto, ya que de este dependerán las condiciones de comercialización y conservación. Se considera que lo óptimo es llevar el material fresco a 10 % de humedad. Las exigencias de preparación del secado son muy altas y, si las mismas no se cumplen o se realizan en el momento adecuado, se corre el peligro de perder gran cantidad de principios activos. La rapidez del secado, las temperaturas y la circulación de aire son factores que determinan un buen secado. El objetivo es proporcionar un producto con un porcentaje mínimo de humedad en sus tejidos, que conserve color y aroma. Las temperaturas óptimas de secado varían en las diferentes especies, aunque en general van desde los 21° a los 27° C [Fretes, 2010].

El comercio mundial de albahaca en 2013 osciló entre 820 162 000 y 820 177 000 toneladas, respectivamente, y los principales exportadores fueron China, India, Madagascar, Egipto, México; mientras que los principales importadores fueron China, incluyendo Hong Kong, los Estados Unidos, Alemania y Madagascar.

Debido a la importancia del manejo poscosecha, específicamente del secado de las plantas aromáticas, es necesario realizar investigaciones que permitan el diseño y la fabricación de un secador solar para las mismas.

Materiales y métodos

1. Bases teórico-metodológicas para la determinación de las propiedades físicas de las plantas aromáticas

El conocimiento de las propiedades físicas de las plantas aromáticas, constituye una información de vital importancia en la ingeniería, para adecuar y operar máquinas, diseñar y construir estructuras de almacenamiento, y establecer sistemas adecuados de transporte; además, es un parámetro fundamental para el diseño de secadores solares, para el análisis de calidad y para el control de procesos que intervienen en el manejo poscosecha. Entre estas propiedades

se pueden citar la talla, la densidad, la masa, el contenido de humedad y la pérdida de peso o variación de masa.

El contenido de humedad es un índice de calidad del producto, que puede expresarse en base humedad o en base seca, según se muestra en la expresión (1). También es posible determinar este parámetro utilizando un medidor de humedad [ASAE, 1972; Klaassen, 1983; Sato, 1994; Ohshita, 1995].

$$Mwb=W/(Wa-W)\times 100; \% (1)$$

donde: W: Contenido de agua, kg; Wa: masa después de secado el producto, kg.

El grado de humedad de las plantas aromáticas es medido por períodos de una hora para observar el cambio en su contenido de humedad, esto se denomina tasa de reducción de humedad por hora, la cual se puede determinar por la expresión (2):

$$Mm=(Mi-Ma)/to ; \% / h (2)$$

donde: Ma: Contenido de humedad después del secado, %; Mi: Contenido inicial de humedad, %; to: Tiempo de operación, h.

Pérdida de peso o variación de masa: Es la diferencia de masa de las plantas aromáticas antes del secado respecto a la misma luego de ser tratado térmicamente, la misma varía de forma ascendente durante el proceso de secado e influye directamente en su tiempo de duración, determinándose mediante la expresión (3) [Thompson, 1985].

$$Pp=(Wb-Wa)/Wb\times 100; \% (3)$$

donde: Pp: Pérdida de peso, %; Wb: masa inicial del producto antes de ser secado, kg; Wa: masa final del producto después de ser secado, kg.

La masa del producto después del secado se puede determinar utilizando una balanza, si no se cuenta con este instrumento de medición, entonces se puede determinar la masa del producto después del secado utilizando expresión (4):

$$Wa=(Wb\times(100-Ma))/((100-Mi)); kg (4)$$

En el caso específico de la determinación de la talla de las hojas de las plantas aromáticas se selecciona de forma aleatoria una muestra de 50 hojas, a las cuales se les mide con el empleo de un micrómetro con una precisión de $\pm 0,001$ mm el espesor o diámetro mínimo; en el caso de los diámetros medio y mayor se determinan con el empleo de un vernier con precisión de $\pm 0,01$; estas mediciones se realizan antes y después de realizar el proceso de secado.

Para la determinación de la densidad volumétrica de las hojas de plantas aromáticas, se selecciona una muestra con una masa de 1 kg, esta se comprime en una probeta hasta reducir al mínimo los espacios intersticiales, al

final de la compresión se observa el volumen ocupado por estas; una vez obtenido este volumen se divide la masa entre el volumen ocupado, obteniéndose de esta forma la densidad volumétrica.

2. Bases teórico-metodológicas para el diseño de secadores solares de plantas aromáticas

El secado generalmente se logra mediante la aplicación de calor a una sustancia con un determinado porcentaje de humedad.

Es muy importante conocer el comportamiento en el secado, así como las condiciones y propiedades del sólido, pues en base a esto se podrá diseñar el secador según las necesidades requeridas. También el estudio del secado comprende un conjunto de problemas como son: las áreas, la mecánica de fluidos, la transferencia de calor y masa, etcétera.

a) Bases para el cálculo de la resistencia estructural de secadores solares de plantas aromáticas.

