

Fundamentos para la modelación y diseño de un secador solar de semillas forrajeras

Foundations for Modeling and Designing a Solar Dryer for Forage Seeds



<http://opn.to/a/zgXiK>

Dr.C. Yanoy Morejón Mesa[✉], Ing. Yoel Rodríguez Gago^{II}, Ing. Dariel Matos Cervera^I

^I Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{II} Instituto de Ciencia Animal (ICA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

RESUMEN. La presente investigación se orientó en establecer los fundamentos para la modelación y diseño de un secador solar de semillas forrajeras. Para el cumplimiento del objetivo propuesto se establecieron las bases teórico-metodológicas referentes a la temática y se utilizaron las herramientas informáticas SolidWorks y Termotransf, estos aspectos posibilitaron realizar la modelación y establecer los parámetros de diseño de un secador solar de semillas forrajeras. Entre los principales resultados obtenidos se realizó la modelación térmica y cinética del diseño concebido, considerándose el medio poroso (capa de semillas a secar) y sin considerar el medio poroso; observándose un incremento de la temperatura y una caída de presión, en el interior de la instalación propuesta, para ambas consideraciones respecto a medio poroso y sin medio poroso. El secador solar de semillas forrajeras concebido, alcanzó un flujo de calor total de 1,146 kW, demostrándose que el diseño propuesto, considerando la capacidad de semillas a procesar, el tiempo estimado de secado y las dimensiones de la instalación, funciona como una instalación de secado.

Palabras clave: semillas de forraje, transferencia de calor, energía solar.

ABSTRACT. The present investigation was oriented to establish the bases for modeling and designing a forage seed solar dryer. In order to comply with the proposed objective, the theoretical-methodological bases related to the subject were established and the relevant computer tools, SolidWorks and Termotransf, were used. These aspects made possible to carry out the modeling and to establish the design parameters of a solar dryer for forage seeds. Among the main results obtained, the thermal and kinetic modeling of the design conceived was carried out, considering the porous medium (layer of seeds to be dried) and without considering the porous medium. An increase in temperature and a pressure drop, inside the proposed installation were observed. The conceived forage seed solar dryer reached a total heat flow of 1.146 kW. Considering the capacity of seeds to be processed, the estimated drying time and the dimensions of the installation, it was demonstrated that, the proposed design, works as a drying installation.

Keywords: forage seeds, heat transference, solar energy

✉ Autor para correspondencia: Yanoy Morejón-Mesa. E-mail: yym@unah.edu.cu

Recibido: 27/06/2017

Aceptado: 11/06/2018

INTRODUCCIÓN

La semilla es el principal órgano reproductivo de la gran mayoría de las plantas superiores terrestres y acuáticas. Ésta desempeña una función fundamental en la renovación, persistencia y dispersión de las poblaciones de plantas, regeneración de los bosques y sucesión ecológica. Mediante la producción agrícola, la semilla es esencial para el ser humano, dado que constituye su alimento principal directa o indirectamente, además estas sirven de alimento para los animales domésticos. Las semillas pueden almacenarse vivas por largos períodos, asegurándose así la preservación de especies y variedades de plantas valiosas (Doria, 2010).

Dentro de estas plantas valiosas se pueden citar a las forrajeras por su gran aporte a la producción animal e industrial, pero estas a su vez se encuentran limitadas por diversos factores. Uno de los factores que limitan el desarrollo de los pastos en las condiciones tropicales es la disponibilidad de semillas. Se ha reconocido constantemente la necesidad de desarrollar una política que impulse la producción y beneficio de semillas, que cree bases para una comercialización en condiciones suficientes con la calidad adecuada y satisfaga las necesidades de las empresas agropecuarias. Los resultados encontrados hasta el momento respecto a la producción de semillas de pastos en los países en vías de desarrollo, indican la necesidad de aumentar los conocimientos acerca de los diversos factores que intervienen en la misma, con vistas a obtener mayores rendimientos de semillas de calidad (Pérez *et al.*, 1988).

Una de las causas principales de pérdidas en la producción de los semilleros es el exceso de humedad de las semillas después de la cosecha, de ahí la importancia que tiene después de la cosecha lograr el contenido de humedad adecuado de las mismas. La mayoría de las semillas alcanzan su madurez fisiológica con contenidos de humedad que varían de un 35-45%, su conservación es segura con la condición de que estos porcentajes desciendan a valores de 10-12%.

Por otro lado el conocimiento de las propiedades físicas es de suma importancia para diseñar y optimizar los equipos requeridos en las etapas de procesamiento de los productos agrícolas, según se ha planteado por diversos autores, entre los que se pueden citar: Stroshine y Hamann (1993); Ospina (2001) y Cetin (2007). A su vez estudios realizados por Andrejko y Grochowicz (2007); Dziki (2008); Kilickan y Guner (2008); Altuntas y Yildiz, 2017), en otras semillas demuestran que las propiedades físicas son influenciadas por el contenido de humedad.

