

Desarrollo de un modelo matemático para dimensionar un deshidratador solar directo de cacao

Development of a mathematical model to determine the proportions a direct solar dehydrator of cacao

Juan-Manuel Teixeira-Da Silva^I, Freddy-Alberto Malpica-Pérez^{II}

I. Fundación Instituto de Ingeniería, Centro Ingeniería Mecánica. Caracas, Venezuela

II. Universidad Simón Bolívar, Laboratorio de Conversión de Energía Mecánica. Caracas, Venezuela

Correo electrónico: juanmanuelteixeira@gmail.com

Recibido: 3 de septiembre de 2015 Aceptado: 20 de noviembre de 2015

Resumen

Se desarrolló un modelo analítico transitorio cuyo objetivo es determinar las dimensiones de un deshidratador solar de cacao utilizando aire calentado por colector solar plano y almacenador térmico. El aire caliente atraviesa la cámara de secado que protege al cacao del ambiente exterior y permite la insolación solar directa. El modelo se aplicó al secado solar tradicional en patios. Las condiciones ambientales promedio de la localidad bajo estudio fueron los datos de entrada al modelo. Los resultados indicaron que el aire puede alcanzar 65°C de temperatura y el 10% de humedad relativa. La curva de secado modelada presentó

concordancia con la curva de secado experimental. Los resultados analíticos permitieron obtener las dimensiones del deshidratador propuesto: longitudes, ancho del equipo y altura de la chimenea. La simulación indicó que el uso de un almacenador térmico permite continuar el secado del cacao durante dos horas y media después del ocaso.

Palabras claves: secado de cacao, modelo matemático, deshidratador solar, calentador solar, almacenador térmico.

Abstract

A transient analytical model was developed which aims to determine the dimensions of a solar dehydrator of cacao that uses heated air as drying media. The air is heated in a flat solar collector and thermal storage unit. Then, the heated air crosses the drying section where the cacao is protected against open atmosphere and allows transmission of solar irradiation. The model was applied to the yard traditional solar drying of cacao. Local average values of environmental conditions were input data to the model. The results indicate that the air can reach a temperature as 65°C with a relative

humidity as 10%. The drying curve obtained presents agreement with the experimental drying curve. The analytical results allow obtaining the dimensions of the proposed dehydrator: lengths, equipment's width and chimney's height. The simulation indicates the drying of the cacao can continue during two and a half hours after sunset.

Key words: drying of cacao, mathematical model, solar dehydrator, heating lot, storage thermal.

Introducción

Los factores que afectan el deshidratado del cacao de forma natural están relacionados con la temperatura ambiental, frecuencia de precipitaciones, velocidad del viento, humedad relativa del aire y el número de horas de sol aprovechables para el proceso. Dilip Jain [1], indica que los problemas asociados al deshidratado solar son: sobre deshidratación, deshidratación insuficiente, rehidratación por efectos de lluvia, decoloración debida a los efectos de la radiación ultravioleta y contaminación por agentes externos como aves, insectos, microorganismos y humos.

A fin de superar las desventajas señaladas en el párrafo anterior se han desarrollado varios deshidratadores solares, que permiten incrementar la calidad del producto y mejorar la eficiencia del proceso de deshidratación. Las unidades de deshidratación solar normalmente calientan el aire mediante colectores solares antes de que esté ingrese a la cámara de secado. En su trabajo, Benhamoua [2] demuestra que el incremento de la temperatura del aire de secado, es el parámetro más influyente del proceso ya que conduce a un aumento en la humedad del aire a su salida del deshidratador. Por otra parte, Abdullah [3] afirma que las condiciones del aire influyen de manera importante en el rendimiento del deshidratador.

Saber Chemkhi [4], indica que el uso de colectores solares para el calentamiento de aire es factible, ya que se pueden obtener temperaturas aproximadas de 80°C en convección natural y 60°C en convección forzada. El deshidratado solar por convección natural sólo depende de la irradiación solar [5], por lo que se presenta como la propuesta más conveniente para los sectores rurales donde la energía eléctrica es escasa o no está disponible. Además, el costo inicial de un sistema de deshidratado solar puede reducirse mediante el uso de mecanismos de efecto invernadero [6] y combinando el calentador solar plano de aire y la cámara de

deshidratado en una sola unidad [7]; de manera que la función de la unidad de calentamiento de aire solar puede ser incrementada con el uso de superficies transparentes funcionando simultáneamente como cámara de secado.

Dado que la temperatura y humedad del aire varían considerablemente debido a las variaciones de la insolación solar durante del día, se ha propuesto incluir una unidad de almacenamiento térmico al deshidratador solar, con la finalidad de disminuir la intermitencia relacionada y estabilizar la temperatura y humedad del aire caliente a ser utilizado para el secado [8]. Esta unidad se carga durante las horas soleadas y es una fuente de energía para calentar el aire durante el lapso de tiempo de poca insolación y en las primeras horas de la noche. Aboul-Enein [9], realizó un estudio paramétrico de un calentador solar de aire inclinado seguido de un almacenador térmico, utilizó diferentes materiales (arena, granito y agua); que fueron evaluados y concluyó que mediante la utilización del granito se obtienen las temperaturas del aire más altas durante las horas de la noche.

