

Diseño de un secador solar con circulación forzada

Roilan Iglesias Díaz¹
Joel Pantoja Enriquez²
Joel Moreira Acosta³
Neín Farrera⁴
Guillermo Ibáñez Duharte⁵

RESUMEN

Se diseñó un secador solar de tiro forzado, para el secado de productos agrícolas. Se realizaron pruebas en condiciones climáticas donde la temperatura ambiente promediaba los 28 grados centígrados y la humedad relativa era del 52 %. El colector solar consta de dos placas una absorbadora (que está expuesta directamente al sol a

través de los cristales), y otra que constituye el techo de la cámara de secado, ambas forman un túnel en el cual se coloca un ventilador para forzar el aire a través de éstas, además de una cámara de secado. Se hicieron las corridas experimentales para medir la temperatura utilizando termopares Tipo K, dispuestos en la cámara de secado, placa absorbadora y en el aire; se midió la humedad relativa en la cámara de secado con un equipo Hanna HI-9828, demostrándose finalmente que la eficiencia de este secador es del 45 %, lográndose una humedad relativa del aire en la cámara de secado baja, de un 1.5 % como promedio, con una radiación solar promedio de 700 w/m² y alcanzándose temperaturas altas en la cámara de secado de hasta 80 grados centígrados. Concluyéndose que el secador diseñado cuenta con todas las características necesarias para secar productos agrícolas con eficiencia y calidad.

Palabras claves: Secador Solar.

ABSTRACT

A solar dryer of forced shot has been designed and made for the dried one of agricultural products, to be able to design it efficiently a previous evaluation is needed, the tests are realized by climatic conditions where the temperature sets it was dividing equally them 28°C and the relative dampness was 52 %. The solar collector is clear of two plates an absorbadora (that it is directly to the Sun across the crystals), and other one that constitutes the ceiling of the

¹Universidad del Valle de México, Campus Tuxtla. Boulevard, Los Castillos no. 375, frac. Montes Azules, C.P. 29050 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. 9612157170 roilan2008@gmail.com,

²Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Libramiento Norte Poniente, s/n, col. Lajas Maciel Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, CP 29039 jpe2005@gmail.com

³Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Libramiento Norte Poniente, s/n, col. Lajas Maciel Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, CP 29039 jmoreira23@yahoo.com.mx,

⁴Universidad del Valle de México, Campus Tuxtla. Boulevard Los Castillos no. 375, frac. Montes Azules, C.P. 29050 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México nfarrera@uvmnet.edu

⁵Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Libramiento Norte Poniente, s/n, col. Lajas Maciel Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, CP 29039 guibdu@gmail.com.

drying stove, both form a tunnel in which a ventilator is placed to force the air across these; besides a drying stove. The experimental bullfights were done using to measure temperature thermocouples fixed Type K, arranged in the drying stove, plate absorber and in the air; I happen the relative dampness in the drying stove with an equipment Hanna HI-9828, being demonstrated finally that the efficiency of this dryer is 45 %, a relative dampness of the air being achieved in the low drying stove, of a 1.5 % as average, with a solar average radiation of 700 w/m² and high temperatures being reached in the drying stove of up to 80 °C. Concluyendose that the designed dryer all with all the necessary characteristics to dry agricultural products with efficiency and quality.

Key Word: Solar Dryer

NOMENCLATURA EN ORDEN A APARICIÓN

W_a Cantidad de agua retirada en el intervalo de tiempo (Kg_{agua} / hora)
 W_o Peso inicial del material a secar (Kg)
 M_{wb1} Humedad base húmeda (Kg_{agua} / kg_{producto húmedo}) en el estado inicial
 M_{wb2} Humedad base húmeda (Kg_{agua} / Kg_{producto húmedo}) en el estado final
 W_d Peso de materia seca (Kg)
 W_{db1} Humedad base seca (Kg_{agua} / Kg_{producto seco}) en el estado inicial
 W_{db2} Humedad base seca (Kg_{agua} / Kg_{producto seco}) en el estado final
 m_a Consumo de aire (Kg / h)
 W_a Cantidad de agua a eliminar (Kg_{agua} / h)
 w_1 Humedad absolutas del aire a la entrada del colector (%)
 w_2 Humedad absolutas del aire a la salida del colector (%)
 Q_a Energía consumida en la evaporación de la humedad del producto (W)
 h_1 Entalpia del aire a la entrada del colector (Kj / Kg_{aire seco})
 h_2 Entalpia del aire a la salida del colector (Kj / Kg_{aire seco})
 H_T Energía solar incidente (W / m²)