Considerándose los aspectos antes planteados es que el secado solar desempeña un papel importante en el manejo postcosecha de las semillas, dado que permite la reducción del contenido de humedad de las semillas sin influir negativamente en las propiedades de las mismas.

El secado solar es una rama altamente rentable de la explotación de las fuentes renovables de energía, caracterizada por su alto potencial energético, económico, social y ecológico, en comparación con las otras fuentes energéticas utilizadas para secar. El incremento del uso de las fuentes renovables de energía es un aspecto clave en la estrategia de desarrollo de países tropicales, como Cuba, y son reconocidos universalmente los altos potenciales de las mismas para el ahorro de energía, y la sustitución de combustibles fósiles con la consiguiente disminución de emisiones de CO₂, óxidos de nitrógeno y azufre, productos de la combustión, que generan un impacto negativo en la economía y el medio ambiente (Bergues *et al.*, 2010).

El secado solar en Cuba es una rama joven y poco conocida, las tendencias respecto al secado solar en Cuba, se han fortalecido en las últimas dos décadas, basándose fundamentalmente en la utilización de materiales locales para la construcción de secadores y la simplificación de algunos diseños (Bergues *et al.*, 2008).

MÉTODOS

FUNDAMENTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS

Fundamentos teórico-metodológicos para la determinación de las propiedades físicas de las semillas forrajeras

El conocimiento de las propiedades físicas de los granos y semillas, constituye una información fundamental en la ingeniería, para adecuar y operar máquinas, diseñar y construir estructuras de almacenamiento, establecer sistemas adecuados de transporte. Por otro lado es un parámetro fundamental para el diseño de empaques, para el análisis de calidad y para el control de procesos. 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.

Talla (forma y tamaño): Esta propiedad permite describir cualquier producto e influye considerablemente en el movimiento del líquido por el interior del producto durante el proceso de secado. Criterios de redondez, esfericidad y semejanza a determinadas formas geométricas se utilizan para determinar la forma y tamaño de una semilla, para lo cual se pueden utilizar diferentes expresiones matemáticas, las cuales se basan en las tres principales dimensiones ortogonales: longitudinal (eje mayor), ancho (eje medio) y espesor (eje menor). Los criterios para determinar el tamaño están definidos por el diámetro medio geométrico (D_g) y el diámetro medio aritmético (D_a), los que se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$D_g = (L \cdot W \cdot T)^{1/3} \quad , \text{ mm} \quad (1)$$

$$D_a = \frac{(L+W+T)}{3}, \text{ mm} \quad (2)$$

donde: L: longitud, mm; W: ancho, mm; T: espesor, mm.

También se establece la esfericidad para determinar la forma de un material biológico, con la siguiente expresión:

$$\emptyset = \frac{D_g}{L} \quad (3)$$

donde: \emptyset : esfericidad.

Densidad: La densidad se define como la relación entre masa del producto y el volumen ocupado por el mismo. En granos se distinguen dos tipos de densidad; la densidad aparente (densidad del grano individual) y la densidad a granel. La densidad a granel es la relación entre el peso y el volumen total de la masa del producto, incluyendo los espacios intersticiales que dejan los materiales entre sí, ésta también se denomina densidad volumétrica. La densidad aparente es un factor importante en el análisis de transferencias de masa y calor a través de los granos o semillas, en el control de calidad, en la evaluación, cálculo y diseño de sistemas de transporte, limpieza y clasificación.

Masa: cantidad de materia que posee un cuerpo, en el caso de los productos agrícolas entre un 10 y 70% de su masa corresponde al contenido de agua variando en dependencia de las características de los mismos.

Contenido de humedad: Es la cantidad de agua que posee un producto. Constituye una de las propiedades fundamentales que garantiza la estabilidad y conservación de los productos agrícolas ya sean deshidratados o secados. Su determinación en las semillas respecto al tiempo de duración de los procesos de secado, se realiza de manera experimental mediante el empleo de determinada instalación de secado o medidor de humedad portátil.

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 (4).

$$M_{wb} = \frac{W}{W_a - W} \cdot 100 \quad (4)$$

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

El grado de humedad de las semillas es medido por el período de una hora para observar el cambio en el contenido de humedad de las mismas, esto se denomina tasa de reducción de humedad por hora, la cual se puede determinar por la expresión:

$$M_m = \frac{M_i - M_a}{t_o}, \% / h \quad (5)$$

donde: M_a : Contenido de humedad después del secado, %; M_i : Contenido inicial de humedad, %; t_o : Tiempo de operación, h.

Pérdida de peso o variación de masa: Es la diferencia de masa del grano o semilla 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 el tiempo de duración del proceso de secado, determinándose mediante la expresión: ([Thompson et al., 1985](#)).

$$P_p = \frac{W_b - W_a}{W_b} \cdot 100, \% \quad (6)$$

donde: P_p : Pérdida de peso, %; W_b : masa inicial del producto antes de ser secado, kg; W_a : masa final del producto después de ser secado, kg.