Para el cálculo de la resistencia estructural de instalaciones de secado y otros elementos de máquinas e instalaciones agrícolas, se deben considerar los fundamentos planteados por Miroliúbov [1979], Feodosiev [1980], Fernández [1981a., 1981b], Stiopin [1985]. En el caso específico de las instalaciones de secado, se debe determinar la resistencia de las bandejas que soportan el material a secar, así como la estructura del secador objeto de estudio, lo cual se determina a través del factor de seguridad (FDS) y de las tensiones resultantes a partir de la tercera hipótesis de resistencia (Von Mises), empleando para ello el sistema informático SolidWorks2017.

b) Bases para el diseño de la cámara de secado.

Para el diseño de la cámara de secado se debe conocer el volumen de producto a procesar (V), el cual se puede determinar mediante la densidad volumétrica del propio producto. En el caso específico de las plantas aromáticas, la densidad volumétrica promedio es de 200 kg/m^3 , de forma tal que el volumen se puede determinar a través de la expresión siguiente:

$$V=W/\rho , m^3 (5)$$

donde:

W: masa de producto de kg; ρ : densidad volumétrica del producto, kg/m^3 .

Según INCOMAQ [1990], citado por [Reinoso, 2006]

El volumen de la cámara de secado (Vcs) debe ser cuatro veces el volumen del producto, de forma tal que este se determina mediante la expresión:

$$Vcs=4\times V, m^3 (6)$$

c) Bases para el diseño de las bandejas de colocación del producto a procesar.

Para la determinación del tamaño de las bandejas se considera lo planteado en Aparicio, *et al.* [2011], la que

plantea que la separación entre bandejas debe ser aproximada a 2 pulgadas, o sea, 4 cm de alto.

Con el conocimiento del volumen de la cámara de secado y el producto a procesar, es posible determinar el volumen de las bandejas (Vb), lo que posibilita a su vez determinar el número de bandejas que se requieren.

El tamaño de la bandeja debe considerarse en función de garantizar una fácil operación de carga y descarga de la instalación de secado.

$$\eta = Qu / (It \times Ac) \quad (7)$$

d) Bases para el diseño del colector solar en instalaciones de secado.

Según Montero [2005], para el diseño de colectores solares normalmente se seleccionan materiales eficientes para el aumento de la temperatura de salida de la corriente de aire, y que a la vez reduzcan el calor perdido por las superficies, es decir, materiales aislantes. Para la placa absorbidora normalmente se escoge aluminio, cobre o acero-galvanizado, normalmente pintado de negro no reflectante y la placa puede ser lisa, corrugada o en forma de V. Para la cubierta se escogen normalmente plásticos transparentes con buenas propiedades mecánicas (metacrilato, policarbonato, polietileno, etc.) y para las paredes, los materiales pueden ser muy diversos, pero deben ser aislantes como lana de vidrio, lana de roca o similares y madera para dar solidez.

La eficiencia del colector solar es un parámetro relevante para comprobar el funcionamiento correcto o no del secador. Un valor común para convección natural es del orden de 40–60 %, siendo mayores para convección forzada con un caudal de aire adecuado.

La eficiencia del colector se define como la relación entre la potencia calorífica que se transmite a la corriente de fluido, y la potencia que le llega al captador solar en forma de energía solar.

$$\eta = Qu / (It \times Ac) \quad (7)$$

donde: Qu: Calor que absorbe la corriente de aire desde que entra al colector hasta que sale del mismo, W; IT: Radiación total sobre la superficie inclinada del colector en W/m², Ac: Área de captación en m².

$$Qu = ma \times C_{pa} \times (T_{fo} - T_{fi}); W \quad (8)$$

donde: ma: es el caudal másico de aire, kg/s; C_{pa}: el calor específico del aire, J/kg°C; T_{fo}: la temperatura de salida del aire en el colector, °C; T_{fi}: temperatura de entrada del aire en el colector, °C.

Para la medición del caudal másico de aire se utiliza un anemómetro PROVA-AVM-05 que brinda la posibilidad de conocer la temperatura ambiente y la velocidad del aire, y tres termómetros con escala 0 a 50°C y grado de precisión de ±0,1°C, respectivamente, siendo uno colocado en la superficie de la capa de las hojas, otro en el fondo de la misma y el tercero en el colector solar. Para determinar las magnitudes del área de la sección transversal de salida

del aire húmedo y el área total del colector y paredes de la instalación de secado, se emplea una cinta métrica de 5 m y grado de precisión de ±1mm; el grosor de la pared del colector y paredes del prototipo se determina con un vernier de ±0,01 mm.

Para sostener la eficiencia del colector solar se consideran los fundamentos planteados por Uriol [2016] respecto a la determinación del balance de energía para cubiertas de polietileno, donde se consideran las hipótesis siguientes:

- No hay gradiente de temperatura a lo largo del espesor de la cubierta y la placa absorbente;
- El sistema está perfectamente aislado, no hay fugas de aire;
- Las capacidades caloríficas de la cubierta, placa absorbente y aislamiento son despreciables.