A_c Área efectiva del colector (m²)
 (τa) Producto de la transmitancia del vidrio y la absorptancia de la placa colector
 mC_p Capacidad calorífica del fluido de trabajo (J/°C)
 A Área de captación del colector
 dT/dt Rapidez de cambio de temperatura con respecto al tiempo (°C/s)
 Q_{abs} Calor total incidente absorbido por unidad de tiempo en el colector (W)
 Q_u Calor útil que finalmente se transfiere al fluido de trabajo (W)
 Q_L Pérdidas de calor por radiación, convección y conducción (W)
 du/dt Rapidez de el cambio de energía interna almacenada en el colector (W) cuyo valor es muy pequeño y generalmente se desprecia.
 k_a Conductividad térmica del aislante
 l y l' Espesores del aislante por el fondo y lados respectivamente
 P Perímetro del colector y M la altura de las paredes del mismo
 U_L Coeficiente global de pérdidas de calor (W/m²°C)
 $T_{p,m}$ Temperatura media de la placa de absorción (°C)
 T_a Temperatura del aire ambiente (°C) y ρ_d la reflectancia difusa.
 N Número de cubiertas de vidrio.
 b Ángulo de inclinación del colector (grados).
 ϵ_g Emitancia del vidrio.
 ϵ_p Emitancia de la placa.
 T_a Temperatura ambiente (K).
 T_p Temperatura media de la placa (K).
 n Velocidad del viento (m/s)

INTRODUCCIÓN

El secado de productos para su comercialización ha mejorado con el paso del tiempo, es una actividad de mucha demanda principalmente en frutas y otros productos agrícolas, la tecnología para el secado ha tenido numerosas variantes, con muchas ventajas y desventajas para su utilización, el diseño de cada secador dependerá del tipo de producto a secar y de las condiciones climáticas y geográficas del lugar de emplazamiento, Balladin *et al.* (1996) y Fito *et al.* (2001).

Un secador solar es aquel que utiliza la radiación solar que llega a la tierra para eliminar la humedad de los productos, calentando un fluido, bajándole su humedad relativa y elevando su temperatura para que éste sea el agente secante que extraiga la humedad del producto a secar por el cual este pasará, Fito *et al.* (2001).

El principal objetivo de nuestro trabajo es diseñar y evaluar en vacío un secador solar del tipo indirecto con circulación forzada que se caracteriza porque la radiación solar no incide directamente sobre el producto y además el movimiento del aire dentro del mismo es a través de un ventilador, diseñado bajo las condiciones climáticas de Tuxtla Gutiérrez.

Pretendemos desarrollar un secador que cumpla con los requisitos necesarios para el deshidratado de productos agrícolas: que con él se logren temperaturas altas, humedades relativas bajas y una remoción adecuada del agente secante (aire) dentro de la cámara, para así dar respuesta a la gran demanda de productos secos que hay en el estado de Chiapas como por ejemplo: mango, piña, chile, queso, te limón, semillas varias, frijol, maíz, café, hierbas aromáticas y medicinales, etcétera.

Si logramos bajar la humedad relativa del aire dentro de la cámara de secado a niveles por debajo del 10 % y elevar su temperatura por encima de 45 grados centígrados podremos ofrecer una solución a la gran demanda que existe en el estado de conservar productos agrícolas después de su cosecha por medio de la deshidratación solar.

Este trabajo constituye el comienzo de una serie de experiencias sobre el tema de secado que llevaremos a cabo en el estado de Chiapas donde existen las condiciones idóneas y con un potencial energético solar impresionante para la implementación de estas tecnologías. La implantación de secadores solares en las zonas agrícolas del estado de Chiapas aportará mayor calidad del producto seco final, podrán conservar sus productos por periodos prolongados con mayor valor comercial, se desarrollará económicamente la población y además se resuelven problemas técnicos-productivos sin agresión al medio ambiente, podemos implantarlas en comunidades de difícil acceso y de escasos recursos energético o que no estén conectadas a la red eléctrica nacional.

