

ESTUDIO COMPARTIVO DE DOS SECADORES SOLARES HÍBRIDOS TIPO CHAROLA DURANTE EL PROCESO DE SECADO DE PIÑA

Roldán R.M.E., Gudiño A.D.

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), Periférico Sur Manuel Gómez Morán # 8585, Tlaquepaque, CP 45604, Jalisco, México, tel 33 36693506, fax 33 36693505, dgudino@iteso.mx

RESUMEN

Se presenta un estudio comparativo entre dos secadores solares tipo charola híbridos, durante el proceso de secado de piña miel. Los secadores trabajan con una doble capa de producto a secar, usan o no disipadores de calor, operan en modo de recepción de radiación solar directo e indirecto y tienen la opción de operar en modo híbrido o modo solar. La charola de cada secador mide 0.61x1.22x0.095 m con capacidad para 4 bandejas en 2 niveles, donde se pone el producto a secar. Tienen un serpentín de cobre en el fondo de la charola, por donde pasa agua caliente. El secador con disipadores no mostró diferencias respecto al secador que no los usó. El tiempo de secado del secador directo fue menor que el indirecto (8.4 vs 9.6 h), con eficiencias de evaporación de alrededor de 14% para ambos secadores. El secador que operó en modo solar fue casi 3 veces más eficiente (30%) que el secador en modo híbrido (12%), pero con tiempos de secado inversos (15.3 vs 8.2 h).

PALABRAS CLAVE: Piña, Secador Híbrido, Directo e Indirecto, Eficiencia.

ABSTRACT

Here are shown the results of a comparison between two hybrid solar tray dryers, during the pineapple drying. The two dehydrators can work with single or double layer of product to dry, they can either use or not steel dissipaters, they are able to work on hybrid mode or only solar mode. The dimensions of the steel black tray are: 0.61x1.22x0.095 m, and it is able to carry 4 plates to dry the product which are distributed in 2 layers where the product is dried. Under the plate, it has a cooper coil where hot water flows. The comparison between using dissipaters or not, did not show much of a difference. Drying directly the pineapples took less time than indirectly sun (8.4 vs 9.6) with efficiencies around 14% for both dryers. The dryer that worked only with solar incidence was approximately 3 times more efficient (30%) that the hybrid, nevertheless the solar dryer took 15.3 hours to dry all the product in comparison to the hybrid dryer that took 8.2 hours to finish the process.

KEYWORDS: Pineapple, Hybrid Dryer, Direct and Indirect Dryer, Efficiency.

INTRODUCCIÓN

Existen en la literatura especializada un sin fin de trabajos relacionados con el secado solar (Ekechukwu and Norton, 1999; Sodha and Ram, 1993; y Fudholi et al., 2010) donde se muestra la bondad de utilizar esta fuente de energía renovable y gratuita, aunque con el inconveniente de que se trata de una fuente de energía no concentrada e intermitente para un lugar determinado.

Tratando de salvar este escollo, hay también trabajos relacionados con los secadores solares híbridos donde se utiliza otra fuente de energía convencional o diferente a la radiación solar (biomasa, energía eléctrica, gas LP) con la intención de mejorar el proceso de secado, haciendo que este sea continuo y se pueda llevar a cabo incluso durante las noches y días nublados, ya sea para completar un proceso que se inició con pura energía solar o para realizar una prueba de secado de manera independiente de la radiación solar. Gudiño (2012) reporta algunos casos donde se estudian este tipo de secadores solares híbridos, y donde también se comenta sobre la existencia de empresas mexicanas que se dedican a comerciar este tipo de secadores que utilizan gas LP como fuente auxiliar de energía.

También cabe mencionar que el presente trabajo es continuación de estudios anteriores presentados en los congresos pasados recientes. Primeramente se presentó un estudio teórico-práctico del funcionamiento térmico del colector solar utilizado en un primer diseño de un secador solar híbrido (Gudiño, 2012). En este estudio se muestran curvas características de eficiencias instantáneas del colector, teóricas y experimentales, reportando una buena concordancia entre ellas. Aquí el suministro de energía provino de agua caliente obtenida de la quema de gas LP en un boiler comercial, mientras que la energía suministrada para obtener diferentes temperaturas de entrada de aire al colector y completar la curva característica de funcionamiento del colector se hizo mediante el uso de resistencias eléctricas.

