

# Cálculo y diseño de dos secadores solares con sistema fotovoltaico para deshidratación de alimentos

Mario Alberto Morales Ovando<sup>1\*</sup>,  
Eleazar Mejía de los Santos<sup>1</sup>, Ángel Silvestre Ángeles Escobar<sup>1</sup>,  
María Emperatriz Domínguez Espinosa<sup>2</sup>, Jacobo López Roblero<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Sede Acapetahua, Calle Central Norte entre 4ª. y 5ª Norte s/n. C.P. 30580, Chiapas, México. \*autor para correspondencia: mario.morales@unicach.mx, cel: 9612152902 | <sup>2</sup>Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Libramiento Norte Poniente núm. 1150, colonia Lajas Maciel. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. | <sup>3</sup>Universidad Autónoma de Chiapas, Carretera a puerto madero km. 1.5 s/n, Tapachula, Chiapas, C.P. 30700.

## RESUMEN

Se presenta la construcción de dos secadores solares con sistema fotovoltaico para el proceso de deshidratación de alimentos. El primer secador se construyó con placas de acero calibre 10, fibra de vidrio, lámina galvanizada y generador de energía (panel solar, batería, inversor de corriente de 12v a 120v) en cual se obtuvo una eficiencia del 80.48% con un colector de calor de 0.4352 m<sup>3</sup>, mientras que el segundo secador construido de materia lámina galvanizada número 14, fibra de vidrio, extractor de aire y adaptando el generador de energía del primer secador se obtuvo una eficiencia del 80.48% con un recolector de calor de 0.93 m<sup>3</sup>, de los dos secadores construidos se demuestra que ambos tienen una eficiencia del 80.48% comparado con el diseño López en el 2011 con una eficiencia del 78%.

**Palabras clave:** secador solar, sistema fotovoltaico, eficiencia térmica.

## ABSTRACT

It is presented the construction of two solar dryers with photovoltaic system for food dehydration process. The first dryer was constructed with a number ten steel plate, fiberglass, a zinc-coated steel sheet and one power generator; the power generator (was constructed with a solar panel, battery, one 12v power inverter to 120v); in which, an efficiency of 80.48% was obtained with a heat collector of 0.4352 m<sup>3</sup>. The second dryer was constructed with a zinc-coated steel sheet Number fourteen, fiberglass, an extractor fan and adaptations of the power generator taken from the first dryer; the efficiency of the second dryer was of 80.48% which was obtained with a heat collector of 0.93 m<sup>3</sup>. It is been shown that both dryers have an efficiency of 80.48% in comparison to Lopez design in 2011, which had an efficiency of 78%.

**Key words:** solar dryer, photovoltaic system, thermal efficiency.

## INTRODUCCIÓN

Con el aumento de la población en el mundo, la sociedad se obligó a disponer de una mayor cantidad de alimento, principalmente de origen agrícola como granos, frutas, legumbres y vegetales. La producción de estos productos son influenciados por las condiciones climáticas que pueden ser favorable como perjudicial para dicha actividad. Por ello es importante preservar los excedentes agrícolas para su posterior utilización (Rivasplata *et al.*, 2003).

El secado de alimentos mediante la exposición al sol, se ha realizado desde tiempos antiguos, como un método de conservación práctico y de bajo costo de operación, por el uso de la energía solar para el calentamiento del producto, provocando en él una disminución de conteni-

do de agua, que a la vez inhibe el crecimiento microbiano y algunas reacciones químicas internas (Berrueta *et al.*, 2003).

El diseño de prototipos de secadores solares se llevan a cabo para el secado de frutas y verduras con un funcionamiento directo y con circulación natural (López, 2011), de manera comercial estos equipos son de producción sencilla y de bajo costo comparado con los secadores de distribución, ya que puede emplearse en una chimenea la cual incrementa la fuerza de la corriente de aire entrante, generando así una mayor velocidad de circulación de aire y, por tanto, una tasa de eliminación del vapor de agua más rápida (Rico *et al.*, 2010).