DESCRIPCIÓN DEL SECADOR

El secador consta de una placa absorbadora, que constituye todo el techo del secador a dos aguas, una cámara de secado, un ventilador, y dos orificios para la renovación del aire de la cámara de secado hacia el ambiente, como se muestra en las figuras 1 y 2, dos láminas galvanizadas pintadas de color negro mate colocadas con un inclinación de 30 grados encargadas de absorber la radiación solar, con dimensiones de 1.2 X 1.9 m, cada lado, sobre ésta una placa de vidrio 1.15 X 1.85 m, que además de provocar un efecto invernadero entre éste y la placa ennegrecida y evita la pérdida de calor por convección, la separación entre la placa negra y el vidrio de 0.1 m. Debajo de la placa absorbadora se ha colocado el ventilador en medio del túnel que forman ésta y el techo de la cámara con forma de pirámide rectangular con dimensiones 2.05 x 0.67 x 1.20 m, que mantendrá la recirculación del aire entre la cámara de secado y el colector solar, es un ventilador axial de mil 985 m³/h de flujo, motor de mil 660 rpm y consumo de 1/20 HP.

La cámara de secado tiene las siguientes dimensiones 2 x 1 x 2 m hecha de paredes de lámina galvanizada aislada del ambiente por una placa de espuma de poliuretano de 10 mm, dentro de ésta se encuentra una estructura de acero, con 8 bandejas

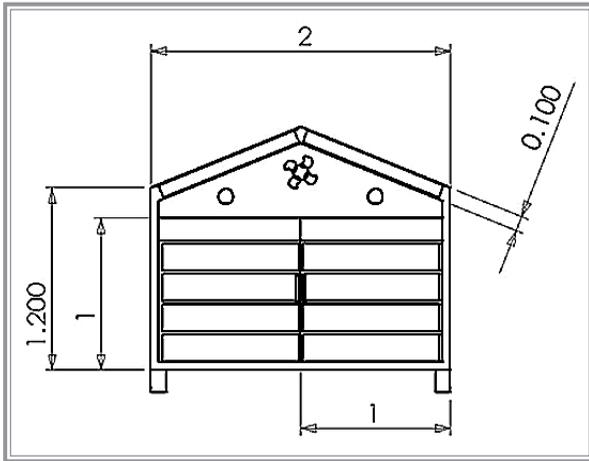


Figura 1 ■ | Vista frontal del secador (medidas en metros).

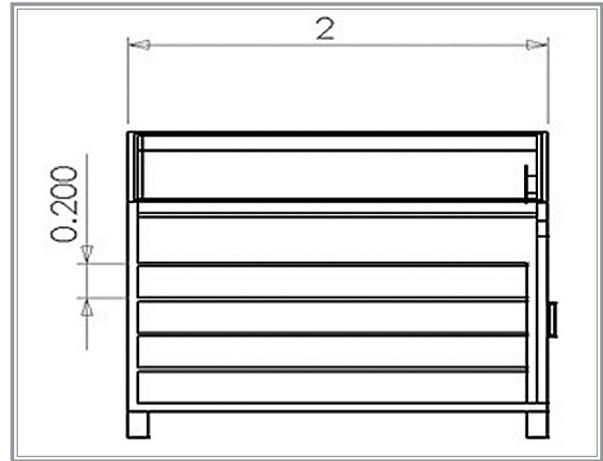


Figura 2 ■ | Vista lateral del secador (medidas en metros).



Foto 1 ■ | Secador ya ensamblado.



Foto 2 ■ | Secador en evaluación.

dispuestas de 2 en 2 para formar un arreglo de pares de bandejas necesarios para poder colocar los productos a secar separadas entre sí con una distancia de 20 cm, las dos puertas son de 1 x 1 m con un cerrojo para lograr la hermeticidad de la cámara de secado.

El secador cuenta con dos salidas de aire de 0.10 m de diámetro en un extremo del colector para poder extraer el aire cuando sus niveles de humedad relativa sean altos y ya no tenga las características como agente desecante idóneas (humedad relativa alta) y así mejorar la eficiencia del secado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla de los principales materiales usados en la construcción del secador que serán utilizadas en los cálculos térmicos.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Para poder diseñar un secador solar hay que hacer una evaluación de las condiciones meteorológicas de la zona de futuro emplazamiento, por medio de una estación actinométrica, donde se registraron entre otras variables: la radiación solar que incidía en el lugar,

Material	Parte del secador	Características importantes	
		Espesor (mm) (mm)	Conductividad (W/m°C)
Lámina galvanizada	Placa absorbadora, forro de paredes y puertas	0.7 mm	112.20
Espuma de poliuretano	Aislante para paredes y puertas	10 mm	0.23
Angular de acero	Estructura del secador, carro de bandejas, patas	75 x75 mm	29.30
Aluminio	Soporte de vidrios	25 x 25 mm	205.00
Vidrio	Colector (techo del secador)	6.0 mm	0.6 – 1.0
Madera	Piso	0.10 mm	0.13

Tabla 1 ■ Tabla de los principales materiales usados en la construcción del secador que serán utilizadas en los cálculos térmicos.

la velocidad del viento, la temperatura y humedad relativa del aire ambiente. Esta estación la programamos para recopilar estos datos cada media hora y ser registrados en una base de datos diariamente.