La masa del producto después de ser 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:

$$W_a = \frac{W_b \cdot (100 - M_a)}{(100 - M_i)}, \text{ kg} \quad (7)$$

Fundamentos teórico-metodológicos para la modelación de la cinética de movimiento del fluido en el interior del secador y de la capa de semillas

Todos los materiales sólidos y semisólidos contienen espacios intersticiales (poros) del tamaño de moléculas ordinarias que pueden ser penetradas por un fluido. La distinción entre un material poroso y un sólido no poroso aún no es clara. Sin embargo si solo se considera la permeabilidad como condición para establecer una clasificación, un material poroso deberá tener una permeabilidad específica, y su valor será únicamente determinado por la geometría del poro, independientemente de las propiedades del fluido.

Existen diferentes modelos que describen adecuadamente la dinámica del flujo de un fluido incompresible a través de un medio poroso, entre los que se destacan en la literatura la ecuación general de Darcy en presencia de la gravedad (8; 9), la ecuación de Kozenin-Carman (11) y la ecuación de Ergun (12). La primera es un resultado empírico para

medios porosos saturados y se plantea que la velocidad de Darcy (V) es una función lineal del gradiente de la presión en ausencia de gravedad.

$$V = v_i \cdot \varepsilon_p = -\frac{k_p}{\mu} \cdot (\nabla p + \rho \cdot g \cdot \nabla h), \text{ m s}^{-1} \quad (8)$$

La ecuación de Darcy en términos piezométrico puede ser planteada de la siguiente manera:

$$V = -\frac{k_p}{\mu} \cdot \rho \cdot g \left(\frac{\nabla p}{\rho \cdot g} + \nabla h \right), \text{ m s}^{-1} \quad (9)$$

donde: v_i : velocidad intersticial a través de los poros, m/s; ε_p : porosidad; μ : viscosidad dinámica del fluido, Pa s; k_p : tensor de permeabilidad intrínseca del medio, m^2 ; ∇p : gradiente de presión, Pa m^{-1} ; ρ : densidad del fluido, kg m^{-3} ; g : aceleración de la gravedad, m s^{-2} ; ∇h : gradiente de cota en altura con respecto a un nivel de referencia, mm^{-1} ;

El tensor de conductividad hidráulica (K_h) se define como:

$$K_h = -k_p \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu}, \text{ m s}^{-1} \quad (10)$$

La ecuación (11) tiene un enfoque o aproximación mucho más cercana al fenómeno físico que la ecuación de Darcy, al tener en cuenta no solo el gradiente de presión y la permeabilidad, sino también la porosidad del medio. La ecuación de Ergun (12) tiene un enfoque más general que la ecuación (11), en la cual se tiene en cuenta el efecto de las fuerzas inerciales (primer término) para números de Reynolds superiores a 1 000 y de las fuerzas viscosas (segundo término) para números de Reynolds inferiores a 10.

$$V = \frac{A}{\mu \cdot S^2} \cdot \frac{\Delta P}{k_h \cdot l} \cdot \frac{\varepsilon_p^3}{(1-\varepsilon_p)^2}, \text{ m s}^{-1} \quad (11)$$

$$\Delta P = 1,75 \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{(1-\varepsilon_p)}{\varepsilon_p^3} \cdot V^2 + 150 \cdot \frac{l}{D^2} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon_p^3} \cdot V, \text{ Pa} \quad (12)$$

donde: D:diámetro del medio, m; l:longitud del medio,m.

La cinética de movimiento del fluido (aire), por el interior del secador y la capa de semillas (medio poroso), se puede modelar mediante el empleo de la aplicación informática de diseño mecánico SolidWorks, esta herramienta utiliza la interfaz de usuario gráfica de Microsoft Windows. Esta aplicación posibilita realizar un croquizado rápido y la proyección de modelos y dibujos detallados. El paquete informático SolidWorks contiene un conjunto de programas como el sistema Simulación de Fluidos, donde se obtiene el comportamiento de las características del fluido en el interior de un sistema modelado para diferentes condiciones fronteras consistentes en la inclusión de mallas estabilizadoras y elementos de atenuación del fluido. El sistema Simulación de Fluidos ha sido desarrollado entre otras aplicaciones, para simular, estudiar y predecir el comportamiento de un fluido bajo diferentes condiciones de transporte de masa y energía del fluido, así como procesos de transferencia de calor entre este y un sólido. El software emplea las ecuaciones de Favre-Averaged y Navier-Stokes (expresiones 13, 14 y 15) para la conservación de la masa y la energía. Así mismo, para el transporte de la energía cinética turbulenta y de su tasa de disipación, se emplea el modelo $k - \varepsilon$ (Matsson, 2013).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i = 1,2,3 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (15)$$

donde: u - velocidad del fluido, m/s; ρ - densidad del fluido, kg/m^3 ; S_i - representa la fuerza externa distribuida por unidad de masa debido a la resistencia hidráulica de un medio poroso, N; H - suma de la entalpia térmica del fluido y de su energía cinética, J; Q_H - representa a las fuentes de calor externa, J; τ_{ij} - tensor de los esfuerzos tangenciales viscosos para un fluido Newtoniano, N; τ_{ij}^R - tensor de los esfuerzos tangenciales de Reynolds, N; ε - tasa de disipación de energía cinética turbulenta; q_i - flujo de calor por difusión, W.