Posteriormente se presentó otro trabajo sobre el estudio de este mismo secador solar híbrido durante el proceso de secado de piña (Gudiño y Calderón, 2013). En este trabajo se hicieron comparaciones entre estudiar el secador en modo híbrido (con Sol y gas) y en modo puramente solar, y se encontró que los tiempos de secado para llegar a un mismo contenido de humedad son en promedio 31 % menores (2 horas menos) cuando el secador operó en modo híbrido, pero que las eficiencias de evaporación tienen un comportamiento inverso dado que cuando el secador operó en modo solar fue en promedio casi el doble de eficiente ($\eta_{evap} = 23.4$ % modo solar vs $\eta_{evap} = 13.4$ % modo híbrido) respecto a cuándo el secador operó en modo híbrido. Aparentemente mucho del calor aportado por el agua caliente, obtenida por la quema de gas LP, se pierde al medio ambiente y realmente no se aprovecha en el proceso de secado. También se encontró que el proceso de secado se mantiene prácticamente homogéneo en todo el secador.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue diseñar, construir y estudiar de manera comparativa un nuevo secador solar híbrido basado en los resultados mencionados en el párrafo anterior, principalmente con la intención de aprovechar mejor la energía proporcionada por la fuente auxiliar de energía (gas LP) y mejorar su funcionamiento térmico al incrementar su eficiencia de evaporación.

MÉTODOS Y MATERIALES

Se diseñaron y construyeron dos secadores solares tipo charola híbridos en base a un diseño anterior (Gudiño y Calderón, 2013). Los secadores son idénticos para facilitar la

realización de diversas pruebas comparativas al trabajarlos al mismo tiempo (con condiciones ambientales iguales), pero con algunas variantes en cuanto a lo que se quiere comparar y estudiar.

En total se realizaron 7 pruebas comparativas en estos secadores para estudiar su funcionamiento térmico durante el proceso de secado de piña: 2 para ver el efecto de utilizar disipadores de calor (*C/D*) o no utilizarlos (*S/D*) y donde sólo se usó una capa de producto a secar, 3 para comparar el modo de recepción de radiación solar: directo (*Dir*) e indirecto (*Ind*), y 2 para ver la diferencia de operar los secadores en modo híbrido (*H_i*) y en modo solar (*S_o*). En los dos últimos casos siempre se utilizó una doble capa de producto a secar. Los secadores se identificaron como *Secador A* y *Secador B*. Las pruebas se realizaron en el área solar de ITESO, ubicado en Tlaquepaque, Jalisco, México, durante la primavera de 2014 (del 10 de abril al 4 de junio).

Características de los secadores y materia prima a secar

Los secadores son tipo integrado con la cámara de secado y el colector solar integrados en una misma unidad. Las dimensiones de las charola de cada secador son 0.61x1.22x0.095 m, con capacidad para contener 4 bandejas (en 2 niveles) hechas con un marco de aluminio y malla de polipropileno, de 0.5x0.6 m donde se pone el producto a secar. Cuenta además con un serpentín de cobre flexible (12.7 mm de diámetro) en la parte exterior del fondo de dicha charola, por donde fluye agua caliente (80°C) en un circuito cerrado y en contracorriente con el flujo de aire, a razón de 3 LPM. El agua se calienta por medio de un boiler comercial doméstico que utiliza gas LP y que cuenta con un control automático de temperatura.

Los secadores operaron siempre con una inclinación de 23° al sur para propiciar el efecto de la convección natural del aire en el interior de cada secador y con aperturas de entrada y salida iguales a un medio ($Ap_e = Ap_s = 1/2$). La apertura indica la fracción de altura libre respecto de la altura total del secador, que en este caso es igual a 0.095 m.

Estos secadores nuevos (actuales) cuentan con algunas modificaciones importantes respecto al diseño anterior en lo que se refiere a su capacidad de secado y forma de operación, con la intención de mejorar su funcionamiento, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Características de los Secadores Solares Híbridos de Diseño Anterior y Actual.