Teniendo el recurso energético medido por la estación actinométrica, con que se cuenta y sabiendo que la mayoría de los productos agrícolas tienen humedades iniciales entre el 60 y el 80 % y que deben secarse hasta humedades de equilibrio que rondan los 12 y 15 %, pues se calcula el área de captación. Primeramente necesitamos calcular la cantidad de energía que se necesita para evaporar la humedad de los productos

Consumo energético para la eliminación de la humedad del producto

La cantidad de agua a eliminar en un tiempo t (h) durante el secado para hacer pasar el producto desde una humedad M1 (humedad inicial) hasta M2 (humedad de equilibrio o final) ya sea en base húmeda (M_{wb}) o base seca (M_{db}). Navarrete, J.J. y Torres, E. (2009).

$$W_a = W_o [(M_{wb1} - M_{wb2}) / (1 - M_{wb2})] t$$

Esta ecuación también se puede poner en función de la humedad base seca

$$W_a = W_d [(W_{db1} - W_{db2})] t$$

El consumo de aire

El flujo de aire que debe contornear al producto será:

$$m_a = W_a / (w_2 - w_1)$$

La energía consumida

Para evaporar toda esta humedad, haciendo un balance de masa y energía, donde toda la energía y humedad que gane el aire será toda la que pierda el producto, tenemos que: Kkitinoja, Adel Kader (1996).

$$Q_a = m_a (h_2 - h_1)$$

Ya con la cantidad de calor (Q_a) necesaria para la evaporación del agua del producto y la cantidad de energía solar con que contamos podemos diseñar el área del colector solar.

Las leyes de la transferencia de calor nos relacionan estas variantes con el área de captación o área de transferencia de calor como sigue.

$$Q_a = m_a C_p A (dT/dt)$$

dT/dt es la variación de la temperatura del aire desde que entra al secador hasta que sale del colector

La cámara de secado se diseña en dependencia del tipo de producto y del tipo de acción de carga y descarga que sea más factible. Dependerá también de la demanda de producto seco o producción, siempre teniendo en cuenta que la velocidad del aire dentro de ésta debe estar alrededor de 1m/s, este parámetro lo asumimos inicialmente, Balladin *et al.* (1996).

La eficiencia térmica de un colector solar plano se puede describir mediante un balance de energía. Éste se representa mediante la siguiente ecuación: Navarrete, J.J. y Torres, E. (2009) y Duffie, J. A. y Beckman, W.A. (1980).

$$Q_{abs} = Q_u + Q_L + \frac{du}{dt}$$

Donde Q_{abs} es el calor total incidente absorbido por unidad de tiempo en el colector (W), Q_u es el calor útil que finalmente se transfiere al fluido de trabajo (W), Q_L son las pérdidas de calor hacia los alrededores por radiación, convección y conducción (W) y du/dt la rapidez de el cambio de energía interna almacenada en el colector (W) cuyo valor es muy pequeño y generalmente se desprecia.

Haciendo un desglose más detallado de los términos de la ecuación anterior, encontramos que cada uno de ellos puede ser representado por otra ecuación.

$$Q_{abs} = H_T A_c (\tau \alpha)$$

$$Q_u = m C_p \frac{dT}{dt}$$

$$Q_L = U_L A_c (T_{mp} - T_a)$$

$$(\alpha \tau) = \frac{\alpha \tau}{1 - (1 - \alpha) \rho d}$$

El valor de ρd representa la fracción de la radiación solar que es absorbida por el colector y toma diferentes valores según el número de cubiertas que se utilicen. Así, para 1, 2, 3 y 4 cubiertas, los valores de ρd son aproximadamente 0.16, 0.24, 0.29 y 0.32, respectivamente, Mujumdar, A. S (2000).

Sustituyendo y reordenando la ecuación de balance de energía tenemos que:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_p - T_a)]$$

Donde:

$$S = H_T (\tau \alpha)$$

Como podemos ver el calor útil queda como función de la $T_{p,m}$ que es difícil de calcular o medir, ya que está en función del diseño del colector y de variables que cambian continuamente con el tiempo como la radiación solar incidente y la temperatura del fluido de trabajo al entrar al colector.