El aporte del presente trabajo consiste en determinar las dimensiones de una unidad de deshidratación de granos de cacao, que consta de un colector solar plano seguido de un acumulador térmico y de una cámara de secado. El flujo de aire requerido se consigue a través de una chimenea de tiro natural. Las dimensiones de la unidad de deshidratación se obtienen mediante un modelo analítico transitorio que permite simular el comportamiento de la unidad propuesta hasta alcanzar una curva de secado similar a la curva de secado experimental que corresponde a un grano de cacao de una calidad de aceptación nacional e internacional.

Métodos y Materiales

Descripción del deshidratador solar propuesto

El deshidratador solar de cacao propuesto consta de cuatro partes fundamentales: el calentador solar plano de aire, el almacenador térmico, la cámara de deshidratado y la chimenea (ver figura 1).

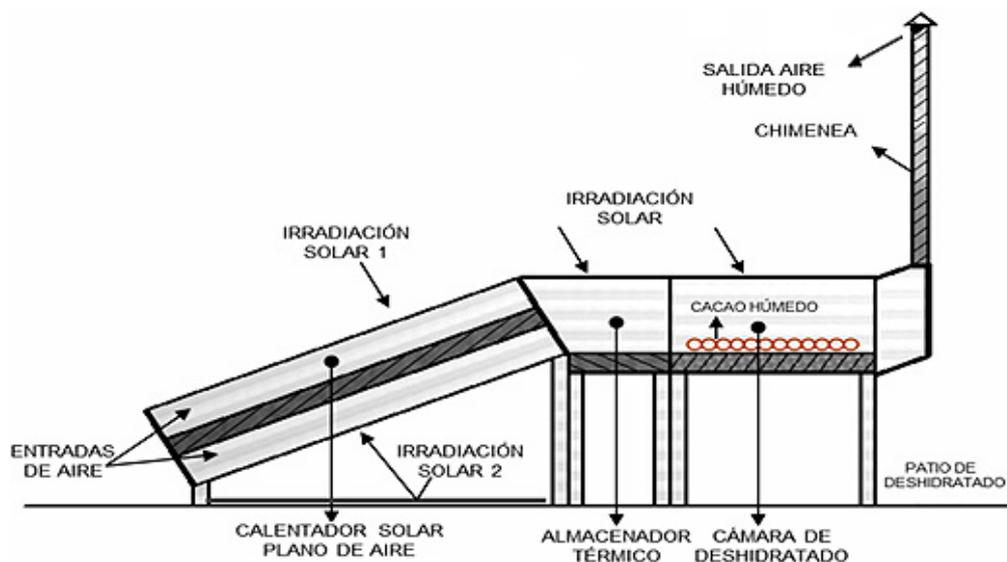


Fig. 1. Deshidratador solar de cacao propuesto

El calentador solar plano de aire está formado por dos láminas de policarbonato compacto colocadas en su parte superior e inferior; la primera se encuentra expuesta directamente a la irradiación solar y la segunda a la irradiación solar reflejada por una lámina de aluminio pulido colocada en el suelo. En el centro del calentador se localiza una placa compuesta, formada por dos láminas absorbedoras de aluminio ennegrecido, entre las cuales se ubica una placa de granito que actúa como almacenador térmico, la misma homogeniza la temperatura del aire en cada conducto. La placa compuesta divide en dos conductos iguales el espacio entre las láminas de policarbonato, a través de los cuales circula aire tomado del ambiente que se mueve por efecto de la convección natural y el tiro de la chimenea. De esta manera se garantiza una mayor área de transferencia de calor entre el aire y las dos placas absorbedoras, lo que disminuye las pérdidas calor en el colector solar.

La segunda parte del deshidratador es el almacenador térmico; que consta de una lámina de policarbonato compacto, una pieza de granito y su respectivo soporte. El policarbonato está expuesto a la irradiación y transmite radiación solar al granito modificando su energía interna, cediendo calor al aire cuando su temperatura es mayor al mismo o absorbiendo calor cuando la temperatura del aire es mayor.

Después del almacenador térmico se ubica la cámara de deshidratado. Está compuesta de una lámina de policarbonato, un piso de cemento y su respectivo soporte. Al igual que el almacenador térmico, la cámara de

deshidratado se encuentra colocada horizontalmente, la lámina de policarbonato se localiza en su parte superior, lo que permite que los granos de cacao reciban la irradiación solar transmitida por el policarbonato. El cacao se encuentra sobre un piso de cemento, de igual rugosidad a la que se presenta en el patio de secado. Es relevante destacar que el cacao recibe energía solar directamente a través del policarbonato y además recibe energía por convección del aire previamente calentado. El uso del piso de cemento tiene como objeto la remoción paulatina del mucilago que recubre al grano de cacao, ésta a medida que el grano de cacao es deshidratado va perdiendo humedad y si no es removida adecuadamente forma una cubierta que impide la salida del agua del grano, y por lo tanto, se dificulta alcanzar la humedad final mínima necesaria para mantener el grano de cacao almacenado sin que se desnaturalice debido al crecimiento de hongos, bacterias y otros.

La última parte de la unidad de deshidratación de cacao es la chimenea; que permite un flujo de aire constante a través de las fases de calentamiento en el colector, en el almacenador y en la cámara de deshidratado.

Análisis térmico

La irradiación solar es la fuente primaria de energía para el proceso de deshidratado. El policarbonato dejará pasar una fracción de la irradiación incidente sobre él. En el calentador solar, esta fracción servirá para calentar el cuerpo negro superior que a su vez calienta el aire que fluye a lo largo del conducto superior. Simultáneamente, la irradiación solar reflejada sobre la superficie del aluminio pulido colocada en el suelo, incide sobre el policarbonato inferior dejando éste que una fracción lo atraviese calentando el cuerpo negro inferior; así puede a su vez calentar el aire que fluye a lo largo del conducto inferior.