Característica	Diseño anterior	Diseño actual
Largo de secador (m)	1.68	1.22
Altura de secador (m)	0.055	0.095
Capacidad de bandejas	3	4
Niveles o capas de producto a secar	Simple	Doble
Posición de serpentín	Fondo interior	Fondo exterior
Dirección de disipadores	A lo ancho	A lo largo
Área de pre-calentamiento (m ²)	0.0885 (0.145 m largo)	0.1037 (0.17 m largo)
Modo de recepción de radiación solar	Directo	Directo e indirecto
Tipo de cubierta	Plástico PVC	Vidrio

Como se observa, las principales consisten en que el secador actual es menos largo (1.20

vs 1.68 m) pero con más área de precalentamiento ($A_{prec} = 0.104 \text{ m}^2$, actual vs 0.089 m^2 , anterior), cuenta con una doble capa de producto a secar y puede operar en modo de recepción de radiación solar directo e indirecto. El indirecto cuenta con una placa absorbidora pintada de negro que no permite que la radiación solar incida directamente sobre el producto a secar. Dicha placa absorbidora se encuentra por debajo de la cubierta de vidrio y justo por encima de la segunda capa de producto a secar.

La piña utilizada fue variedad miel, con aproximadamente un cuarto de grado de madurez y obtenida en los mercados locales. El espesor de la rebanada utilizada fue de 0.005 m y la densidad de carga de 2.83 kg de piña/ m^2 de área de bandeja.

Procedimiento

En cada prueba realizada, primero se procedió a pelar y rebanar la piña en medias rebanadas. Inmediatamente después se fue cargando en cada una de las 4 bandejas con que cuenta cada secador hasta completar un total de 0.850 kg/bandeja . Enseguida se cargaron los secadores y se inició el proceso de secado. Todas las pruebas se iniciaron entre las 9 y 10 horas, captando una cantidad de radiación solar importante en cada día.

El control de pérdida de humedad en la piña para ir sabiendo el contenido de humedad a lo largo del proceso y determinar la finalización del proceso de secado se realizó de dos formas: midiendo el cambio de masa a la entrada y salida del secador mediante unas pequeñas charolitas muestreadoras donde se pesó y colocó una muestra piloto del producto a secar (0.151 kg) de manera proporcional al área de las charolitas, y mediante el análisis directo de contenido de humedad practicado a pequeñas muestras que fueron retiradas de la entrada y salida de los secadores.

En el último caso las muestras se tomaron de diferentes partes de la entrada y salida del secador, en posiciones donde aparentemente el producto dura más en secar, para de esta forma cerciorarse que el análisis es representativo y asegurar que todo el producto se secó. Al final del proceso se realizó un análisis a muestras de todas las bandejas para ver si los contenidos de humedad fueron similares en todo el secador y tomar como valor final de contenido de humedad (M_f) un promedio de estos análisis, que son más representativos del contenido final de humedad en que se quedó. Se intentó siempre llegar a un contenido de humedad de 0.24 en base húmeda (0.191 en base seca), pero en algunas pruebas esto se ignoró debido a que se querían evaluar otros aspectos donde no era necesario llegar hasta el contenido de humedad indicado.

A lo largo de cada corrida y a intervalos de 0.5 horas, se estuvieron midiendo y registrando datos de tiempo de secado, radiación solar (instantánea e integrada), flujo de agua de calentamiento y temperatura actual del control automático de temperatura que controlaba la temperatura del agua de calentamiento. Otras variables como humedad relativa y temperatura del aire ambiente, humedad relativa y temperatura de entrada del aire a la salida de los secadores, temperatura de la piña a la entrada y salida de cada secador y velocidad del viento, se estuvieron midiendo y registrando de manera continua con adquisidores de datos apropiados. Cuando el secador operó en modo híbrido, el suministro de agua caliente se inició a las $11:00$ horas con el flujo mencionado de 3 LPM .