Aunque aparentemente la ecuación que representa las pérdidas de calor, es sencilla; la evaluación numérica del coeficiente total de pérdidas de calor (U_L) requiere de un análisis detallado. A continuación se presenta un modelo matemático de cómo obtenerlo. Podemos decir entonces, que U_L es la suma de varios coeficientes de pérdidas de calor, que se pueden expresar también como el inverso de sus resistencias, así: Navarrete J.J y Torres E, (2009).

$$U_L = U_t + U_b + U_e$$

Donde U_t es el coeficiente total de transferencia de calor para la parte superior del colector.

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_p} \left[\frac{T_p - T_a}{N + f} \right]^e + \frac{1}{h_w}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0.00591N h_w} + \frac{2N + f - 1 - 0.133 \varepsilon_p - N}{\varepsilon_g}}$$

De donde:

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w \varepsilon_p)(1 + 0.07899N)$$

$$e = 0.43 \left(1 - \frac{100}{T_p} \right)$$

$C = 520(1 - 0.000051\beta^2)$, Para $0^\circ < b < 70^\circ$; Para $70^\circ < b < 90^\circ$ se usa $b = 70^\circ$

$h_w = 5.7 + 3.8v$, es el coeficiente de transferencia de calor del viento (W/m^2C).

U_b y U_e , son los coeficientes de pérdida de calor por conducción por el fondo y lados respectivamente y que tienen relación con las dimensiones del colector y el tipo y grosor del aislante utilizado, de manera que:

$$U_b = \frac{k_a}{l} \quad y$$

Calor útil.

$$Q_u = A_c [H_T(\tau\alpha) - U_L(T_p - T_a)]$$

Eficiencia del colector solar

Es la relación entre el calor útil y la energía solar incidente sobre el colector en un mismo periodo de tiempo.

$$\eta_c = \frac{Q_u}{H_T A_c}$$

Una vez diseñado el secador, y modelar matemáticamente sus principales parámetros podemos construirlo y posteriormente evaluarlo termodinámicamente en vacío.

EVALUACIÓN EN VACÍO DEL SECADOR DISEÑADO

Se evaluó el secador propuesto en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas en el mes de marzo. Para evaluar el secador se colocaron termopares tipo k que registraban la temperatura en diferentes partes del secador tales como: cámara de secado, colector solar y placa ennegrecida del colector, y con ayuda de un multímetro digital de gancho Esteren se tomaron las mediciones en diferentes puntos del secador en intervalos de tiempo fijos de media hora, desde las 7:00 hasta las 18:00 horas.

A su vez se registró en los mismos intervalos la humedad relativa del aire dentro la cámara de secado usando un sensor de humedad digital marca Hanna HI-9828.

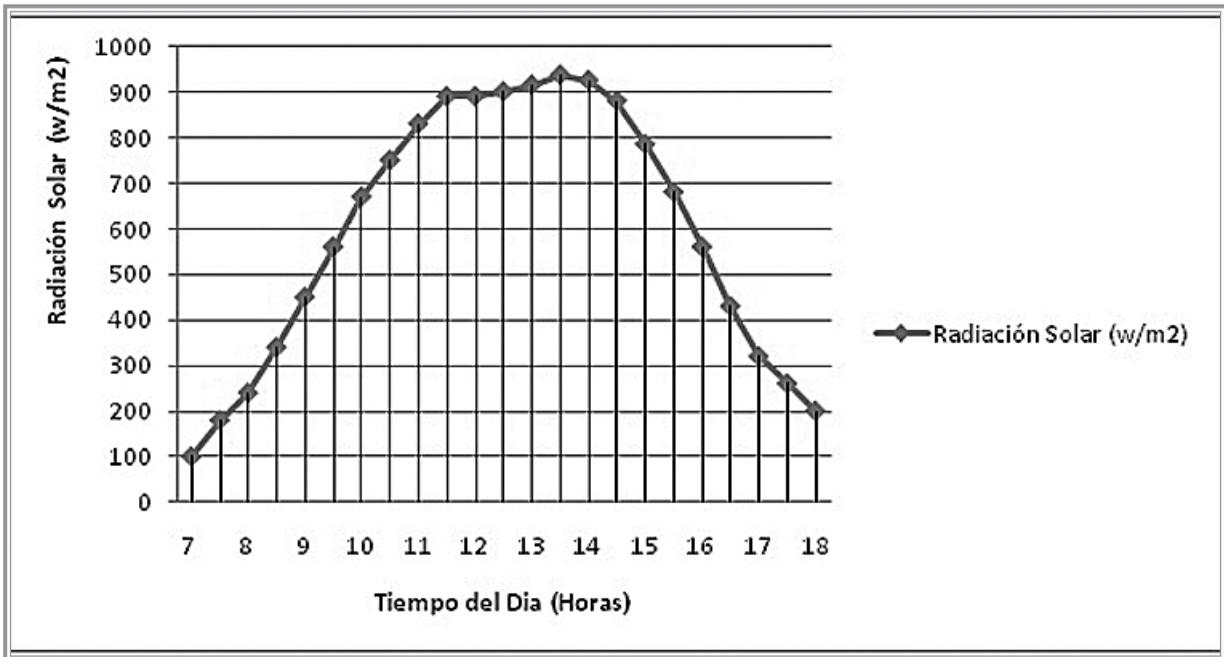
Y así pudimos registrar por un periodo de 15 días del mes de marzo cómo iban variando los parámetros que nos propusimos evaluar dentro del secador solar para poder hacer una comparación con los mismos parámetros del aire ambiente, pudiendo llegar a conclusiones que discutiremos a continuación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