El principio del funcionamiento de los secadores solares mixtos a nivel piloto para frutas, hortalizas y carnes se basa en aprovechar la radiación proveniente del

sol, convirtiéndola en una fuente de combustible para el secado de alimentos a través del calor producido por la luz solar, para llevar la deshidratación y la disminución de microorganismos en los alimentos, evitando así contaminar el ambiente con energías derivadas de los hidrocarburos. En algunos alimentos su porcentaje de humedad son: papa 75%, zanahoria 70%, manzana 84%, plátano 80%, mango 85%, y pescado 80% (Nandwani, 2013). Siendo lo anterior, una rama altamente rentable de la explotación de las fuentes renovables de energía caracterizada por su alto potencial energético, económico, social y ecológico, contribuyendo a la conservación del medio ambiente al evitar emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> y óxido de nitrógeno y azufre, pues sustituye al consumo de electricidad y de combustibles fósiles (Bergues *et al.*, 2013).

En el municipio de Acapetahua se produce materia prima proveniente del sector agrícola y pesquero como son carne, frutas y verduras, generalmente estos son cosechados por temporadas, dando lugar a una saturación de mercado y por lo consiguiente un excedente de desperdicio, afectando en lo económico a los pequeños productores que no cuentan con herramientas y recursos para prolongar la vida en anaquel de sus productos.

## METODOLOGÍA

Este estudio es de carácter experimental, el cual se evalúa el desempeño y eficiencia del diseño de los secadores solares mixtos, con un sistema fotovoltaico (panel solar, batería, inversor de corriente desde 12 v hasta 120 v).

Se construyeron dos secadores solares a partir de los siguientes materiales:

Secador No. 1. La cámara de secado se construyó con placas de acero calibre 10, con cubierta de fibra de vidrio, en su interior se recubrió con lámina lisa galvanizada número 14, el cual se instaló un sensor de temperatura marca Emko conectado a un amperímetro y aun sistema de extracción de aire, todo el sistema conectado al generador de energía (panel solar, batería, inversor de corriente) que adapta la energía proveniente del panel para satisfacer el consumo de los equipos dentro del secador (12 v a 120 v); el colector de calor se construyó de vidrio, con aislante de fibra de vidrio y cubierta con lámina galvanizada No. 14.

Secador No. 2. Se construyó bajo las mismas condiciones que el secador 1 con la sustitución de placa de acero calibre 10 por lámina galvanizada No. 14, al colector de calor se acopló tubería de PVC de 2 pulgadas, un codo de 45 grados conectado a un ventilador, con una modificación en el diseño del secador número 1.

## Ecuaciones para el cálculo de eficiencia (Genkoplis, 2010)

$$\text{Humedad: } H = \frac{PA}{P-PA} * \frac{18.02 \text{ kg H}_2\text{O}}{\text{Kg mol H}_2\text{O}} * \frac{1}{28.97 \text{ kg aire} / \text{kg mol aire}} \quad (1)$$

$$\text{Porcentaje de humedad relativa: } Hr = 100 \frac{PA_s}{PA_s} \quad (2)$$

$$\text{Humedad de saturación: } H_s = \frac{PA_s}{P-PA_s} \quad (3)$$

$$\text{Porcentaje de humedad: } Hp = 100 \frac{H}{H_s} \quad (4)$$

$$\text{Curvas de velocidad de secado: } Xt = \frac{W - W_s}{W_s}, R = \frac{L_s}{A} \quad (5)$$

## Resistencias

Las resistencias equivalentes que representan la oposición a las pérdidas de calor por convección (1/hc) y radiación (1/hr) y están representadas por R1 y R2, R3 representa la resistencia a la conducción a través del aislante térmico en la parte posterior y lados del colector y la R4 es usualmente muy pequeña (despreciable). La idea es tratar de obtener una resistencia equivalente (Req), esta resistencia es igual al inverso del coeficiente total de pérdidas de calor Req= 1/Ul. Podemos decir entonces que Ul es la suma de varios coeficientes de pérdida de calor, que se puede expresar como el inverso de sus resistencias, así:

$$Ul = Ut + Ub + Ue$$

Donde Ut es el coeficiente total de transferencia de calor para la parte superior del colector y es igual al inverso de las de la suma de las dos primeras resistencias:

$$U_t = \left\{ \frac{N}{C \left[ \frac{T_p - T_a}{T_p} \right] e} + \frac{1}{Hw} \right\}^{-1} + \frac{1}{\frac{1}{E_p + 0.00591Nhw} + \frac{2N + F - 1 - 0.133E_p - N}{E_p}} \quad (6)$$

Ub y Ue, son los coeficientes de pérdida de calor por conducción en el fondo y los lados respectivamente, que tienen que ver con R3. Además estos coeficientes también tienen relación las dimensiones del colector y el tipo y grosor del aislante utilizado, de manera que se escribe las relaciones:

$$Ub = \frac{Ka}{l} \quad (7)$$

$$Ue = \frac{Ka MP}{l' Ac} \quad (8)$$

Ka: Es la conductividad térmica del aislante

l: Espesor del aislante en el fondo

l': Espesor del aislante a los lados

Ac (m<sup>2</sup>): Es el área efectiva del colector.