El software emplea un método para determinar la permeabilidad o vector de resistencia del medio poroso (k_p) en función de: caída de presión, flujo másico, velocidad y dimensiones del medio poroso, mediante la ecuación (16):

$$k_p = \frac{\Delta P \cdot S}{\dot{m} \cdot L} \quad (16)$$

Se especifican los datos relativos a caída de presión en función del flujo másico $\{\Delta P = f(\dot{m})\}$ a partir de resultados obtenidos experimentalmente, mientras que la sección transversal (S) y la longitud del medio poroso (L) en la dirección de la velocidad permanecen constantes.

Para desarrollar la simulación mediante Dinámica de Fluido Computacional (CFD), es creado el proyecto en Simulación de Fluido donde se definen los siguientes datos del proyecto:

- Sistema de unidades: Se declara el sistema internacional de unidades;
- Tipo de análisis: Interno, excluyendo las cavidades sin condiciones de flujo;
- Fluido: Aire, seleccionando la opción automática de comportamiento tanto laminar o turbulento como características del fluido;
- Condiciones de pared: Adiabática;
- Condiciones iniciales: parámetros termodinámicos de presión y temperatura.
- Resolución de los resultados y la geometría: se declara de una configuración automática un nivel igual a 5 para la geometría de la malla computacional.

Una vez generado el proyecto se definen los datos de entrada (ítems del árbol del proyecto), para desarrollar la simulación los cuales son descritos a continuación:

- 1) El ícono Dominio Computacional es empleado para modificar las dimensiones del volumen que está siendo analizado y permite visualizar los límites del dominio computacional;
- 2) El ícono Condiciones de Fronteras permite establecer al fluido, en la entrada o salida del dominio computacional, los parámetros:
 - Presión;
 - Flujo másico;
 - Flujo volumétrico;
 - Velocidad;
 - Modelo que caracteriza el régimen del fluido (laminar o turbulento);
 - Condiciones de pared de los elementos sólidos que se encuentran en contacto con el fluido.
- 3) El ícono Medio Poroso permite establecer cuál o cuáles de los componentes del modelo es tratado como tal, a partir de la información contenida en la base de datos de ingeniería del software;
- 4) El ícono Metas de Ingeniería permite definir qué parámetros son de interés en aras de reducir el tiempo de cálculo al alcanzar la convergencia de la solución e influenciar en el criterio de parada.
- 5) El ícono Mallado Local del Dominio Computacional permite disminuir el tamaño del dominio computacional en una región específica del dominio en aras de alcanzar mayor precisión de los resultados en dicha región.

El fenómeno de conductividad térmica anisotrópica en medios sólidos se describe mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial c}{\partial x_i} (\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i}) + Q_H \quad (17)$$

donde: e : es la energía interna específica, $e = c \times T$, $\frac{J}{m^3}$; c : es el calor específico, $J/K.kg$; Q_H : es la liberación (o absorción) específica de calor por unidad de volumen, W/m^3 ; λ_i : son los valores propios del tensor de conductividad térmica, $W/m.K$. Se supone que el tensor de conductividad térmica es diagonal en el sistema de coordenadas considerado. Para el medio isotrópico:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda \quad (18)$$

Además de la conducción de calor en sólidos, el sistema Simulación de Fluidos es capaz de calcular la transferencia de calor de radiación entre sólidos, en la simulación de flujo se emplean dos modelos de radiación Transferencia Discreta y Ordenadas Discretas, cada uno de ellos tiene sus propias limitaciones y beneficios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la determinación de las principales propiedades físicas de las semillas forrajeras

Para la determinación de las principales propiedades físicas de las semillas forrajeras, se consideraron aquellas cuya información justifican las dimensiones de algunas partes del sistema de secado. A partir de la talla se seleccionó las dimensiones de las cribas a emplear teniendo en cuenta las variedades de semillas a utilizar. Las cribas del diseño se seleccionaron para cada variedad con (-0,5 mm) que el tamaño de la dimensión menor ortogonal de las semillas. Para la determinación de las dimensiones ortogonales se utilizó como instrumento de medición un vernier con un margen de error de 0,01 mm.

En la [Tabla 1](#), se encuentran representados los resultados de las dimensiones ortogonales promedios de las semillas que se tuvieron en cuenta para la selección de las diferentes mallas propuestas en el diseño del sistema de secado. Como se puede apreciar la menor dimensión ortogonal se obtuvo en semillas de clitoria azul con 2,45 mm de espesor, similar resultado se observó en semillas de sorghum halepense con 2,66 mm de espesor y la mayor dimensión se obtuvo en las semillas de stizolobium deergeanum con valores aproximados 14,11 mm de largo, seguida por las semillas de Moringa oleífera y centrosema pubescens con valores de 11,49 y 6,43 mm respectivamente de largo.