3. Bases teórico-metodológicas para la determinación de la transferencia de calor en secadores solares de plantas aromáticas

Para el establecimiento de los fundamentos de transferencia de calor en instalaciones de secado, se consideran los criterios planteados por: Faires y Simmang [1978], Bazarov [1988]; Baskakov [1988]; Incropera y Dewitt [1996]; Geankoplis [1998]; Cengel [2002].

Para secar un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos:

- Transmisión del calor para evaporar el líquido.
- Transferencia de masa en humedad interna y líquido evaporado.

La transferencia de calor se define como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas, es decir, siempre que exista una diferencia de temperatura entre diferentes cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor.

Existen tres modos a través de los cuales el calor puede ser transferido desde un cuerpo hacia otro. Estos son conducción, convección y radiación.

4. Bases teórico-metodológicas para la evaluación funcional de la instalación de secado de plantas aromáticas

Según lo planteado por Roa y Ortega [2011] para la evaluación funcional de una instalación de secado se han establecido comportamientos generales para el mismo, es por eso muy importante analizar y definir los parámetros que se toman en cuenta en el momento de diseñarlos.

Parámetros a evaluar durante el proceso de secado:

Al secar las plantas aromáticas se disminuye la cantidad de humedad hasta niveles preestablecidos. La disminución requerida de humedad ΔM, sirve de base para determinar la cantidad de agua que será evaporada.

$$\Delta M = (M_i - M_f) / (100 - M_f) \times 100; \% \quad (9)$$

donde: ΔM: disminución de la humedad, %; M_i: humedad inicial, %; M_f: humedad final, %

Entonces la masa de agua que se debe evaporar es:

$$W_{H_2O} = (W_s \times \Delta M) / (100 - \Delta M); \% \quad (10)$$

donde: W_{H_2O} : masa de agua a evaporar, kg; W_s : masa de materia seca al final del proceso, kg.

5. Bases teóricas para el análisis económico

Con el propósito de determinar la rentabilidad del prototipo fabricado se plantearon las bases para determinar los costos de explotación y de factibilidad económica.

Bases para la determinación del costo de explotación del prototipo:

Para la determinación del costo de explotación (C_{exp}) del prototipo se requiere la determinación de los costos fijos (C_f) y costos variables (C_v) y la suma de estos costos permiten determinar el costo de explotación, [Iglesias, 2002; Hunt, 1983; Ulloa, 1981; Aguilar *et al.*, 1989; Muñante, 2002; Iglesias *et al.*, 1999] es decir:

$$C_{exp} = \sum_{i=1}^n C_{fi} + \sum_{i=1}^n C_{vi}; \text{ peso/h} \quad (11)$$

Costos específicos (C_{esp}). Los costos específicos definen el costo en peso por cada unidad de trabajo realizada, es decir, la relación existente del costo de explotación en peso/h, entre la productividad (P_{inst}) en t/h, para el prototipo se determina por:

$$C_{esp} = \frac{C_{exp}}{P_{inst}}; \text{ peso/t} \quad (12)$$

La productividad de la instalación de secado se obtiene a partir de la relación entre la cantidad de agua removida en el proceso y el tiempo requerido para alcanzar la hume-

dad adecuada para el almacenamiento o posterior procesamiento.

$$P_{inst} = \frac{W}{t_o}; \text{ kg/h} \quad (13)$$

Resultados y discusión

1. Resultados de la determinación de las principales propiedades físicas de las hojas de laurel

Con el propósito de elevar la productividad y eficiencia del proceso de secado se desarrolló un secador solar para plantas aromáticas, el cual fue diseñado, fabricado y evaluado en el Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA).

Para el proceso de evaluación se tomó una muestra de hojas de laurel recién cosechadas (sin secar), provenientes de la finca La Joya; la muestra tenía una masa inicial de 0,8 kg, a la cual se le determinó el comportamiento de sus propiedades físicas, antes y después del proceso antes mencionado; entre las propiedades determinadas, se pueden citar: la talla, el contenido de humedad y la masa final del producto después de secado.

Para la determinación de la talla de las hojas de laurel se tomaron 50 muestras de forma aleatoria, en dos momentos, antes del proceso de secado y después del mismo; para ello se utilizó un vernier con una precisión de 0,01mm, con el cual se determinaron las dimensiones ortogonales: largo (L) y ancho (a), mientras que para el espesor (es) se utilizó un micrómetro con una precisión de 0,001 mm; con estos valores se determinaron el diámetro medio geométrico (D_g) y el diámetro medio aritmético (D_a).