Una vez que el aire sale del calentador solar plano, por los conductos superior e inferior; entra al almacenador térmico, que tiene la propiedad de modificar su energía interna logrando una temperatura del medio secante homogénea durante el proceso. Por otro lado, la capacidad del granito de almacenar energía prolongará el proceso de deshidratado, aún en las horas en la que la irradiación solar empiece a disminuir.

El calentamiento del aire en el colector solar y en el almacenador de energía ocurre a una humedad absoluta del aire constante, esto provoca una reducción de la humedad relativa que favorece el proceso de deshidratado ya que el medio secante tiene la posibilidad de absorber más agua de los granos de cacao. Una vez que el aire pasa a través de la cámara de deshidratado, ha aumentado su humedad y es extraído a la atmósfera por la chimenea, de esta manera se renueva el aire a la entrada del calentador solar plano de aire, lo que permite el reinicio del proceso hasta alcanzarse la humedad final de 7 - 8 %.

Para el análisis térmico se asumió lo siguiente:

(i) Las temperaturas de equilibrio del policarbonato superior (T_{ps}), policarbonato inferior (T_{pi}) y aluminio pulido (T_{ap}) como:

$$T_{ps}(t) = \left[\left(\frac{I_1(\text{dia}, t) * \alpha_p}{\alpha_{\text{radiaciontermicap}} * \sigma} \right) + T_{\text{ambiente}}(t)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

$$T_{pi}(t) = \left[\left(\frac{I_2(\text{dia}, t) * \alpha_p}{\alpha_{\text{radiaciontermicap}} * \sigma} \right) + T_{\text{ambiente}}(t)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$$T_{ap}(t) = \left[\left(\frac{I_1(\text{dia}, t) * \alpha_{ap}}{\alpha_{\text{radiaciontermicaap}} * \sigma} \right) + T_{\text{ambiente}}(t)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Donde:

I_1 e I_2 : Irradiación solar en superficie inclinada superior e inferior

α : Absortividad

σ : Constante de Stefan-Boltzman

(ii) Mientras el cacao no llega a su humedad crítica se comporta como una superficie líquida

Para estimar el flujo másico de agua evaporada y la velocidad de deshidratado, se utilizan:

$$\dot{m}_{\text{aguaevaporada}} = R * \text{Area}_{\text{CAMARA}} \quad (4)$$

$$R = \begin{cases} f_1(w) = h_D * (w_s - w_{e,s}); \text{HumedadInicial} < w < \text{HumedadCrítica} \\ f_2(w) = R_3 + \frac{(w - w_3)}{(w_2 - w_3)} * (R_B - R_3); \text{HumedadCrítica} < w < 1^{\text{er}} \text{PeriodoDecreciente} \\ f_3(w) = \frac{(w - w_{\text{equilibriofinal}})}{(w_3 - w_{\text{equilibriofinal}})} * R_3; 1^{\text{er}} \text{PeriodoDecreciente} < w < \text{HumedadFinal} \end{cases} \quad (5)$$

Donde:

h_D : Coeficiente de transporte de masa

w : Contenido de humedad del sólido húmedo

$w_{e,s}$: Humedad específica del aire entre la entrada y la salida de la cámara de deshidratado

Balance energético general del calentador solar plano de aire

$$\frac{1}{A_c} \left(\frac{dU_T}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO} + \dot{m}_{aire} (h_s - h_e) \quad (6)$$

Donde:

A_c : Área del calentador

U_T : Energía interna total en el calentador solar plano de aire

Para el volumen de control sobre: policarbonato superior, el aire en el ducto superior, el cuerpo negro superior:

$$\frac{1}{A_c} \left(\frac{dU_{ps}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{ps}} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{NETO_{aire1}} = \dot{m}_{aire1} (h_s - h_e) \quad (8)$$

$$\frac{1}{A_c} \left(\frac{dU_{cs}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{cs}} \quad (9)$$

Donde:

$$\dot{m}_{aire1} (h_s - h_e) = \dot{m}_{aire1} * C_{p_{aire}} * \frac{dT_{aire1}}{dx}$$

Para el volumen de control sobre policarbonato inferior, el cuerpo negro inferior, el almacenador térmico y el aire en el ducto inferior:

$$\frac{1}{A_c} \left(\frac{dU_{pi}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{pi}} \quad (10)$$

$$\frac{1}{A_c} \left(\frac{dU_{ci}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{ci}} \quad (11)$$

$$\frac{1}{A_c} \left(\frac{dU_{gra}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{gra}} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{NETO_{aire2}} = \dot{m}_{aire2} (h_s - h_e) \quad (13)$$

Balance energético general del almacenador térmico

$$\frac{1}{A_{alm}} \left(\frac{dU_{T2}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{alm}} + \dot{m}_{aire} (h_{s2} - h_{e2}) \quad (14)$$

Donde:

A_{alm} : Área del almacenador térmico

U_{T2} : Energía interna total en el almacenador térmico

Para el volumen de control sobre policarbonato del almacenador térmico:

$$\frac{1}{A_{alm}} \left(\frac{dU_{p2}}{dt} \right)_{v.c.} = \dot{Q}_{NETO_{p2}} \quad (15)$$