Equipos e instrumentos de medición

Los instrumentos de medición utilizados fueron los siguientes: balanza analítica marca Mettler Toledo, modelo PG-S, para medir la masa de las muestras, analizador de humedad

electrónico marca A&D, modelo MF-50, para medir el contenido de humedad, procesador de vegetales marca Tor-Rey para el rebanado de la piña, piranómetro marca Kipp And Zonen, modelo C3, para medir la radiación solar con la misma inclinación del secador. Otros equipos que conforman el sistema y que permiten el estudio del secador son: bomba recirculadora de agua caliente marca Bell and Gossett, modelo NRF-22, boiler doméstico marca Kalotron, modelo KART09, con válvula solenoide para controlar el flujo de gas al quemador, control automático de temperatura marca FY400 para regular temperatura en boiler, rotámetros de polisulfona marca Blue and Wite de 0.5 a 5 LPM, termopares tipo T calibrados, registradores USB-TC de 8 canales marca Measurement Computing que envían la señal directamente a una PC donde se almacena la información para su posterior procesamiento, termo-higrómetros digitales USB-500 para medir temperatura y humedad relativa del aire, y diversas válvulas y conexiones para regular el flujo de agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se logró construir los secadores solares híbridos (ver fig.1) que era uno de los objetivos del presente trabajo, teniendo así el equipo necesario para poder hacer las comparaciones mencionadas anteriormente.



Fig.1. Secadores Construidos e Instalados, Durante el Proceso de Secado de Piña.

Los principales resultados obtenidos de las 7 pruebas realizadas se muestran en las tablas 2 y 3, donde se especifica la fecha o número de prueba, y el tipo de comparación que se llevó a cabo. La tabla 2 muestra datos del promedio del contenido de humedad inicial base húmeda (M_o), promedio de contenido de humedad final base húmeda (M_f), velocidad promedio del viento (v) durante el período de prueba, temperatura promedio de la piña (T_p), y tiempo total de secado (t). mientras que la tabla 3 muestra la masa de agua evaporada (m_{evap}) obtenida de la diferencia entre la masa inicial y masa final de piña, masa de gas consumido cuando se operó en modo híbrido (m_{gas}), energía aportada por el gas (E_{gas}) obtenida de multiplicar la masa de gas por su poder calorífico (49948.5 kJ/kg), insolación recibida durante el período de prueba (H_t) de cada secador, energía solar aportada (E_{solar}) a cada secador en función de cada tiempo de secado, obtenida de multiplicar la insolación por el área del colector, y la eficiencia de evaporación (η_{evap}).

Tabla 2. Resultados Obtenidos de la Medición de Diversas Variables del Proceso de Secado.

Fecha (2014)	Comparación (secador)	M_o (%)	M_f (%)	v (m/s)	T_p (°C)	t (h)
10 Abr	<i>S/D (A)</i>	85.0	12.9	0.6	-	6.4
	<i>C/D (B)</i>		13.8		-	6.4
24 Abr	<i>S/D (A)</i>	81.3	12.3	2.9	43.3	6.2
	<i>C/D (B)</i>		12.5		44.6	6.2
02 May	<i>Ind (A)</i>	81.5	37.6	4.8	37.8	5.0
	<i>Dir (B)</i>		46.2		41.4	5.0
13 May	<i>Ind (B)</i>	83.2	13.7	2.5	44.7	10.0
	<i>Dir (A)</i>		13.4		47.8	8.5
15 May	<i>Ind (A)</i>	83.4	14.2	2.0	38.3	9.2
	<i>Dir (B)</i>		12.0		42.3	8.2
21-22 May	$H_i(A)$	84.4	35.2	2.7	38.7	7.5
	$S_o(B)$		17.0	1.6	38.6	15.0
3-4 Jun	$H_i(A)$	81.8	12.7	2.4	41.9	8.8
	$S_o(B)$		12.8	1.9	39.6	15.5

Tabla 3. Eficiencias de Evaporación Obtenidas en Cada Secador.