Como se puede apreciar en la tabla 1, con la realización de proceso de secado solar se disminuyen los valores de las dimensiones ortogonales y en correspondencia los diámetros, producto del encogimiento de las hojas, as-

Tabla 1. Comportamiento de la talla de las hojas de laurel antes y después del proceso de secado

Dimensiones ortogonales promedios, mm	Hojas de laurel (Antes de secado)	Hojas de laurel (Después de secado)	Diferencia, mm
Largo (L), mm	66,54	64,35	2,19
Ancho (a), mm	35,94	32,94	3,00
Espesor (es), mm	0,36	0,29	0,07
Diámetros			
Diámetro medio geométrico (D_g), mm	9,51	8,20	1,31
Diámetro medio aritmético (D_a), mm	34,28	30,31	3,97

pecto que demuestra que el proceso de secado influye de forma directa en estas propiedades.

Para comprender mejor los resultados mostrados en la tabla 1 y apreciar la influencia del proceso de secado, se tomaron imágenes de las hojas antes y después de ser sometidas al proceso de secado, estas se pueden apreciar en la figura 1.



a)



b)

Fig. 1. Hojas de laurel: a) antes del proceso de secado; b) después del proceso de secado.

Como se puede apreciar en la figura anterior, antes de ser sometidas al proceso de secado las hojas tenían una coloración verde intenso y después del secado tomaron un color verde opaco con tendencia a carmelita.

Otra propiedad observada fue la textura; antes del secado las hojas poseían una marcada elasticidad (no se fracturaban con facilidad) y después de secadas se fracturaban con facilidad, aspecto que demuestra la relación existente entre el contenido de humedad y la textura.

A su vez se determinó la influencia del secado en la pérdida de humedad y masa, observándose ello a partir de la relación entre el contenido de humedad y la masa inicial y final de la muestra analizada (Tabla 2).

2. Resultados del diseño y fabricación del prototipo para el secado solar de plantas aromáticas

Partiendo del principio de funcionamiento del secador solar de plantas aromáticas fabricado (Fig. 2), el cual cuenta con un colector solar cuyas dimensiones son 1500 x 500 x 96 mm, y una cámara de secado cuyas dimensiones son 1000 x 500 x 400 mm; la importancia de elevar las temperaturas tanto en el colector solar como en el interior de la cámara de secado, y la necesidad de lograr una extracción adecuada del aire, lo cual es esencial para elevar la eficiencia del proceso, se realizaron los cálculos de resistencia estructural para garantizar que el prototipo soporte las cargas a las que se somete y las deformaciones máximas que este puede soportar cuando las bandejas estén llenas de hojas de plantas aromáticas.



Fig. 2. Secador solar de plantas aromáticas desarrollado en la investigación.

Tabla 2. Comportamiento de la pérdida de humedad y masa de las hojas de laurel durante el proceso de secado

Masa inicial, kg	Masa final, kg	Contenido de humedad inicial, %	Contenido de humedad final, %	Cantidad de agua removida, kg
0,8	0,6	35	13,13	
Pérdida de peso, %		Tasa de reducción de humedad, %/h		0,2
25		4,34		

Con el propósito de evaluar la resistencia estructural del prototipo se determinaron las tensiones máximas, el desplazamiento y la deformación unitaria a las que se somete el mismo; para ello se empleó el sistema informático SolidWorks 2017, el cual mediante los elementos finitos considera el criterio de Von Misses.

Para determinar estos valores se tomó como referencia una masa de 10 kg, considerándose la capacidad volumétrica de las bandejas que se sitúan en la cámara de secado del prototipo, las que tienen un volumen de $0,007\text{m}^3$.

Como se observa en la figura 3 (a) el desplazamiento máximo se obtiene entre el límite superior del colector de polietileno y el borde inferior de la cámara de secado, alcanzando un valor de 2,3 mm, observándose que los desplazamientos límites se encuentran en los puntos céntricos; en la figura 3 (b) se observa que la deformación unitaria alcanza un valor de $9,69 \times 10^{-4}$ y en la figura 3 (c) se muestra que la tensión máxima que se obtiene es de $1,5 \times 10^7$ Pa, en la base de la cámara de secado, la cual al ser comparada con la tensión máxima admisible del material, demuestra la resistencia estructural del prototipo.