Para el volumen de control sobre el aire en el almacenador térmico:

$$\dot{Q}_{NETO_{airealm}} = \dot{m}_{airealm} (h_{s2} - h_{e2}) \quad (16)$$

Balance energético general de la cámara de deshidratado

Para el proceso total de secado se utiliza la siguiente relación que considera la transferencia de masa y la transferencia de calor, por convección y por radiación:

$$R \cdot h_{fg,W} = h_{conv}(\bar{T}_{e,s} - T_W) + h_{rad}(\bar{T}_{e,s} - T_{pp}) + I_H \cdot \tau_p \quad (17)$$

Donde:

$h_{fg,W}$: Calor latente de vaporización del agua

$\bar{T}_{e,s}$: Temperatura promedio entre la entrada y salida de la cámara de deshidratado

T_{pp} : Temperatura de las paredes y policarbonato de la cámara de deshidratado

I_H : Irradiación solar sobre superficie horizontal

τ : Transmisividad policarbonato compacto

Luego se procede hallar el tiempo que dura cada uno de los periodos de secado para relacionar la humedad del producto con el tiempo. Siendo "i", los intervalos principales de deshidratado:

$$t_i = \frac{1}{A} \left[\int_{W_{inicial}}^{W_{final}} \frac{dW}{f_i(W)} \right] \quad (18)$$

Parámetros de Entrada al Modelo Matemático

El modelo analítico se aplicó al secado de cacao en la localidad de Chuao, Estado Aragua-Venezuela, para las condiciones atmosféricas medidas en Diciembre; periodo en el cual se realiza una de las zafas de secado en la zona. En ese periodo de tiempo se construyó la curva de secado del cacao en el patio, la misma se utilizó como criterio de optimización del prototipo de deshidratador planteado.

Debido a que la magnitud del flujo másico de aire es función de diversas variables tales como: velocidad del aire circundante, temperatura del aire ambiental, irradiación solar instantánea, etc., se busca con la instalación de la chimenea mantener este flujo másico dentro de un rango conveniente de: $0,014 \text{ kgs}^{-1} < \dot{m}_{\text{aire}} < 0,042 \text{ kgs}^{-1}$.

En cuanto a la chimenea, se definieron las dimensiones de la misma en base a la transición de forma rectangular; que se mantiene en la cámara de deshidratado, a una sección circular de la siguiente manera:

$$\text{Area}_{\text{chimenea}} = \pi \cdot \text{Radio}^2 \quad (19)$$

La altura de la chimenea está relacionada a la inclinación del calentador solar de aire, de la inclinación y altura del último tramo del prototipo que conecta la cámara de deshidratado con la chimenea y de la longitud en vertical de la chimenea en sí.

Resultados y Discusión

Realizados los diferentes balances generales y específicos de cada una de las cuatro (4) partes fundamentales que constituyen el prototipo planteado para el deshidratador solar de cacao se procedió a programar las ecuaciones que conforman los sistemas de ecuaciones descritos.

Simulación matemática de la longitud del calentador solar plano de aire

Se varió la longitud del calentador solar plano de aire en el rango: $2 \text{ m} < L < 4 \text{ m}$ [1]; relacionando la longitud del calentador solar plano de aire y la temperatura de bulbo seco del aire húmedo a su salida (ver figura 2).

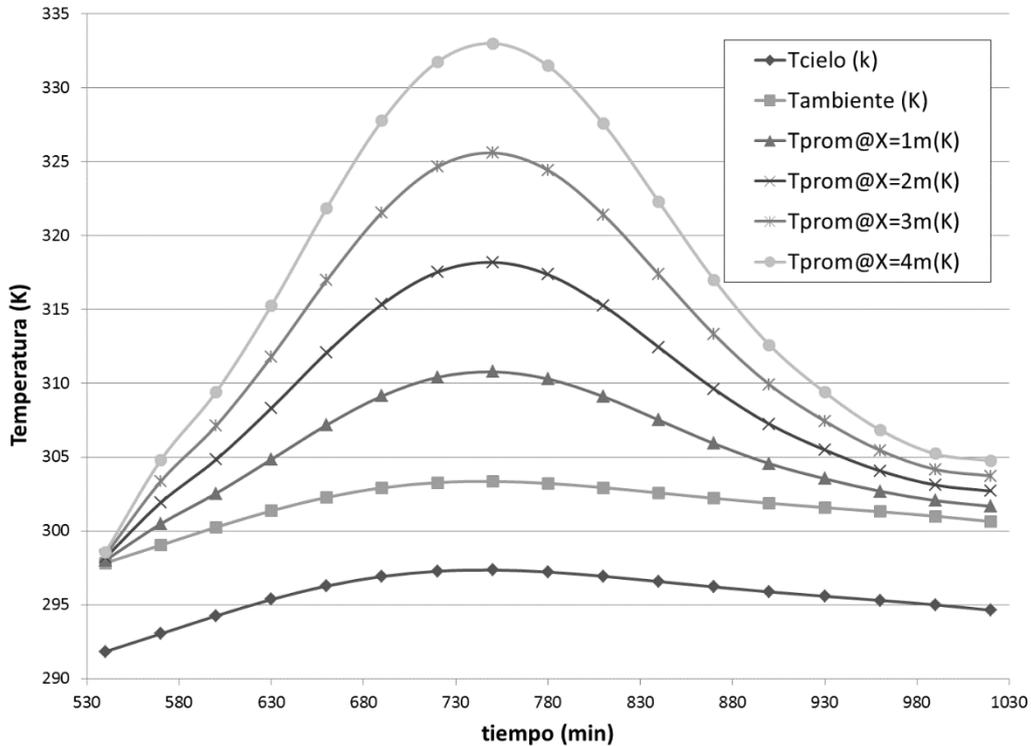


Fig. 2. Comportamiento de la temperatura del aire a la salida del calentador solar para diferentes longitudes

En la figura, se aprecia el incremento de la temperatura del aire a la salida del calentador solar plano de aire al aumentar la longitud del mismo. Esta tendencia refleja el hecho de que a mayor longitud del calentador solar, mayor será el área de contacto entre el aire húmedo, desde la entrada hasta la salida del calentador, lo que aumenta el tiempo de contacto entre el aire y la placa absorbidora, trayendo como consecuencia un incremento en la transferencia de calor entre ambas.