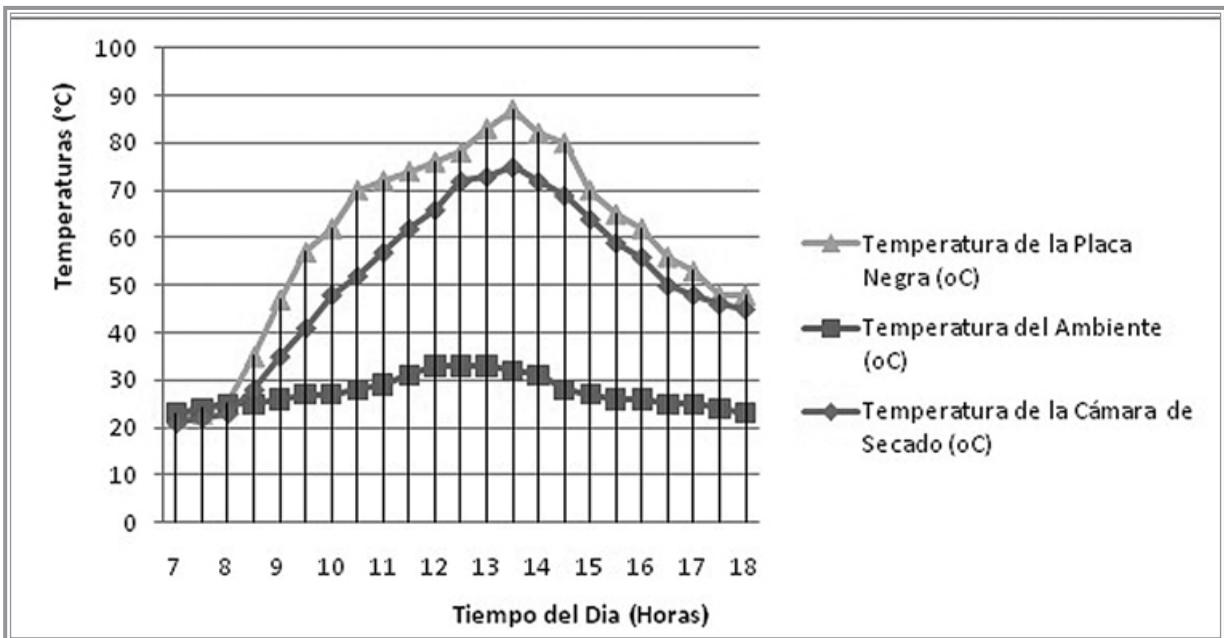
Los resultados de la evaluación en vacío del secador diseñado se pueden apreciar en las gráficas que a continuación comentaremos.

En la gráfica 1, se distingue que la radiación solar registrada para la estación actinométrica obtiene un máximo promedio a partir de las 13:00 horas con $910 W/m^2$. Después de las 13:00 horas la radiación solar comienza a decaer y el aire va perdiendo su capacidad de secar dentro de la cámara. Pero entre las 11:00 y 15:00 horas promedio por encima de los $850 W/m^2$, valor muy aceptable para la época del año en Chiapas (primavera), es una curva típica de radiación solar para la primavera en Chiapas

