

Evaluación Térmica De Un Secador Solar Tipo Túnel Con Hibridación De Tecnologías Solares

Thermal Evaluation Of A Tunnel-Type Solar Dryer With Hybridization Of Solar Technologies

Margarita Castillo Téllez^a, Beatriz Castillo Téllez^b, Gerardo Mejía Pérez^b, Diana C. Mex Álvarez^a, Luz María Hernández Cruz^a, Julio Gutiérrez González^a.

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, C.P. 24085, Campeche, México
mcastill@uacam.mx, diancmex@uacam.mx, lmhernan@uacam.mx, jgutiea@uacam.mx

^bCentro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, C.P. 45425, Tonalá Jalisco, México
beatriz.castillo@academicos.udg.mx, gerardo.mejia@redudg.udg.mx)

Recibido: 17 de noviembre 2023. Aceptado : 14 de diciembre 2023

Resumen— Las técnicas de conservación de alimentos han permitido que los alimentos estacionales puedan consumirse durante cualquier época del año lo cual es fundamental para garantizar la seguridad alimentaria de todos los habitantes del planeta. El secado se ha utilizado durante muchos años como medio de conservación para secar una gran variedad de productos. Se construyó un secador solar tipo túnel con acoplamiento de tecnologías de calentamiento solar de agua y aire en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche, ubicada entre los paralelos 17°49' y 20°51' de latitud norte y los meridianos 89°06' y 92°27' de longitud oeste; se presentan en este trabajo los resultados de su evaluación térmica considerando temperaturas dentro de la cámara de secado y los parámetros climatológicos. Los resultados indican que se alcanzaron mayores temperaturas con el colector de aire, la segunda mejor opción resultó ser la utilización de ambas tecnologías al mismo tiempo y las temperaturas más bajas se obtuvieron con los calentadores solares de tubos evacuados, alcanzando 49 °C, 48 °C y 46 °C, respectivamente. La irradiación solar más alta medida fue de 936.5 W/m², la temperatura ambiente más elevada, 33.3 °C y la humedad relativa más baja fue de 63 %, a las 13:00 h.

Palabras clave— Cámara de secado, Parámetros climáticos, Ssecador solar, Hibridación de tecnologías solares.

Abstract— Food preservation techniques have allowed seasonal foods to be consumed at any time of the year. Drying has been used for many years as a means of preservation to dry a wide variety of products. A tunnel-type solar dryer with the coupling of solar water and air heating technologies was built in the Faculty of Engineering of the Autonomous University of Campeche, located between the parallels 17°49' and 20°51' north latitude and the meridians 89°06' and 92°27' west longitude. The results of its thermal evaluation considering temperatures within the drying chamber and the climatological parameters are presented in this work. The results indicate that higher temperatures were reached with the air collector, the second-best option turned out to be the use of both technologies at the same time, and the lowest temperatures were obtained with the solar heaters of evacuated tubes, reaching 49°C, 48 °C, and 46 °C, respectively. The highest measured solar irradiation was 936.5 W/m², the highest ambient temperature was 33.3 °C, and the lowest relative humidity was 63% at 13:00 h.

Keywords—Drying chamber, Climatic parameters, Solar dryer, Hybridization of solar technologies.

I. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas a nivel mundial, se ha comenzado a considerar la incorporación parcial y/o total de diferentes fuentes de transformación de energía solar térmica, con el fin de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, cada vez más agotados y encarecidos.

El secado de productos alimenticios requiere de alto consumo energético, por lo que es necesario que constantemente se busquen alternativas para eficientar e innovar en las tecnologías ya existentes.

El secado solar puede ser una opción viable para lograr ahorros energéticos importantes en la conservación de alimentos, además, es uno de los procesos importantes que tiene suficiente potencial para reducir las pérdidas pos-cosecha y evitar drásticamente el deterioro del producto almacenado (Fargali et al., 2008).

El secado tradicional a cielo abierto (secado natural), es muy común en las zonas rurales para secar muchos tipos de materiales agrícolas, como frutas, verduras y plantas medicinales en la mayoría de los países con incidencia solar importante durante el año (Deng et al., 2021), pero este tipo de tecnología tiene inconvenientes que no garantizan la inocuidad del producto deshidratado. La principal característica de los secadores solares es que pueden ser pasivos (convección natural) o activos (convección forzada y con acoplamiento de diferentes tecnologías solares) (Dufera et al., 2021).

Otra clasificación consiste en que pueden ser directos (la envolvente es de materiales transparentes), es decir, el producto está expuesto directamente a la radiación solar directa y el propio producto actúa como absorbente, e indirectos, cuyo funcionamiento consiste en que la superficie negra calienta el aire entrante, en lugar de calentar directamente el producto a secar. Luego, este aire caliente pasa sobre la sustancia que se va a secar y sale hacia arriba, a menudo a través de una chimenea, llevándose consigo la humedad liberada del producto (Kumar Mahara & Nema, 2017).