Simulación matemática de la longitud del almacenador térmico

De manera similar se procedió a variar la longitud del almacenador térmico con el fin de analizar el comportamiento de la temperatura del aire a la salida de mismo. Siendo el rango de variabilidad 0,5 m – 1 m.

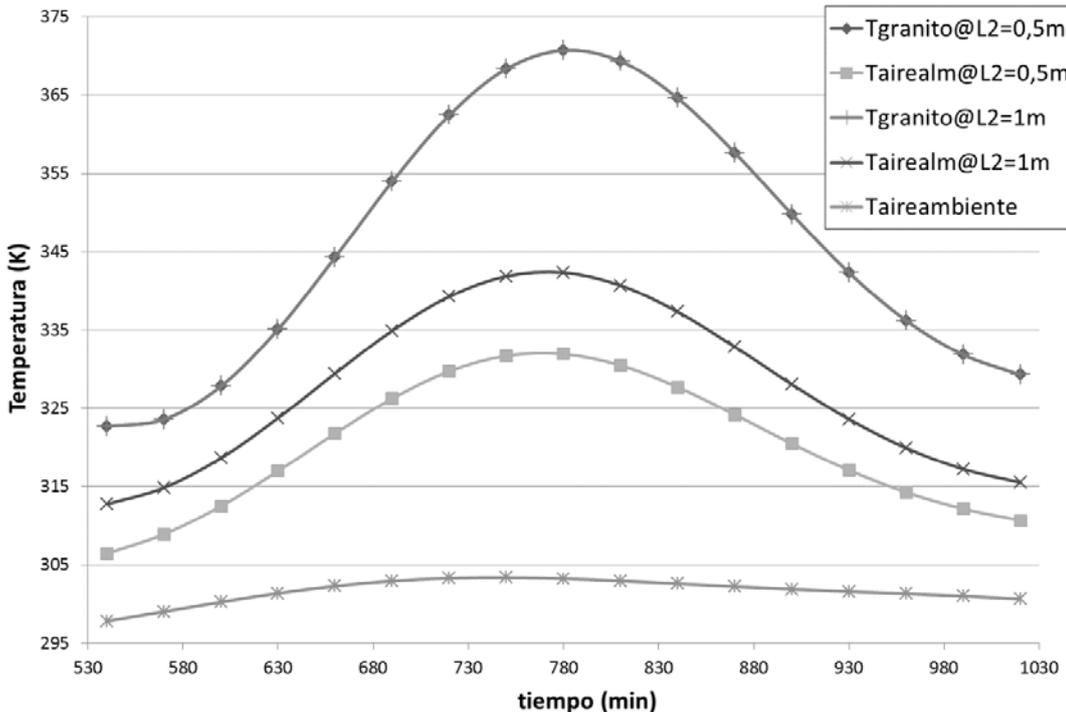


Fig. 3. Comportamiento de la temperatura del aire a la salida del almacenador térmico para diferentes longitudes

El comportamiento estable del almacenador térmico, aun variando su longitud; se debe a que el mismo funciona como un capacitor eléctrico, simplemente el aire a medida que pasa sobre ello carga o descarga dependiendo de la temperatura del aire. Según Fara [8], comenta que un deshidratador solar bien diseñado, será capaz de calentar el aire de secado en un rango de 10 - 25 °C por encima de la temperatura ambiente.

Simulación matemática para el ancho del prototipo planteado

Igualmente [5], concluye que un comportamiento similar se presenta con la temperatura del grano en función al ancho del calentador en el rango 0,5 m - 1,5 m, que más allá de ese rango de anchura del calentador no existe ningún efecto en la temperatura del grano. Esta variación en el ancho del almacenador térmico planteado, se realizó manteniendo los mejores resultados obtenidos en las simulaciones anteriores:

$$L = 4 \text{ m}, L_2 = 0,5 \text{ m}, \text{ y } 0,014 \text{ kgs}^{-1} < \dot{m}_{\text{aire}} < 0,042 \text{ kgs}^{-1}$$

En la figura 4 se manifiesta que para un ancho menor del prototipo planteado de deshidratador se obtienen temperaturas de aire para secar mayores durante el periodo de funcionamiento del equipo.