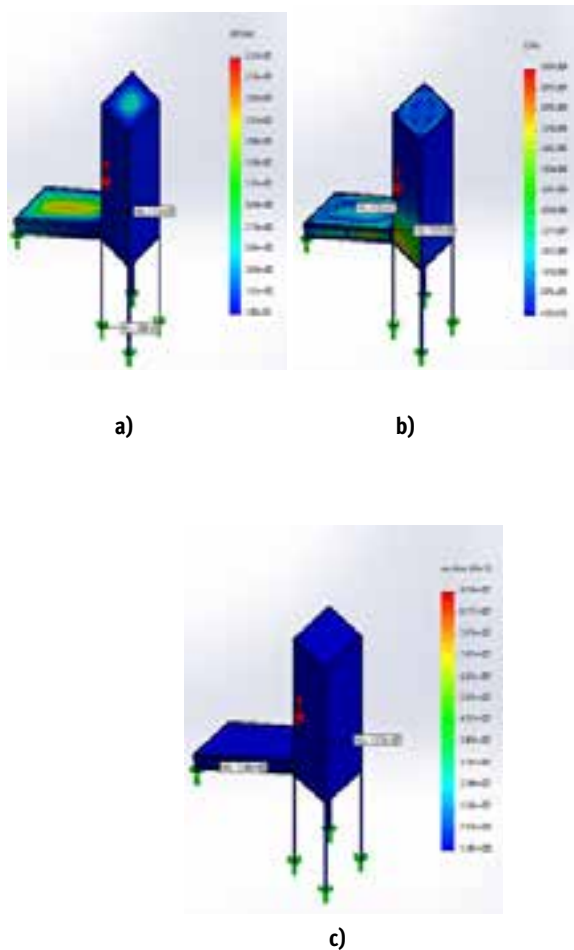


Fig. 3. Valores de resistencia: a) desplazamiento, b) deformación unitaria y c) tensiones máximas al aplicar una carga de 10 kg.

3. Resultados de la transferencia de energía en la instalación de secado propuesta

Los flujos de calor que responden a los tres principios de transferencia de energía, son resultados de gran importancia por las características que deben presentar este tipo de sistema, los cuales deben lograr temperaturas superiores a la del medioambiente para realizar un proceso de secado eficiente, sin dañar la calidad fisiológica del producto a secar. Los resultados de los flujos de calor se determinaron por separado para la cámara de secado y el colector solar.

Tabla 3. Resultados del flujo de calor obtenido en las partes componentes del sistema de secado propuesto

Materiales	Q, kW				Área, m^2	Eficiencia térmica, %
	Conducción	Radiación	Convección	Total		
Cámara de secado	15	0,19	-0,060	15,13	1,63	37,4
Colector	8,35	0,11	-0,033	8,43	0,89	
Total	23,35	0,30	-0,093	23,56	2,52	

Como se aprecia en la Tabla 3, considerando una temperatura externa o ambiente promedio de $32,1^\circ\text{C}$, una temperatura interna promedio de $39,58^\circ\text{C}$ y un coeficiente de conductividad térmica para el polietileno de $0,25 \text{ W/m.K}$, se obtuvo un flujo de calor por conductividad térmica de 23,35 kW, lo que demuestra que la energía que incide sobre el polietileno empleado en el secador es absorbida y esto posibilita el incremento de temperatura en el interior de la instalación.

El flujo de calor por radiación térmica se determinó a través de la Ley de Stefan-Boltzmann, específicamente empleando la ecuación que permite conocer la transferencia de calor por radiación para cuerpos reales, teniéndose que la temperatura incidente en la cubierta de polietileno es de $32,1^\circ\text{C}$, se obtuvo que el flujo de calor por radiación en el colector es de 0,11 kW y un flujo de calor por radiación en la cámara de secado, la cual también posee una cubierta de polietileno, se obtuvo un flujo de calor de 0,19 kW; de esta forma se evidencia que la energía solar incidente sobre la cubierta de polietileno es absorbida en todas las partes del mismo.

Para el análisis del flujo de calor por convección térmica se consideró un coeficiente de traspaso de calor mínimo de $5 \text{ W/m}^2\text{K}$, dado que el aire fluye producto de una convección libre, o sea, no se emplea ningún agente externo

(dispositivo) que aumente la energía cinética del mismo, alcanzando este una velocidad promedio de 1,38 m/s, a su vez mediante los planos concebidos en el diseño, se determinaron las áreas por las que circula el aire caliente y húmedo, tanto en el colector como en la cámara de secado, y con los valores de las temperaturas de la cubierta y el fluido en las regiones analizadas, se obtuvo el flujo de calor total en la cámara de secado de -0,060 kW y en el colector de -0,033 kW; alcanzándose un flujo de calor total por convección de -0,093 kW; con cuyo resultado se evidencia que este flujo de calor a diferencia del obtenido en los mecanismos o formas de conductividad y radiación térmica, es cedido.

A partir de estos resultados se determinó el flujo de calor total de la instalación de secado desarrollada, el cual asciende a 23,56 kW, lo que demuestra que el diseño que se propone funciona como una instalación de secado. A partir de estos valores y del valor de la radiación solar incidente media en Cuba, que es 5 kW/m².dia, se determinó la eficiencia térmica del prototipo, la cual alcanzó un valor de 37,4 %. Este valor significa el porcentaje de energía solar que se aprovecha por el sistema; siendo este valor favorable para efectuar el proceso de secado solar de hojas de laurel. Estos resultados validan los principios termodinámicos sobre los cuales se diseñó el prototipo.