P: Perímetro del colector

M: Altura del colector

La temperatura media es función del diseño del colector y a su vez este depende de la radiación solar incidente y la temperatura del fluido de trabajo al entrar al colector.

**Calor útil**

Considerando un día asoleado con una radiación de 1100 W/ (HT) en el municipio de Acapetahua. Si la transmitancia del vidrio es igual a 0.88, la absorbanca de la chapa colectora es de 0.9 y el coeficiente para una cubierta de vidrio es 0.16, podemos obtener el calor útil del colector solar:

$$Q_a = A_c [Ht(\tau\alpha) - U_l (T_p - T_a)] \tag{9}$$

- H (W/m<sup>2</sup>): Es la energía solar incidente.
- A<sub>c</sub>: (m<sup>2</sup>): Es el área efectiva del colector.
- τ: Transmitancia solar efectiva de la cubierta del colector
- α: Absorbanca de la placa absorbente del colector
- U<sub>l</sub> (W/m<sup>2</sup> °C): Coeficiente de pérdidas de calor por radiación, convección y conducción
- T<sub>pm</sub> (°C): Temperatura media de la placa de absorción
- T<sub>a</sub>: Temperatura del ambiente.

**Eficiencia**

Para el cálculo de la eficiencia se utiliza una expresión muy sencilla, en el que se ocupan algunos de los datos utilizado anteriormente.

$$\eta_c = \frac{Q_u}{Ht A_c} \tag{10}$$

**Coefficiente total de pérdida de calor**

A continuación se ilustraran las ecuaciones para calcular la tasa de transferencia de calor por convección, establecidas por Gengel en 1996.

Donde:

- h= coeficiente de calor por convección.
- A= área
- σ = 5.67 \* 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>
- T<sub>s</sub>= temperatura del equipo.
- T<sub>f</sub>= temperatura ambiente.

$$Q_{conv} = hA (T_s - T_f) \tag{11}$$

$$Q_{emt,max} = \sigma AT_s^4 \tag{12}$$

$$Q_{emt} = \epsilon \sigma AT_s^4 \tag{13}$$

$$Q_{ads} \dots = \alpha Q_{inc} \tag{14}$$

$$Q_{rad} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{surr}^4) \tag{15}$$

$$Q_{total} = Q_{conv} + Q_{rad} \tag{16}$$

**MATERIAS PRIMAS**

Para los experimentos realizados en los secadores solares se utilizaron 100 gr de carne de cerdo, esta materia prima fue obtenida del mercado 20 de Noviembre del municipio de Acapetahua, Chiapas. Posteriormente fueron pesados y colocados en charolas de aluminio los cuales se encontraban a peso constante en un horno de secado marca Yamato, modelo Drying Oven DX402. Para la medición de humedad se utilizó un termohidrómetro marca Company, modelo 4184.

**RESULTADOS**

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en los cálculos de energía de los secadores solares en estudio.

En la tabla 1 se observan los datos de los parámetros calculados, en el cual se comparan los secadores No. 1 y No. 2, durante el secado de carne de cerdo en un periodo de 24 h; cabe mencionar que durante los tiempos de radiación solar eran variados esto debido a que el clima cambiaba constantemente lo que permitía que el sistema fotovoltaico mantuviera la temperatura interna del secador el cual era controlada por un sensor de temperatura marca Emko calibrado de acuerdo a la temperatura de 65°C ± 5°C o 70°C ± 5°C

Aspectos evaluados	Secador 1	Secador 2
Temperatura	65°C	70 °C
Humedad	0.039	0.039
Humedad de saturación		
Porcentaje de humedad	19.06 %	14.02 %
Porcentaje de humedad relativa	23.76 %	19.07 %

**TABLA 1** Comportamiento de los equipos con respecto a la humedad.

En la tabla 2 se observan los resultados de los cálculos realizados con respecto a los coeficientes de calor (Q<sub>conv</sub>, Q<sub>total</sub>) en los secadores No.1 y No. 2, asimismo el cálculo de la capacidad de absorbanca de radiación, los resultados analizados entre ambos secadores se puede observar una diferencia debido a que el secador No.1 tiene una caja de recolección de calor de 0.4352 m<sup>3</sup> y el secador No.2 un colector de 0.93 m<sup>3</sup>.