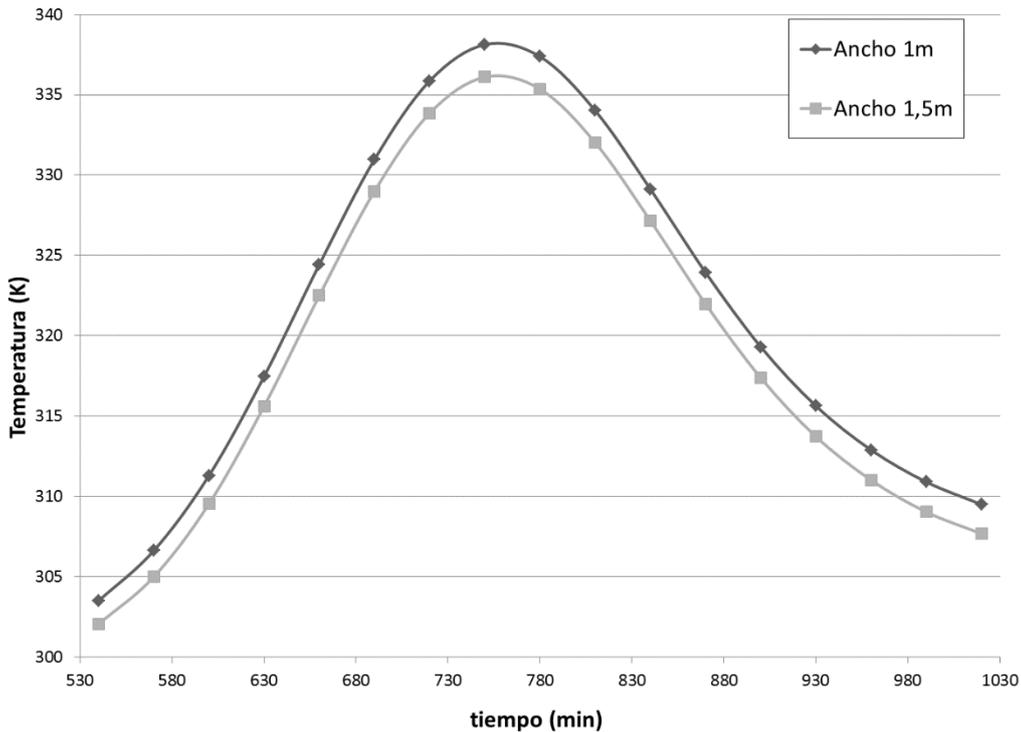


Fig. 4. Comportamiento de la temperatura del aire para diversos valores de ancho del prototipo planteado

Simulación matemática para la variación de la humedad relativa del aire

La humedad relativa del aire que atraviesa el calentador solar plano de aire, se relaciona con el comportamiento de la temperatura del mismo, por lo que a medida que aumenta la longitud del calentador, se incrementa la temperatura del aire y disminuye su humedad relativa. Este comportamiento se aprecia en la figura 5:

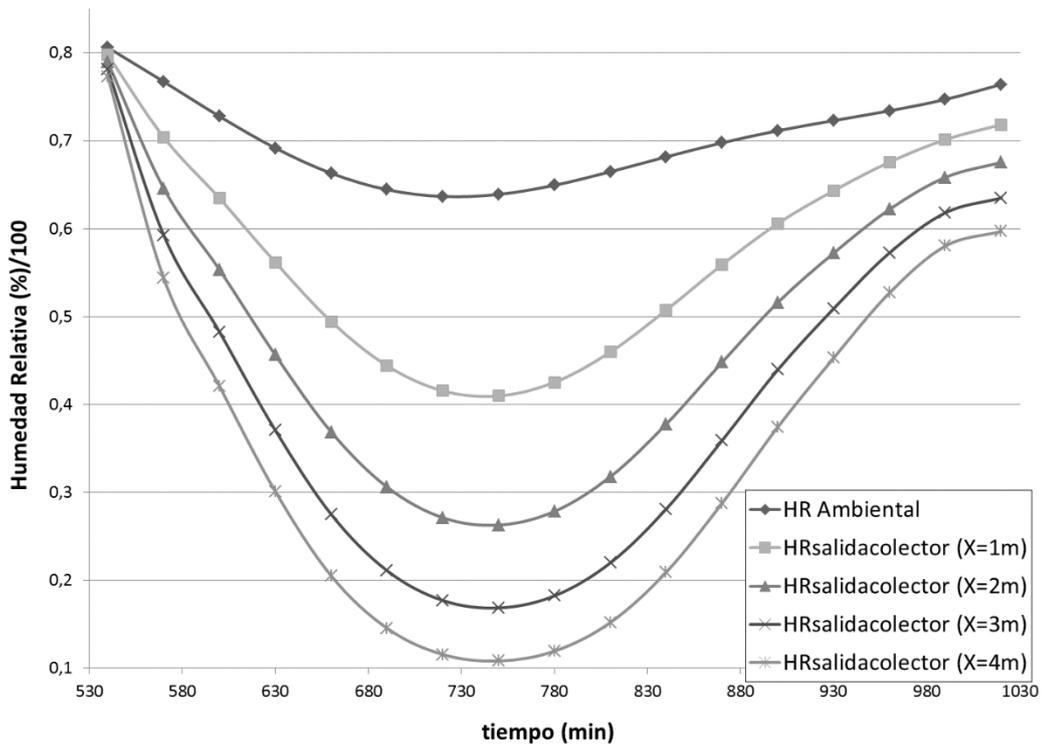


Fig. 5. Comportamiento de la humedad relativa (HR) del aire para diversos valores de longitud del prototipo planteado

Simulación mediante modelo matemático del deshidratado solar directo de cacao

Realizadas las simulaciones anteriores se comparan los valores obtenidos con el comportamiento del deshidratado solar directo obtenido mediante la medición directa en el patio de secado (ver figura 6).