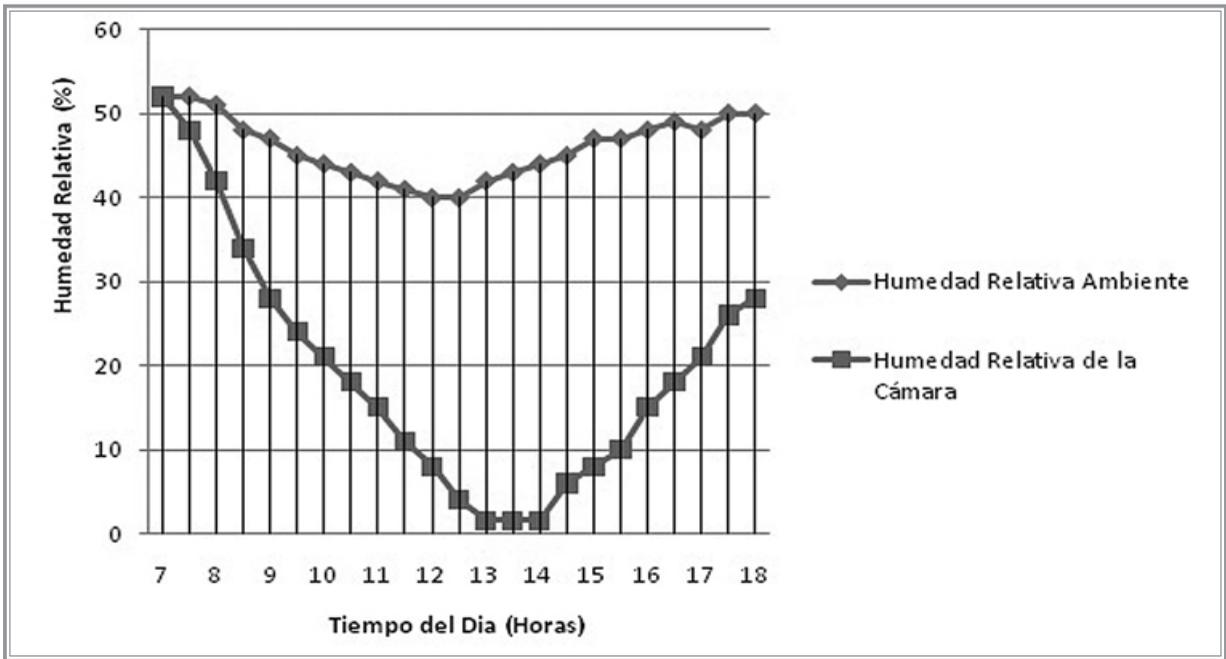
En la gráfica 2 se puede estimar cómo la temperatura del aire (agente secante) dentro del secador va aumentando durante el día gracias a la temperatura que alcanza la placa ennegrecida. En esos días la tempera-



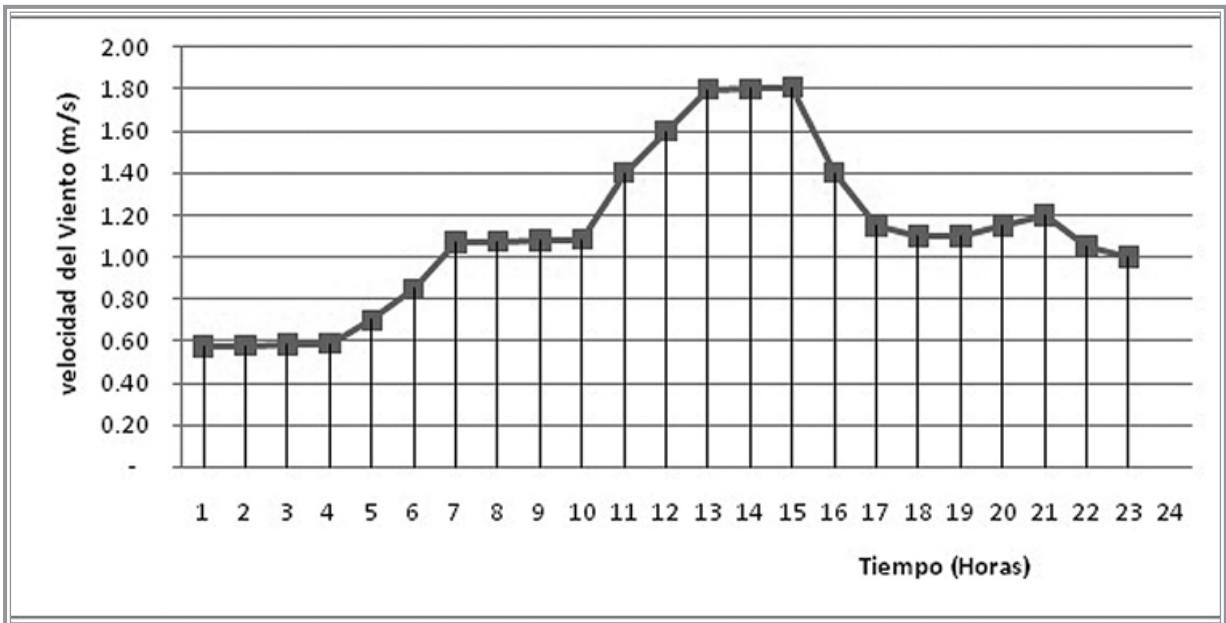
Gráfica 1 ■ Radiación solar promedio cada media hora. Registrada por la estación actinométrica .