Prueba	Comparación	m_{gas} (kg)	E_{gas} (kJ)	H_t (kJ/m ²)	E_{solar} (kJ)	$m_{evan.}$ K(g)	n_{evan} (%)
1	<i>S/D (A)</i>	0.335	16732	5602	14520	1.43	10.9
	<i>C/D (B)</i>	0.335	16732	5602	14520	1.42	10.8
2	<i>S/D (A)</i>	0.368	18381	5205	13491	1.40	10.5
	<i>C/D (B)</i>	0.368	18381	5205	13491	1.38	10.5
3	<i>Ind (A)</i>	0.610	30468	3971	10636	2.53	14.7
	<i>Dir (B)</i>	0.610	30468	3971	10636	2.66	15.4
4	<i>Ind (B)</i>	0.773	38610	6606	17694	2.85	12.0
	<i>Dir (A)</i>	0.571	28521	6366	17051	2.89	15.1
5	<i>Ind (A)</i>	0.663	33116	6437	17241	2.75	13.0
	<i>Dir (B)</i>	0.533	26623	6151	16475	2.77	15.3
6	$H_i(A)$	0.745	37212	4682	12540	2.65	12.7
	$S_o(B)$	0	0	8171	21885	2.81	30.6
7	$H_i(A)$	0.895	44704	5384	14421	2.75	11.1
	$S_o(B)$	0	0	8813	23605	2.80	28.3

Efecto del uso de los disipadores de calor

En estas pruebas (1 y 2) se utilizó sólo una capa de producto a secar, se operó en modo híbrido y el secador que utilizó los disipadores de calor fue el *secador B*. Como se puede observar de las tablas 2 y 3 las eficiencias de evaporación y tiempos de secado de ambos secadores son básicamente los mismos, lo que indica que los disipadores de calor no parecen tener un efecto significativo sobre el proceso de secado, aunque haría falta hacer más pruebas al respecto.

En la fig.2 se presentan curvas de secado de la prueba 2 donde se puede observar que las

curvas de secado, tanto a la entrada como a salida, son prácticamente iguales en ambos secadores. Esto significa que el proceso de secado fue homogéneo, lo que sin duda es una ventaja importante para este tipo de secadores, ya que difícilmente se logra en otros equipos; además de ser congruente con todos los trabajos anteriores donde se destaca esta característica o ventaja de la línea de secadores solares tipo charola aquí desarrollados, y que también se corrobora en las demás pruebas realizadas en el presente estudio.

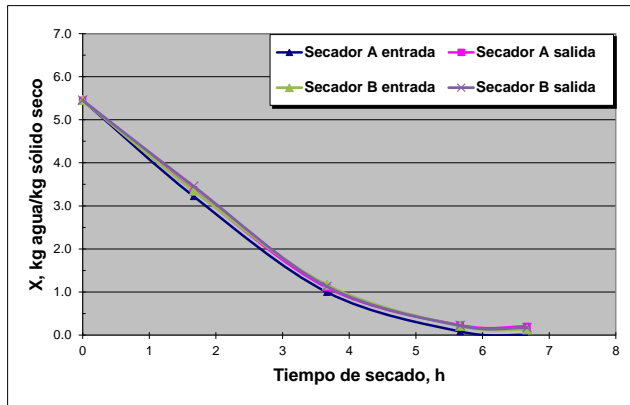


Fig.2. Curvas de Secado Para la Prueba 2- *Secador A, S/D; Secador B, C/D.*

Efecto del modo de recepción de radiación solar: directo e indirecto

Las pruebas involucradas en esta parte son la **3**, **4** y **5**, donde ambos secadores utilizaron dos capas de producto a secar y operaron en modo híbrido. Como se puede observar, las eficiencias de evaporación promedio son un poco mayores cuando el *secador* operó en modo directo (15.3%) que cuando operó en modo indirecto (13.2%).

Es importante mencionar que la eficiencia de estos secadores operados en modo de recepción directa (15.3%, promedio de 3 pruebas) son superiores a las obtenidas en estudios anteriores (Gudiño y Calderón, 2013), donde las condiciones de prueba fueron similares a las aquí mencionadas y se utilizó sólo una capa de producto a secar (11.5%, promedio de 6 pruebas). Aunque hubo una mejora en cuanto a la eficiencia de este nuevo diseño de secador comparado con el diseño anterior, se observa que aún hace falta mejorar más, dado que se esperaba una diferencia de eficiencias mayor a favor del nuevo diseño.