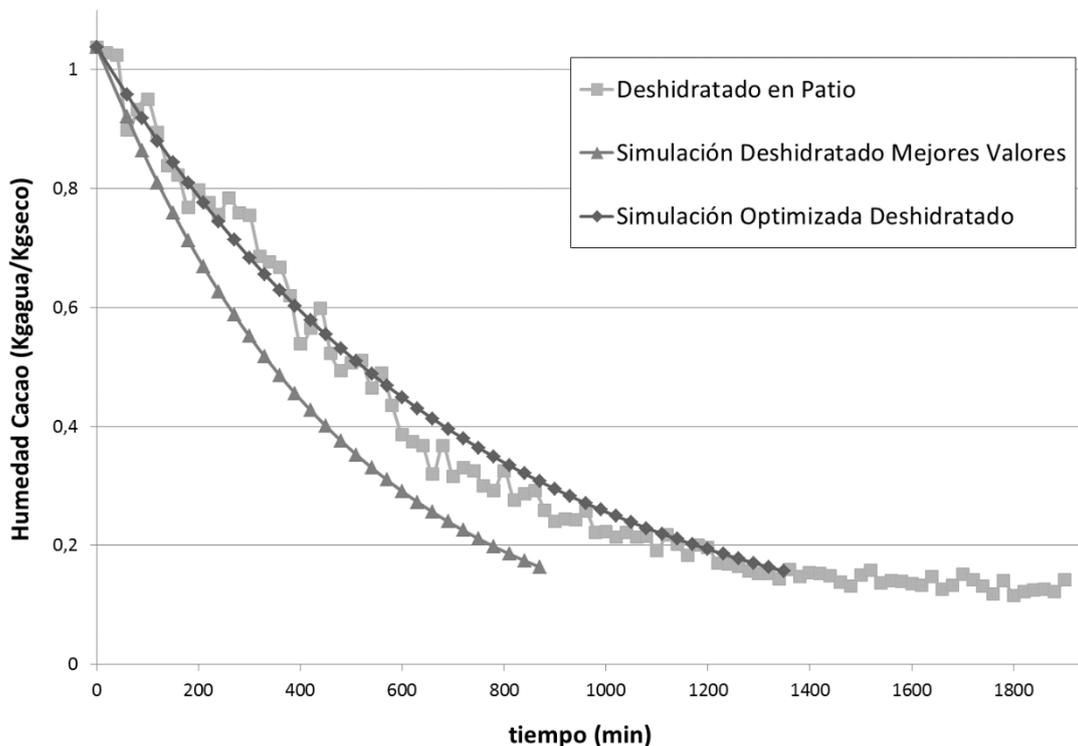


Fig. 6. Comparación entre Deshidratado en Patio y Simulaciones (Mejores Valores, Optimización) usando modelo matemático planteado

La simulación resultante de tomar los mejores comportamientos de las distintas dimensiones; arroja como resultado el comportamiento descrito por la curva llamada “**Simulación Deshidratado Mejores Valores**”. Este comportamiento indica una tendencia a deshidratar el cacao mucho más rápido que el secado tradicional en el patio, disminuyendo drásticamente el tiempo total empleado para esta actividad, de aproximadamente 1900 minutos continuos de proceso a 900 minutos, lo que se traduce en una disminución de aproximadamente 4

días continuos de secado en el patio durante 8 horas diarias a 2 días continuos. Además se logra cumplir con los valores finales de humedad normalizados y aceptados para la comercialización de un grano de cacao de alta calidad. Sin embargo no es posible garantizar alcanzar el valor de acidez final del producto aceptado por la norma, lo que es contraproducente para la calidad final del cacao afectando los precursores del aroma y del sabor.

Optimización del Deshidratador solar de cacao propuesto

Expuesto lo anterior, se propone optimizar el deshidratador solar directo de cacao, relacionando su impacto en el producto final (cacao seco).

Para esto se manipularon las dimensiones del prototipo de deshidratador realizando diversas simulaciones matemáticas en función de los rangos especificados para cada dimensión en particular, hasta lograr un comportamiento similar al proceso de deshidratado tradicional en el patio de secado de la comunidad de Chuao. De la figura 6, se desprende que ambas curvas **Deshidratado en Patio y Simulación Optimizada Deshidratado**, mantienen similitud dentro de los valores que significan lograr los valores de humedad y acidez final del producto, que garanticen la calidad final del mismo.

Sin embargo, aun cuando se logran unas condiciones de humedad y un tiempo crítico similares entre ambas; es posible disminuir el tiempo de deshidratado empleado tradicionalmente en el patio. En el comportamiento descrito por la curva **Simulación Optimizada Deshidratado**; se emplean, según el modelo matemático planteado; 1400 minutos continuos aproximadamente para el proceso de deshidratado, o lo que es lo mismo, aproximadamente 3 días de secado.

Adicionalmente a la disminución del tiempo del deshidratado en aproximadamente un 25 % del tiempo empleado actualmente (manteniendo las condiciones promedio de las variables atmosféricas); el deshidratador solar propuesto, en conjunto con el almacenador térmico que posee; es capaz de mantener el proceso de deshidratado diario por 150 minutos o lo que es lo mismo 2,5 horas más (ver Figura 7), lo que disminuye aún más el tiempo de este proceso.