Gráfica 2 ■ Variación de la temperatura del aire cuando pasa por el colector solar. Medidas con termopares tipo K.



Gráfica 3 ■ Variación de la humedad relativa del aire al ser calentado en el colector solar.



Gráfica 4 ■ Velocidad del aire en el exterior del secador.

tura ambiente promedio unos 28 grados centígrados y en la cámara de secado se obtuvieron temperaturas promedio de alrededor de 60 grados centígrados, que era uno de nuestros principales objetivos, manteniendo temperaturas superiores a los 30 grados centígrados después el ocaso, eso nos indica que el secador está bien aislado, contribuyendo a mejorar su eficiencia. La placa absorbidora alcanza temperaturas máximas de 90 grados centígrados en las horas de mayor radiación, promediando 75 grados centígrados, eso nos dice que existen pocas pérdidas de calor en el colector solar y que el diseño es bueno y eficiente.

En la gráfica 3 se puede apreciar que la humedad del aire en la cámara de secado va desde un 52 % hasta un 1.5 % en horas del medio día a medida que se va calentando desde un 28 grados centígrados hasta 70 grados centígrados a medida que va variando la radiación incidente durante el día, consideramos que se obtienen valores de ambos parámetros del aire muy buenos para el secado de productos, con estos parámetros el aire seco tiene gran avidez por la humedad que presentan los productos agrícolas. La humedad relativa del aire en el secador promedia 8% entre las 11:00 y las 15:00 horas.

En la gráfica 4, se observa cómo la velocidad del viento aumenta obteniendo sus máximos a partir de las 15:00 horas. Pero debido a las condiciones climáticas del lugar de emplazamiento (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas) en raras ocasiones llega a ser considerablemente alta, promediando 1.6 m/s, podemos concluir que no afecta el desempeño del secador, por lo que se despreciará su influencia en el diseño del secador.

CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un secador solar de tiro forzado e indirecto. Este secador ofrece muchas ventajas para el secado de productos agrícolas ya que en las pruebas en vacío se obtuvieron temperaturas elevadas del aire en la cámara de secado que promediaron alrededor de 60 grados centígrados y humedades relativas bajas del aire dentro de la cámara de secado promediando 8 % entre

las 11:00 y las 15:00 horas, que son las mejores horas de trabajo para este tipo de secador, aunque esto no quiere decir que el secador pierda la capacidad de seguir secando después de las 18:00 horas, por lo que concluimos que este diseño es eficiente y factible para el secado de productos agrícolas.

Este diseño de secador solar ofrecer una solución a la gran demanda que existe en el estado de Chiapas de conservar productos agrícolas después de su cosecha por medio de la deshidratación solar. El agente secante dentro de la cámara alcanzará parámetros ideales para el secado de productos agrícolas de forma eficiente y rápida, en un ambiente controlado y no expuesto a las agresiones ambientales y de plagas. Finalmente la eficiencia térmica obtenida del colector solar fue del 52% siendo este un valor muy bueno para un secador solar.

LITERATURA CITADA

- BALLADIN D.A, I. CHANG YEN, D.R. MC-GRAW & O. HEADLEY, 1996.** Solar drying of West Indian Ginger rhizome using a wire basket dryer, en *Renewable Energy*, 7 (4): 409-418
- DUFFIE J. A & BECKMAN W.A., 1980.** *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley & Sons, Interscience, Second Edition, pp. 58-115.
- FITO P, A. GRAU, J.M. BARAT & A. ALBORS, 2001.** *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*, Editorial de la UPV, Valencia, pp. 48- 203.
- KITINOJA, ADEL A. KADER, 1996.** *Manual de prácticas de manejo postcosecha de los productos hortofrutícolas a pequeña escala*, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapala, México, pp. 15- 16.
- NAVARRETE J.J & E. TORRES, 2009.** *Curso de secado solar*, ANES, pp. 5-72.