4. Evaluación funcional de la instalación de secado de plantas aromáticas

Con el objetivo de analizar el proceso de secado de las hojas de laurel, se determinó la cinemática del mismo en el interior de la cámara de secado, o sea, se observó el descenso del contenido de humedad en función del tiempo de operación, lo que se muestra en la figura 4.

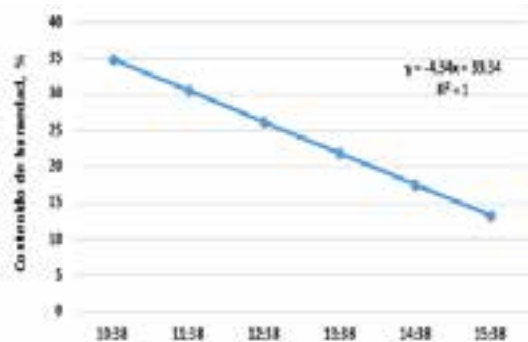


Fig. 4. Cinemática de secado de las hojas de laurel.

Como se evidencia en la figura 4, para lograr la reducción del contenido de humedad desde 35 % hasta 13,13 %, para una muestra de hojas de laurel con una masa inicial de 0,8 kg se requirió solamente de un tiempo de operación de 5 h, reduciéndose de forma lineal el contenido de humedad de la muestra analizada. Esta eficiencia en el proceso de secado está dada por los valores de pérdida de peso o variación de masa y la tasa de reducción de humedad, mostrados en la tabla 2.

Además de estos resultados, la eficiencia de la instalación también se valida con los valores de tasa de vaporización y la productividad alcanzada, los cuales son de 0,02 kg/h y 0,04 kg (removidos de agua)/ h, respectivamente.

Para evaluar el funcionamiento del prototipo se monitoreó el comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara de secado, lo que se puede apreciar en la figura 5.

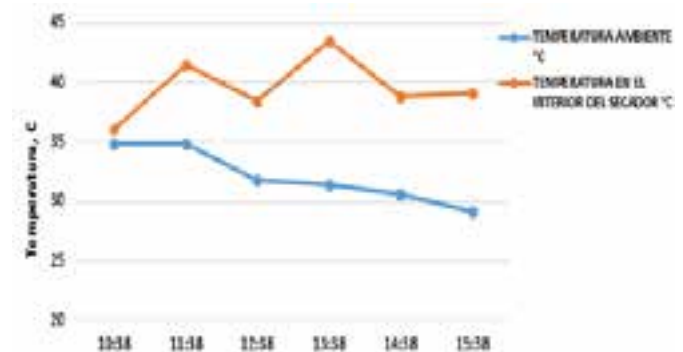


Fig. 5. Comportamientos de las temperaturas ambiente e interior del secador.

Como se puede apreciar en la figura, la mínima diferencia entre la temperatura obtenida en el interior del secador y la temperatura ambiente se obtuvo después de colocadas las muestras en el interior de la instalación (al comenzar el proceso de secado), observándose una diferencia de 1,2 °C; sin embargo, al estabilizarse el proceso de secado se alcanzó una diferencia máxima entre la temperatura obtenida en el interior del secador y la temperatura ambiente de 12,1 °C, diferencia que se obtuvo a la tercera hora (13:38 h) de haber iniciado el proceso de secado.

De forma general durante todo el proceso de secado se logró un incremento promedio de la temperatura de 7,48 °C, la cual se fue incrementando de forma paulatina, sin apreciarse colapsos térmicos, aspecto que revela la funcionalidad de la instalación desarrollada.

5. Resultados del análisis económico

Con el objetivo de realizar un análisis económico profundo respecto al prototipo, se determinó su costo de explotación durante el proceso y su prefactibilidad económica.

a) Resultados de los costos de explotación.

Los costos de explotación del prototipo propuesto se exponen en la Tabla 4.

Tabla 4. Costos económicos por hora de explotación del prototipo.

Costos	Proceso de secado
Costo en depreciación (Cd), peso/h	0,04
Costo en combustible-lubricante (Ccl), peso/h	0
Costo en electricidad (Cel) peso/h	0
Costo en mantenimiento-reparación (Cmr), peso/h	0,003
Costo en salario (Cs), peso/h	1,45
Costo de explotación (C _{exp}), peso/h	1,49
Costo específico (C _{esp}), peso/kg	37,25

El costo en salario tiene como base al salario mínimo vigente en el país, es cual es de 350 peso, así como la cantidad de trabajo realizado en horas. Los costos en combustibles y lubricantes son nulos dado que para su funcionamiento el modelo fabricado no requiere de combustible fósil, ni de lubricantes. El costo por depreciación alcanza un valor de 0,04 peso/h, siendo el precio inicial del prototipo de 536,71 peso, considerándose un porcentaje anual de depreciación de 12 % y una carga anual de 180 días trabajando 8 horas. El costo en mantenimiento y reparación solo considera la sustitución de la cubierta de polietileno, la cual debe ser sustituida anualmente. El costo específico o requerido para secar un kilogramo de hojas de laurel es de 37,29 peso/kg; para obtener estos valores se consideró la productividad alcanzada por el prototipo, la cual alcanzó un valor de 0,04 kg/h, para una tasa de reducción media de humedad de 4,34 %/h.

b) Resultados del análisis de prefactibilidad económica.