TABLA 1. Dimensiones ortogonales de algunas semillas forrajeras

Average Orthogonals Dimensions, mm	<i>Sorghum halepense</i>	<i>Stizolobium deergeanum</i>	<i>Moringa oleífera</i>	<i>Centrosema pubescens</i>	<i>Clitoria blue</i>
Length	5.11	14.11	11.49	6.43	6.41
Width	3.23	16.27	10	5.67	4.75
Thickness	2.66	6.63	10.94	4.85	2.45

Para la investigación experimental y el diseño del prototipo de secado solar de semillas forrajeras, se consideró la semilla de sorghum halepense, de la cual se determinó la densidad volumétrica, empleándose una probeta de 100 mL, para determinar la masa que ocupa un volumen de 30 mL, a partir de este volumen se obtuvo una masa de 26,98 g de semillas, la cual se determinó colocando el producto en una balanza analítica con un margen de error de 0,0001 g de lectura mínima. Teniendo en cuenta que $1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3$, se obtuvo una densidad volumétrica de 899 kg/m^3 . Este valor es necesario para conocer que las semillas a secar ocuparían un volumen de $0,20 \text{ m}^3$; permitiendo conocer además las cargas a las que está sometido el sistema, a fin de conocer si la estructura resiste a las mismas, además posibilita conocer el volumen de aire que se requiere para remover la cantidad de agua contenida en la muestra de semillas a secar (humedad de las semillas).

Resultados de la modelación de la cinética de movimiento del fluido en el interior del secador y de la capa de semillas

Partiendo de la determinación de las propiedades físicas, la masa de semillas de Sorghum halepense considerada para el diseño y modelación de la instalación de secado es de 180 kg, tomándose una tasa de reducción de humedad equivalente a $0,60\%/h$, de forma tal que el tiempo de secado no supere las 10 h; lo cual está dado las características del secado solar de semillas forrajeras.

Conociéndose la ubicación óptima del colector solar y las características que debe tener el sistema de ventilación en la instalación de secado concebida, se procedió a la modelación de la cinética de movimiento del fluido en el interior del secador y de la capa de semillas, estableciéndose dos variantes de estudio: la primera, por convección forzada sin medio poroso (sin considerar la capa de semillas) y la segunda, por convección forzada con medio poroso (considerando la capa de semillas), en cada una de las variantes se determinó el comportamiento de la temperatura, la presión relativa y la velocidad del fluido.

En la [Figura 1](#) se representa el comportamiento de la temperatura del fluido (aire) en cada una de las variantes analizadas en el diseño.

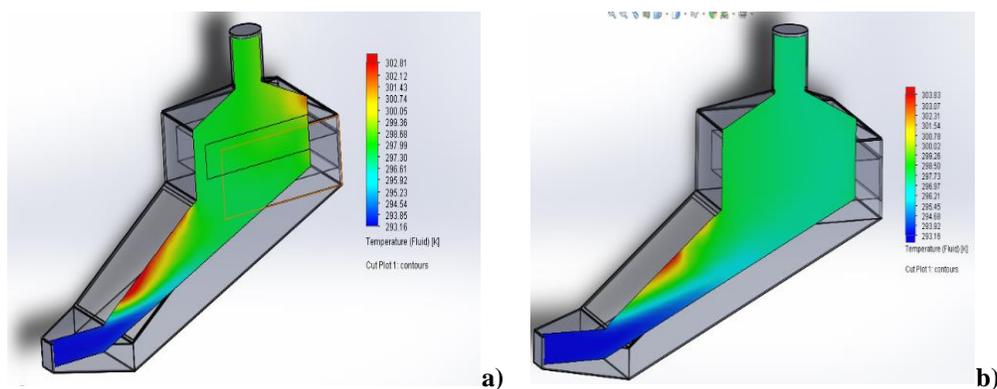


FIGURA 1. Comportamiento de la temperatura en el secador concebido con convección forzada: a) Con medio poroso (considerando la capa de semillas), b) sin medio poroso (sin considerar la capa de semillas).

Como se observa en la [Figura 1](#), la temperatura del fluido en ambas variantes analizadas, tiende a incrementarse en la región del colector solar respecto a la temperatura ambiente, en el caso específico de la variante que considera el

medio poroso, se logra un incremento de 3 °C en la región del colector y en la región de la cámara de secado se experimenta un descenso en la temperatura del fluido de 2 °C, de forma similar ocurre en la variante que no considera el medio poroso, sin embargo en esta variante se logra un incremento de 2°C en la región del colector e igual valor que el obtenido en la variante que considera el medio poroso, en la región de la cámara de secado.

En la [Figura 2](#) se representa el comportamiento de la presión relativa en cada una de las variantes analizadas en el diseño.