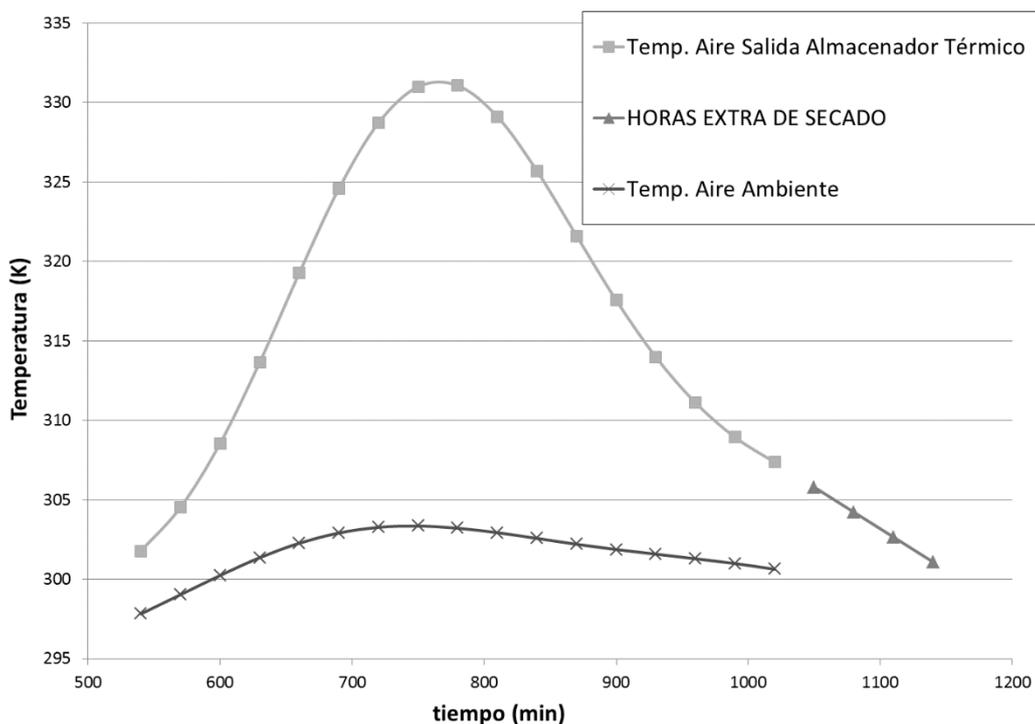


Fig. 7. Estimación de Tiempo Extra de Deshidratado debido al uso de almacenador térmico en el prototipo planteado

Este valor del tiempo extra del proceso de deshidratado del cacao se estimó al utilizar los valores conocidos de temperatura del aire ambiental en contraposición con el comportamiento de la temperatura del aire a la salida de almacenador térmico, relacionado con la capacidad del granito a almacenar energía en forma de calor.

Conclusiones

Para las dimensiones del calentador solar plano de aire propuesto, se puede incrementar la temperatura del medio secante hasta 65 °C, y reducir su humedad relativa hasta un 10 %, para las condiciones de la localidad de estudio.

Las dimensiones del deshidratador solar directo de cacao propuesto, permiten reproducir un comportamiento del proceso de secado similar al correspondiente a la curva de secado obtenida en el patio de Chuao.

Para una carga de 10 kg/m^2 de cacao, las dimensiones óptimas del deshidratado solar son: longitud del calentador solar: 2 m; longitud del almacenador térmico: 0,5 m; ancho del equipo: 1 m.

Para mantener el flujo másico de aire en el rango $0,014 \text{ kgs}^{-1} < \dot{m}_{\text{aire}} < 0,042 \text{ kgs}^{-1}$ se requiere una altura de la chimenea de 3 m.

El prototipo de deshidratador solar plano de cacao propuesto es capaz de mantener por dos horas y media el proceso de secado del producto, una vez la insolación solar alcanza su valor mínimo.

La metodología utilizada para la evaporación se comporta de manera adecuada hasta que el cacao alcance su humedad y tiempo crítico ya que la misma recorre un proceso similar al del deshidratado tradicional en patio.

El deshidratador solar propuesto permite reducir el tiempo de deshidratado del cacao en un 25 % aproximadamente, en relación al secado tradicional en patio.

Referencias

1. Dilip J, Rajeev KJ. Performance evaluation of an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage on deep-bed drying application. *Journal of Food Engineering* 2004;65:497-509. ISSN 1556-3758.
2. Benhamoua A, Fazouane F, Benyoucef B. Simulation of solar dryer performances with forced convection experimentally prove. *Physics Procedia*. 2014;55:96-105. ISSN 1556-3758.
3. Abdulla S, Wen P, Landers R, et al. Fruit drying process: Analysis, modeling and simulation. *Scientific Research and Essays* 2011;23:4915 – 24. ISSN1992-2248.
4. Saber C, Fethi Z, Ahmed B. Drying of agricultural crops by solar energy. *Desalination*. 2004;168:101-9. ISSN 0011-9164.
5. Dilip RP, Sawhney RL, Sarsavadia PN. Design, development and performance testings of a new natural convection solar dryer. *Energy*. 2002;27:579-90. ISSN 0360-5442.
6. Manoj M, Manivannan A. Simulation of solar dryer utilizing green house effect for cocoa bean drying. *Journal of Advanced Engineering Technology*. 2013:24-7. ISSN 1433-3015.
7. Pastrana A. Nopal (*Opuntia lasiacantha*) drying using an indirect solar dryer. *Energy Procedia* 2014;57:2984-93. ISSN 1876-6102.
8. Fara S, Ambarita H, Napitupulu F, et al. Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2014;5:32-40. ISSN 2214-157X.
9. AboulEnein S, El Sebaei AA, Ramadan MR, et al. Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying applications. *Renewable Energy*. 2000;21:505-22. ISSN 0960-1481.