Aspectos evaluados	Secador 1	Secador 2
	1, 630.128 w	3,421.6 w
	388.7615535 w	739.0042319 w
	10.8853235 w	20.69211849 w
	24,550.0436	24,550.04736
	3.37854703 w	7.236067258 w
	1,639.506547 w	3,428.836067 w

TABLA 2

Resultados de tasa de transferencia de calor por convección.

En la tabla 3 se presentan los datos obtenidos de coeficiente total de pérdida de calor en los equipos diseñados, así mismo se obtuvo como resultado que la eficiencia para los dos equipos es similar con un 80.48%, estos resultados comparados con López en el 2011 muestra que sus secadores tienen una eficiencia del 78%

Aspectos evaluados	Secador 1	Secador 2
Ut	6.036643706	5.89448231
Ub	16.2992126	16.2992126
Ue	0.576144328	15.09670453

## LITERATURA CITADA

- BURRETA S., V.M., F. LIMÓN A., J.L. FERNÁNDEZ Z. Y M.L. SOTO P.O., 2003. *Participación campesina en el diseño y construcción de un secador solar para Café*. 1ª. Ed. Agro ciencia. Pp. 95-106.
- BERGUES R., C.C., L. BÉRRIZ P. Y P. GRIÑÁN V., 2013. Secadores solares directos: Una experiencia para su extensión y generalización en la zona oriental de Cuba. *Tecnología Química 33 (1): 1-9*.
- CENGEL, Y.A. Y M.A. BOLES, 1996. *Termodinámica*, Tomo I, 2ª. Ed. México. McGraw Hill. Pp.140-160.
- GEANKOPLIS, C., 2010. *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*, 4ª. Ed. México. Patrio. Pp. 585-588.
- LOPEZ, J., 2011. *Diseño, construcción y evaluación de un secador solar mixto*. UNICACH: Facultad de Ingeniería. Pp. 61-79.
- NANDWANI, S., 2013. *Secadores solares en Costa Rica experiencia personal*. Costa Rica. Pp. 1-15.
- RICO J., E., A. PÉREZ-NIETO, G.M.L. RUIZ A. Y L. ROBLEDO C., 2010. *Innovación en el diseño y construcción de un secador solar para frutas y hortalizas*. Universidad de Guanajuato, México. Pp.1-17.
- RIVASPLATA C., C., R. CALIZAYA M.A. Y J. GUTIÉRREZ G., 2003. *Diseño y evaluación de un secador solar para el secado industrial del tomate*. Perú. Pp. 1-20.

Aspectos evaluados	Secador 1	Secador 2
UI	22.91200403	37.29039945
Qu	16,183.00225 Kw	24,640.11009 Kw
$\eta_c$	80.48 %	80.48 %

TABLA 3

Resultados obtenidos de coeficiente total de pérdida de calor, calor útil y eficiencia en los equipos.

## CONCLUSIONES

Este proyecto demuestra que es posible desarrollar tecnología apropiada para el secado de productos agrícolas en el municipio de Acapetahua, Chiapas, en este caso se realizó el proceso de diseño, cálculo y construcción de un secador solar indirecto.

Para un mayor aprovechamiento de la energía solar por el colector solar indirecto las pruebas experimentales se deben realizar en el intervalo de tiempo que exista mejores condiciones de la variación de temperatura (en nuestro caso desde 8 a.m. hasta 5 p.m.) en el municipio de Acapetahua, Chiapas.

Se calculó la capacidad calorífica de los secadores, obteniendo como resultado para el secador No. 1 con 16,183.00225 W y para el secador No. 2 de 24,640.11009 W. También se determinó la eficiencia de los equipos, en los cuales se tuvieron para ambos secadores un 80.48% de eficiencia.