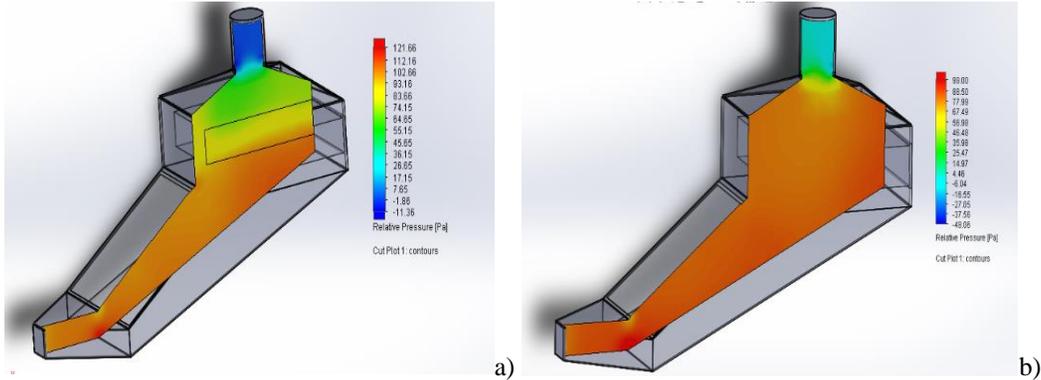


FIGURA 2. Comportamiento de la presión relativa en el secador concebido con convección forzada:

a) Con medio poroso (considerando la capa de semillas), b) sin medio poroso (sin considerar la capa de semillas).

Al analizarse el comportamiento de la presión relativa, mostrado en la [Figura 2](#) antes representada, se observa que en el caso específico de la variante que considera el medio poroso, las máximas presiones se alcanzan en la región del colector, específicamente a la salida del ventilador con un valor 121,66 Pa y las mínimas presiones se alcanzan en la región de la cámara de secado, específicamente en el conducto de salida del aire húmedo (chimenea), teniéndose un valor de -11,36 Pa, evidenciándose de esta forma que ocurre una caída de presión de 110,3 Pa. Sin embargo en la variante que no considera el medio poroso, las máximas presiones se alcanzan igualmente en la región del colector, específicamente a la salida del ventilador con valor de 99 Pa y las mínimas presiones se alcanzan en la región de la cámara de secado, específicamente en el conducto de salida del aire húmedo (chimenea), teniéndose un valor de -16,65 Pa, evidenciándose de esta forma que ocurre una caída de presión de 82,35 Pa

En la [Figura 3](#) se representa el comportamiento de la velocidad del fluido (aire) en cada una de las variantes analizadas en el diseño.

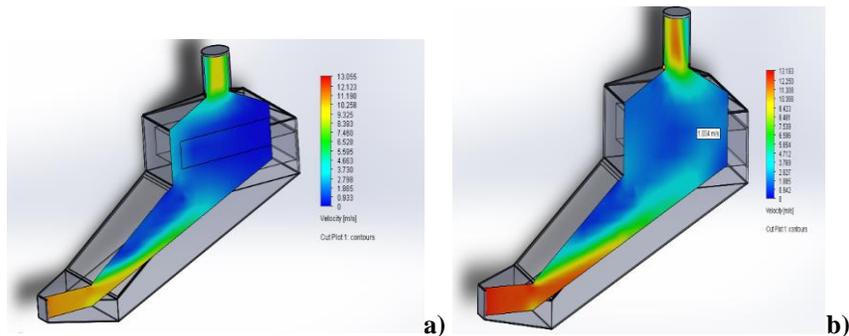


FIGURA 3. Comportamiento de la velocidad del fluido (aire) en el secador concebido con convección forzada:

a) Con medio poroso (considerando la capa de semillas), b) sin convección forzada para medio poroso (sin considerar la capa de semillas).

Al observarse el comportamiento de la velocidad del fluido (aire), representado en la figura anterior, se observa que en el caso específico de la variante que considera el medio poroso, la máxima velocidad del fluido, se alcanza en la región del colector, específicamente a la salida del ventilador con un valor 11,19 m/s, lo cual se debe al incremento de la energía cinética del fluido, y la mínima velocidad del fluido se alcanza en la región de la cámara de secado, específicamente en el área inferior (base de la capa de semillas a secar), alcanzándose un valor de 0,93 m/s, evidenciándose que se experimenta una variación de velocidad de 10,26 m/s. Por otro lado la velocidad del fluido

tiende a incrementarse, una vez atraviesa la capa de semillas, llegando a alcanzar un valor de 10,26 m/s, siendo este valor equivalente a la variación de la velocidad del fluido experimentada en el interior de la instalación de secado.

En el caso de la variante que no considera el medio poroso, la máxima velocidad del fluido se alcanza igualmente en la región del colector, específicamente a la salida del ventilador con valor de 13,19 m/s y la mínima velocidad del fluido se alcanza en la región de la cámara de secado, específicamente en el área inferior (base de la capa de semillas a secar), alcanzándose un valor de 1,00 m/s, evidenciándose que se experimenta una variación de velocidad de 12,19 m/s. Por otro lado la velocidad del fluido tiende a incrementarse, una vez atraviesa la cámara de secado, llegando a alcanzar un valor de 12,20 m/s, siendo este valor muy próximo a la variación de la velocidad del fluido experimentada en el interior de la instalación de secado.