Para realizar el análisis de prefactibilidad económica fue necesario determinar el valor actual neto (VAN) de la instalación desarrollada, siendo el costo de inversión de 536,71 peso; según ficha de costo los ingresos que se prevén por año ascienden a 48 000 peso, los cuales se obtienen a partir la carga anual de la instalación la cual de 1 440 h y la productividad mínima obtenida en la investigación, la cual considera el procesamiento de 0,8 kg de hojas de laurel en 5 h; partiéndose de este análisis, anualmente se procesarían 230 kg, lo que equivale a 383 bolsas de hojas de laurel secas, siendo el precio de la bolsa de 125 peso. Se estima que el prototipo tenga una vida útil de 10 años, de esta forma se obtuvo un VAN de 1806,39 peso. También se determinó la tasa de rentabilidad interna (TIR), obteniéndose un valor de 118,69 %.

Conociendo esto es posible determinar el plazo de recuperación (PRO) de la inversión el cual es de 0,83 años; lo cual resulta positivo pues a partir de este año solo se obtienen ganancias.

Otro elemento financiero que demuestra la factibilidad económica de la instalación de secado propuesta es la relación beneficio-costos (B/C), la cual alcanzó un valor de 2,21; este valor demuestra la factibilidad del proyecto.

Conclusiones

Los fundamentos teórico-metodológicos planteados posibilitaron diseñar y fabricar un secador solar para plantas aromáticas.

Con el empleo del secador solar desarrollado se alcanzó una pérdida de peso de 25 % y una tasa de reducción de humedad de 4,34 %/h, evidenciándose variaciones en las principales propiedades físicas y organolépticas de las hojas de laurel.

Con el empleo de la herramienta informática SolidWorks 2017 se realizó el análisis de resistencia estructural del prototipo desarrollado, observándose que resiste las cargas a las que será sometido.

El flujo de calor total del secador solar de plantas aromáticas propuesto, asciende a 23,86 kW, alcanzando una

eficiencia térmica de 37,4%, lo que demuestra que el prototipo desarrollado posee una eficiencia adecuada.

El costo específico o requerido para secar un kilogramo de hojas de laurel es de 37,25 peso/kg; teniéndose un valor actual neto (VAN) de 1806,39 peso, una tasa de rentabilidad interna (TIR) de 118,69 %, un plazo de recuperación de la inversión (PRO) de 0,83 años, con una relación beneficio/costo de 2,21.

Recomendaciones

Introducir el prototipo desarrollado en áreas productivas destinadas a la producción de plantas aromáticas.

Realizar otras investigaciones en las que se empleen otras variedades de plantas aromáticas y medicinales, donde se utilice la capacidad máxima de la instalación.

Realizar investigaciones orientadas al análisis de la calidad de los productos procesados en la instalación propuesta, así como el comportamiento de los principios activos y los aceites esenciales.

Bibliografía y referencias bibliográficas

- AGUILAR, V. A. et. al. (1989). *Administración agropecuaria*. México: Ed. Limusa.
- APARICIO J.J. Y R. E. CALLE (2011). «Diseño de una planta de deshidratación de hierbas aromáticas». Monografía. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador.
- ASAE. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING (1972). *Yearbook*. St Joseph. Mich.
- BALLADIN, D.; O. HEADLEY (1999). «Evaluation of solar dried thyme (*Thymus vulgaris* Linné) herbs». *Renewable Energy*, Vol. 17, No.4, August, p. 523–531. DOI: 10.1016/S0960-1481(98)00757-5.1999
- BASKAKOV, A.R (1988). *Termotecnia*. ENPSES.
- BAZAROV, I. P. (1988). *Thermodynamics*, ENPSES.
- BÉRRIZ, L. (2003). «Secador solar de madera». En *Energía y Tú* 24. La Habana: Ed. Cubasolar.
- CENGEL, Y. A. (2002). *Heat Transfer*. Complete Solution Manual to Accompany, 2nd edition.
- Curcio, S.; M. Aversa, V. Calabro y G. Iorio (2008). «Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation». *Renewable Energy* Vol.87, No. 4, August, p. 541–553.2008
- ESPER, A. Y W. MUHLBAUER (1998). «Solar drying an effective means of food preservation». *Renewable Energy*, Vol.15, No. 1-4, December, p. 95–100. DOI: 10.1016/S0960-1481(98)00143-8.
- FAIRES. V. M.; C. M. SIMMANG (1978). *Thermodynamics*. Editorial Macmillan. 578-600pp. ISBN: 002-33-5530-1.
- FEODOSIEV. V. I. (1980). *Resistencia de Materiales*. Moscú: Ed. Mir.
- FERNÁNDEZ. L. G. (1981a). *Resistencia de Materiales*. Tomo I. La Habana: Ed. Pueblo y Educación.
- FERNÁNDEZ. L. G. (1981b). *Resistencia de Materiales*. Tomo II. La Habana: Ed. Pueblo y Educación 1981.b
- FRETES F. (2010). *Plantas medicinales y aromáticas. Una alternativa de producción comercial*. United States Agency International Development (USAID), Paraguay, mayo 2010.
- GEANKOPLIS, J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. University of Minnesota. Compañía editorial continental, S.A. de C.V. Tercera Edición México, 1998, ISBN: 968-26-1316-7.