También se puede observar de la tabla 2 que el secador solar indirecto requiere un poco más de tiempo (1.0 - 1.5 horas) para completar el proceso de secado, aunque dichos tiempos no son tan grandes (entre 8 y 10 horas) aún cuando se está doblando la capacidad del secador por usar una doble capa de producto a secar, y que el proceso se puede terminar en un sólo día. Esto sin duda es una ventaja importante para este nuevo diseño de secador, aunque hay que seguirlo mejorando.

Comparación entre modo solar y modo híbrido

Las pruebas involucradas en esta parte son la **6** y **7**, donde el *secador A* operó en modo híbrido y el *secador B* en modo solar. Los resultados mostrados en la parte final de las

tablas 2 y 3 indican que el tiempo promedio total de secado del secador operado en modo solar es casi el doble del tiempo del operado en modo híbrido (15.3 h vs 8.2 h.), y que requiere de 2 días Sol para terminar el proceso de secado.

Por su parte, las eficiencias tiene un comportamiento contrario, dado que en este caso el secador en modo solar tiene eficiencias promedio de más del doble que las obtenida con el secador en modo híbrido (29.5% vs 11.9%, respectivamente). Así, se puede decir que el uso del secador híbrido tiene ventaja en cuanto a la rapidez de obtener un producto seco aunque ésta no se vea reflejada en la eficiencia de evaporación del secador, mostrando que aún hay cosas por mejorar en este aspecto.

CONCLUSIONES

El efecto del uso de disipadores de calor (pruebas **1** y **2**) donde se utilizó una sola capa de producto a secar no tuvo efecto significativo en el proceso de secado, dado que ambos secadores tuvieron un comportamiento igual. Hace falta hacer pruebas.

De las pruebas realizadas con una doble capa de producto a secar (pruebas **3-5**) donde se estudió el modo de recepción de radiación solar, se encontró que el tiempo de secado fue menor en el directo (entre 1 y 1.5 horas) que en el indirecto; y que las eficiencias promedio de evaporación para el secador directo son ligeramente superiores a las del secador indirecto (15.3 vs 13.2 %, respectivamente). Estas eficiencias del secador directo (15.3 %) son también superiores a otras encontradas en trabajos anteriores (11.5%), donde sólo se utilizó una capa de producto a secar y las condiciones de prueba fueron similares.

De la comparación realizada entre usar los secadores operando en modo solar y en modo híbrido (pruebas **6** y **7**), se encontró que en promedio las eficiencias del secador en modo solar (29.5%) son casi el triple de las encontradas en el secador híbrido (11.9%), aunque los tiempos de secado tuvieron un comportamiento inverso, siendo en promedio de 15.3 horas para el secador en modo solar y de sólo 8.2 horas para que operó en modo híbrido.

Por último se puede decir que el proceso de secado fue prácticamente homogéneo en todo el secador y que el producto obtenido fue de buena calidad, higiénico y con un sabor de piña deshidratada muy agradable.

REFERENCIAS

- Ekechukwu O. V. y Norton B. (1999). Review of Solar Energy Drying Systems II: an Overview of Solar Drying Technology. *Energy Conversion & Management* 40, 615-655.
- Fudholi A., Sopian K., Ruslan M. H., Alghoul M. A, y Sulaiman M. Y. (2010). Review of Solar Dryers for Agricultural and Marine Products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1-30.
- Gudiño, A. D. (2012). Estudio teórico-práctico de un secador híbrido Sol-gas. *CD con Memorias de la XXXVI Semana Nacional de Energía Solar*, Cuernavaca, Mor, México.
- Gudiño, A. D. y Calderón, T. A. Drying of pineapple with a new solar hybrid dryer. *Proceedings of ISES Solar World Congress*, 3-11 november 2013, Cancún, Qroo. México. In press
- Sodha, M. S. y Ram Ch. (1993). Solar Drying Systems and Their Testing Procedures: a Review. *Energy Conversion & Management*, 35(3), 219-267.