Dentro de la clasificación de los secadores indirectos se encuentran los tipos túnel, que generan mayor temperatura, menor humedad relativa, menor contenido de humedad del producto y menor deterioro durante el proceso de secado (Vaghela et al., 2018). Estos secadores tipo túnel pueden trabajar con hibridación de tecnologías solares, es decir, se acopla a la cámara de secado colectores solares, pudiendo adicionar celdas fotovoltaicas con la intención de hacer el

proceso totalmente autónomo (Chouicha et al., 2013) (Castillo-Téllez et al., 2017).

En el presente trabajo se diseñó, construyó y puso en operación un secador solar tipo túnel con hibridación de tecnologías solares y se caracterizó térmicamente cada una de estas tecnologías durante el proceso de secado de semilla de marañón, logrando confirmar que la tecnología más eficiente es el colector solar de aire, acoplada al secador solar y operando con un panel fotovoltaico para apoyo del extractor de aire.

La Fruta de Marañón como comúnmente le conocemos es originario del Noreste de Brasil. Se ha propagado por todas las zonas tropicales del mundo. Se cultiva en gran escala en India, Brasil y en África del Este; cultivo propio para la exportación.

Los usos que se le pueden dar a la fruta de la nuez de marañón son consumirlo ya sea crudo entero en fruta fresca, en refrescos y dulces, también se preparan jugos, jaleas, pulpas conservadas en jarabe; de la nuez se extrae lo que es el aceite mismo que tiene un gran valor comercial y medicinal entre otros.

El pseudo fruto conocido como fruto del marañón, se forma del pedúnculo o receptáculo, éste es engrosado y jugoso, de color amarillo o rojo, en el extremo se ubica el fruto verdadero, una nuez en forma de riñón, gris y dura, conocida como nuez de marañón.

El pedúnculo, que es la parte utilizable como fruta fresca, es un cuerpo en forma de pera o esférico, de 4 a 8 cm de largo, amarillo o rojo. El parénquima de color amarillo contiene un líquido azucarado y astringente además de que es rico en vitamina C.

La nuez, de 2 a 3 cm de largo, tiene un pericarpio liso y brillante y el mesocarpio tiene espacios que contienen masas de aceites o gomas. El componente principal de éstos es cardol, sustancia cáustica y venenosa que se evapora calentando las nueces.

El anacardo de la familia de las anacardiáceas crece en forma silvestre en muchos países tropicales, no sujetos a heladas, lo que indica que este cultivo es rústico. Sin embargo, cuando se trata de establecer plantaciones comerciales debe conocerse las mejores condiciones agroclimáticas para su cultivo.

En condiciones de suelo favorables, donde el sistema de raíces está bien desarrollado, se desempeñará bien bajo una precipitación total menor que en condiciones de suelo menos favorables.

Para la aplicación de las tecnologías de secado solar es fundamental el conocimiento de las propiedades de los alimentos deshidratados, con el objeto de optimizar este

proceso desde el punto de vista energético y poder garantizar la conservación de sus cualidades organolépticas y nutrimentales.

Se analizó el comportamiento de las cinéticas de deshidratación, mediante un secador solar tipo túnel. Lo anterior se verá reflejado en el diseño, instalación y puesta en marcha de un secador solar ubicado en las zonas productoras en el estado de Campeche. Los estudios propuestos se llevaron a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche.

II. ESTUDIO EXPERIMENTAL

A. Funcionamiento con carga compartida

Los equipos de medición que se utilizaron durante las pruebas en la experimentación para caracterizar el secador solar fueron los siguientes:

Se utilizaron termómetros marca MeI (exactitud ± 1.0 °C) y digitales, marca OEM (exactitud 1.0 °C), ubicados en tres puntos diferentes del secador solar: en el inicio del túnel, en medio y al final.

Durante el período de pruebas también se registraron los parámetros climatológicos mediante la estación meteorológica instalada en la Facultad de Ingeniería de la UAC. Las características (datos del fabricante) son los mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1.
Características y descripción de los instrumentos de medición de la estación meteorológica.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	MODELO	ERROR MÁXIMO
Radiación global	Piranómetro marca LI-COR	LI-200R	Azimut: $\pm 1\%$ sobre 360° a 45° de elevación
Humedad relativa	NRG Systems	RH-5X	$\pm 3\%$
Temperatura ambiente	NRG Systems	110S	$\pm 1.1^\circ\text{C}$
Dirección del viento	NRG Systems	Series #200P	$\pm 3^\circ$
Anemómetro	Windsensor	P2546C-OPR	± 0.3 m/s

Fuente: Datos del fabricante.

Como se mencionó en el apartado de la Introducción, el secador solar se caracterizó con el deshidratado de semilla de marañón, conocida también como nuez de la India. Los equipos de medición utilizados para el control del proceso de secado son los siguientes:

Determinación de humedad en fresco y seco: Con la finalidad de controlar el proceso de secado, se utilizó una termobalanza de humedad, marca Boeco modelo BMA 150, con una

precisión de $\pm 0.01\%$ mg. También se utilizó un analizador de humedad, marca Velab, con una precisión de $\pm 0.01\%$ mg.