- HUNT, D. (1983). Maquinaria agrícola, rendimiento económico, costos, operaciones, potencia y selección de equipo. Manual de laboratorio y cuaderno de trabajo. México: Ed. Limusa.
- IGLESIAS, C. E. (2002). «Administración de la maquinaria agrícola (apuntes para un libro de texto)». México. UACH. 500p.
- IGLESIAS, C.E.; R. P. PANEQUE Y L. SHKILIOVA (1999). *Evaluación y prueba de tractores y máquinas agrícolas*. UACH. Chapingo-UNAH. Chapingo, México.
- INCROPERA, F. AND D. DEWITT (1996). *Introduction to heat transfer. Sixth Edition*. New York: John Wiley and Sons Ed. ISBN-13:978-0471457282.
- KLAASSEN, G. (1983). «Seed drying. International course on seed technology for vegetable crops». University of the Philippines at the Baños, Philippines.
- MIROLIÚBOV, I. (1979). *Problemas de Resistencia de Materiales*. La Habana: Ed. Pueblo y Educación 1979.
- MONTERO, I. (2005). «Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. Proyecto previo a la obtención del título de doctorado». Universidad de Extremadura. Badajoz.
- MUÑANTE, P. D. (2002). «Formulación y evaluación de proyectos (apuntes para el curso). Centro de educación continua y servicios universitarios». Universidad autónoma Chapingo. México (impreso).
- OHSHITA, S. (1995). «Solar grain drying». Group training course in post-harvest rice processing. Department of agricultural engineering. Faculty of agriculture. University of Tokyo.
- PUROHIT, P.; A. KUMAR Y T. KANDPAL (2006). «Solar drying vs. open sun drying: A framework for financial evaluation». *Solar Energy* 80, No. 12, December, p. 1568–1579.
- REINOSO, E. S. (2006). «Diseño y construcción de un secador experimental de hierbas aromáticas con el empleo de energía solar, capacidad de 5 kg». Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero mecánico, Escuela politécnica del ejército, Facultad de ingeniería mecánica, Sangolquí, Ecuador.
- ROA, G. L Y D. B. ORTEGA (2011). «Diseño y construcción de un secador solar por convección de aire caliente automatizado de pequeña escala, para el secado de café para la Universidad Nacional de Loja». Previa la obtención del título de Ingeniero Electromecánico, Universidad Nacional de Loja, Ecuador.
- SAGAR, V.; P. SURESH (2010). «Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review». *Journal of Food Science Technology*. Vol.47, No.1, February, p. 15–26. DOI: 10.1007/s13197-010-0010-8.
- SATO, J. (1994). Solar grain dryer. Lecture textbooks fourth edition. Farm mechanization course and farm machinery design course. Tsukuba, International Agricultural Training Centre. Japan International Cooperation Agency, Japan.
- STIOPIN, P. A. (1985). *Resistencia de Materiales*. Moscú: Ed. Mir. (Texto básico)
- THOMPSON, J. F. (1985). «Modified Air Flow Rate and Temperature Hop drying». American Society of Agricultural Engineers, 28(4): 1297-1230. Michigan.
- TONGUINO, M, I. (2011). «Determinación de las condiciones óptimas para la deshidratación de dos plantas aromáticas; menta (*Mentha piperita*) y orégano (*Origanum vulgare* L.)». Tesis en obtención del Título de Ingeniero Agroindustrial, Universidad técnica del norte Ecuador.
- TSHEWANG, L. (2005). «Technical and financial feasibility of a solar dryer in Bhutan». *Energy for Sustainable Development*, ol.27, No.9, December, p. 17–24).
- ULLOA, T. O. (1981). «Maquinaria agrícola II (apuntes de clases)». Dpto. de fitotecnia. Universidad autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- URIOL, J. L. (2016). «Estudio de colectores solares multipasos con y sin almacenamiento térmico en el secado de productos agrícolas». Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico. Universidad de Piura. Perú.

Recibido: 1ro de febrero 2020.

Aceptado: 15 de febrero de 2020.