A modo de resumen, tanto en la variante que considera el medio poroso, como la variante que no considera el medio poroso, se experimenta un incremento de la temperatura en el interior de la instalación de secado; pero es válido señalar que este incremento no supera los 3 °C; siendo inferior a valores obtenidos por varios investigadores, entre los que se pueden citar [Bergues et al. \(2008 y 2010\)](#); [Morejón et al. \(2014\)](#), los cuales desarrollaron instalaciones de secado similares al diseño propuesto y obtuvieron incrementos de temperatura que oscilaron entre 5 °C y 10 °C. Este resultado puede estar influenciado por la selección de los materiales considerados en el diseño, específicamente, el aluminio, dado que este material tiene una elevada conductividad térmica, que impide retener el calor en el interior de la instalación.

Por otro lado, para ambas variantes analizadas, se aprecia una elevada caída de presión que se comporta directamente proporcional a la velocidad del fluido en la parte inferior de la cámara de secado. Sin embargo cuando el fluido (aire húmedo) se expulsa al medio ambiente por medio de la chimenea situada en la parte superior de la cámara de secado, se experimenta un incremento de la velocidad, evidenciándose el principio de Bernoulli, dado que demuestra que mientras más rápido sopla el viento ambiente sobre la boca de la chimenea, más baja será la presión y mayor será la diferencia de presión entre la base (parte superior de la cámara de secado) y la boca de la chimenea, en consecuencia, el aire húmedo se extrae mejor.

Resultados de la transferencia de energía y masa en la instalación de secado concebida

Empleándose el sistema informático Termotransf de [Morejón et al. \(2015\)](#), se determinaron los flujos de calor que responden a los tres principios de transferencia de calor, estos resultados son de gran importancia por las características que deben presentar este tipo de sistemas, los cuales deben lograr temperaturas superiores a la del medio ambiente para realizar un proceso de secado eficiente, sin dañar la calidad fisiológica de las semillas. Los resultados de los flujos de calor se determinaron por separado para la cámara de secado y el colector y se representan en la [Tabla 2](#).

Como se aprecia en la [Tabla 2](#), considerando una temperatura externa o ambiente de 27 °C y alcanzándose una temperatura interna promedio de 29 °C, un coeficiente de conductividad térmica para aluminio, vidrio y semillas de 209,3; 0,5 y 0,4 (W/m.K) respectivamente, se obtuvo un flujo de calor por conductividad térmica de 37,65 W, lo que demuestra que la energía que incide sobre los materiales empleados en el secador es absorbida y esto posibilita el incremento de temperatura en el interior de la máquina. El flujo de calor por radiación térmica se determinó a través de la Ley de Stefan-Boltzmann, teniéndose que la temperatura incidente en la cubierta (lámina de vidrio tipo nonex) es de 27 °C, se obtuvo que el flujo de calor por radiación en el colector es de 436,30 W, al analizarse el flujo de calor por radiación en la cámara de secado, la cual se concibió que fuese de aluminio, se obtiene un flujo de calor de 665,94 W, de esta forma se evidencia que la energía solar incidente sobre los materiales concebidos para la construcción del secador es absorbida en todas las regiones del mismo. Para el análisis del flujo de calor por convección térmica se consideró un coeficiente de traspaso de calor de 10 W/m²K, que responde a una convección forzada de aire, aspecto que está en correspondencia con el diseño que se propone el cual emplea un ventilador para aumentar la energía cinética del aire, 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 los medios circundantes y el fluido en las regiones analizadas, se obtuvo el flujo de calor total por convección de 7 W.

A partir de estos resultados se determinó el flujo de calor total de la instalación de secado concebida, el cual asciende a 1146,89 W (1,146 kW), lo que demuestra que el diseño concebido puede funcionar como un secador. A partir de estos valores y del valor de la radiación solar incidente media en Cuba que es 5 kW/m², se determinó la eficiencia térmica del prototipo, la cual alcanzó un valor de 9,5%, este valor significa el porcentaje de energía solar que se aprovecha por el sistema. Es válido señalar que la eficiencia obtenida es inferior a los valores de eficiencia obtenidos por [Bergues et al. 2008 y 2010](#)), quienes desarrollaron e investigaron sobre secadores solares similares al que se propone en la presente investigación.

TABLA 2. Resultados del flujo de calor obtenido en las partes componentes del sistema de secado propuesto

Materials	HEAT FLOW, W						Thermal Efficiency, %
	Conduction	Radiation	Convection	Total Heat	Area, m ²	Total Heat/Area, W/m ²	
Drying Chamber	5.99	665.94	4.2	676.13	1.45		
Collector	31.66	436.30	2.8	470.76	0.95	477.87	9.5
Total	37.65	1102.24	7.0	1146.89	2.4		

CONCLUSIONES

- Los fundamentos teóricos planteados posibilitaron realizar la modelación y establecimiento de los parámetros de diseño para un secador solar de semillas forrajeras.
- Con el empleo de los sistemas informáticos SolidWorks y Termotransf, se realizó la modelación térmica y cinética del diseño concebido, considerándose el medio poroso (capa de semillas a secar); evidenciándose un incremento de la temperatura y una caída de presión, en el interior de la instalación propuesta.
- Mediante la modelación del proceso de secado solar, considerándose una tasa de reducción de humedad de 0,60%/h, se estima que se requieren 10 h para el procesamiento de 180 kg de semillas de Sorghum halepense.
- El flujo de calor total del secador solar de semillas forrajeras concebido, asciende a 1,146 kW, alcanzando una eficiencia térmica de 9,5%, lo que demuestra que el diseño, aunque posee una baja eficiencia, funciona como una instalación de secado.
- Para la modelación y diseño del secador solar propuesto, se seleccionaron láminas de aluminio para las paredes de la estructura y vidrio para el colector, por lo que se recomienda emplear otro material con un coeficiente de conductividad térmica más bajo que el del aluminio, de forma tal que posibilite elevar la eficiencia de la instalación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTUNTAS, E.; YILDIZ, M.: "Effect of moisture content on some physical and mechanical properties of faba bean (vicia faba L.) grains", *Journal of Food Engineering*, 78(1): 174-181, 2017, ISSN: 0260-8774.
- ANDREJKO, D.; GROCHOWICZ, J.: "Effect of the moisture content on compression energy and strength characteristic of lupine briquettes", *Journal of Food Engineering*, 83(1): 116-120, 2007, ISSN: 0260-8774.
- BERGUES, C.; BÈRRIZ, P.L.; VILLAFañE, G.P.: "Generalización de secadores solares directos en Cuba. Análisis numérico de sus tendencias actuales", *Revista Desarrollo Local Sostenible (DELOS)*, 3(8): 9, 2010.
- BERGUES, C.C.; GRIÑAN V., P.; MARTÍNEZ, R.A.: "Algunos aspectos de los cambios tecnológicos en secadores solares cubanos: Realidades y tendencias", *Revista Tecnología Química*, 28(2): 9-11, 2008, ISSN: 2224-6185.
- CETIN, M.: "Physical properties of barbania bean (Phaseolus vulgaris L. cv. 'Barbania') seed", *Journal of Food Engineering*, 80(1): 353-358, 2007, ISSN: 0260-8774.
- DORIA, J.: "Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento", *Revista Cultivos Tropicales*, 31(1): 8-12, 2010, ISSN: 0258-5936. E-ISSN: 1819-4087.
- DZIKI, D.: "The crushing of wheat kernels and its consequence on the grinding process", *Powder Technology*, 185(2): 181-186, 2008, ISSN: 0032-5910, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.10.012>.
- KILICKAN, A.; GUNER, M.: "Physical proprieties and mechanical behaviour of olive fruits (olea europaea L) under compression loading", *Journal of Food Engineering*, 87(2): 222-228, 2008, ISSN: 0260-8774.
- MATSSON, J.E.: *An Introduction to SolidWorks Flow Simulation 2013*, Ed. SDC publications, 2013.

- MOREJÓN, M.Y.; CASTILLO, Y.; VERDECÍA, N.; RODRÍGUEZ, A.: *Software Termotransf: Para el cálculo de las formas de transferencia de calor en equipos e instalaciones térmicas*, no. Registro.3620-10-2015, Inst. Centro Nacional de Derecho de Autor (CENDA), La Habana, Cuba, 2015.
- MOREJÓN, M.Y.; DOMÍNGUEZ CALVO, G.; RODRÍGUEZ, Y.; LEÓN, M.J.: “Use of an artisan Solar Grain Dryer to dry soybeans and black beans grains”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(4): 17-20, 2014, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- OSPINA, M.J.E.: *Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos*, Ed. Univ. Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Agrícola, Bogotá, Colombia, 225 p., 2001, ISBN: 13: 9789587011821.
- PÉREZ, A.; GONZÁLEZ, Y.; MATÍAS, C.: “Problemática de la producción de semillas en los pastos tropicales: Primera parte”, *Pastos y Forrajes*, 11(1): 20-23, 1988, ISSN: 0864-0394, E-2078-8452.
- STROSHINE, R.L.; HAMANN, D.: *Physical properties of agricultural materials and food products*, Ed. Department of Food Science, North California State University, California, LA, USA, 1993.
- THOMPSON, J.F.; STONE, M.L.; KRANZLER, G.A.: “Modified air flow rate and temperature hop drying”, *Transactions of the ASAE*, 28(4): 1297–1300, 1985, ISSN: 2151-0032, E-ISSN: 2151-0040.

Yanoy Morejón Mesa, Prof., Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, La Habana, Cuba. CP: 32700. e-mail: yym@unah.edu.cu

Yoel Rodríguez Gago, e-mail: ygago@ica.co.cu

Dariel Matos Cervera, e-mail: yym@unah.edu.cu

NOTAS

*Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

*Este artículo de se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

*La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.