Se cortaron las semillas de marañón y se colocó una muestra de aproximadamente 1.0 g, procediéndose a su deshidratación en la termobalanza. Este procedimiento se realizó antes y después de realizar las diferentes cinéticas de secado.

Determinación de Actividad de agua (Aw): La actividad de agua es un parámetro que determina la estabilidad de los alimentos con respecto a la humedad ambiental. Se determinó la actividad de agua para la semilla fresca y posteriormente para la seca. Se utilizó un equipo marca Rotronic Hygropalm de tipo portátil, con una precisión de $\pm 0.01\%$ mg.

Pérdida de peso (Cinética de secado): Para controlar el proceso de secado solar también se utilizó una balanza digital de alta precisión marca Boeco modelo BPS 40 plus. Se midió la pérdida de peso cada hora.

Determinación de la pérdida de peso: Se utilizó una balanza digital de alta precisión marca Boeco modelo BPS 40 plus. Se midió la pérdida de peso cada 30 minutos del día.

Estudio de Colorimetría: Para realizar las pruebas de medición de color en muestras frescas y deshidratadas se utilizó un colorímetro digital marca Huanyu, modelo SC-10, repetibilidad $\leq 0.03 \Delta E^* ab$.

B. Equipo experimental.

El principio básico común de todas las tecnologías termosolares es relativamente simple: captar la radiación solar y transferir el calor resultante generalmente a un fluido (por ejemplo, el agua o aire).

El secador solar tipo túnel es práctico para secar todo tipo de alimentos, especialmente aquellos alimentos que necesiten mantener un buen color y proteger sus propiedades naturales, consiste en un túnel horizontal elevado con una base rígida de hierro, está construido de lámina de galvanizado, cubierto de pintura negra para protegerlo de la corrosión.

El secador solar está constituido por un túnel o cámara de secado, un sistema de calentamiento solar de aire, calentamiento solar de agua, un moto-ventilador para inducir el aire a través del túnel, un variador de voltaje para obtener diferentes velocidades del aire, dentro un dominio establecido entre 1.5 m/s y 10 m/s, soporte para mantener inclinación adecuada del captador, así como ductos de entrada y salida de aire y un sistema de paneles fotovoltaicos para soporte del movimiento de bombas de agua ventiladores

El túnel está dividido en tres cámaras de secado sin división entre cada una de ellas, esta cámara de secado consiste en un túnel rectangular colocado horizontalmente, con una longitud total de 2 m y con una sección transversal de 0.30 m^2 . En cada sección se encuentran 4 charolas a diferentes niveles para

contener el producto a secar. Se acopló un colector solar plano de aire y un calentador solar de agua al túnel.

El colector solar de aire es el elemento más importante de todo sistema para el uso directo de la energía solar, el cual transforma la radiación solar en energía para calentar el aire, tiene como función extraer el aire ambiente e impulsarlo hacia su interior y calentar el aire que luego será impulsado por medio de un extractor de aire hacia el interior de la cámara de secado.

En cuanto al colector de tubos evacuados, su función es calentar el agua del termotanque la cual circulará por un intercambiador de calor y con ayuda de un extractor impulsará aire caliente que posteriormente será utilizado para el secado de los productos en las charolas que contienen el producto a secar, ubicadas dentro de la cámara de secado.

Los colectores de tubos evacuados utilizan el vacío como aislante para proteger el absorbedor del medio ambiente. Los colectores de tubos evacuados de vidrio doble consisten en dos tubos con un vacío entre ambos; los colectores de tubos evacuados de vidrio simple de un solo tubo. En los colectores de flujo directo, el líquido de transferencia térmica fluye directamente a través del tubo.

El aire circula en forma horizontal a través de todo el túnel, ingresa por un extremo y sale por medio de una chimenea que está situada en el extremo contrario del secador.

En la Fig. 1 se puede observar las conexiones y tuberías así como todos los componentes del túnel de secado.

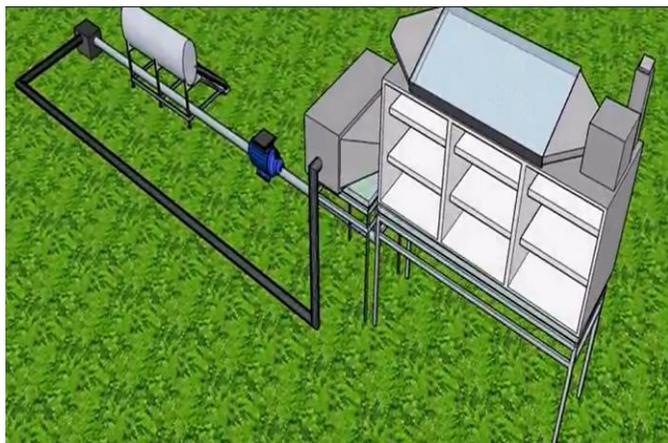


Fig. 1. Componentes del secador solar tipo túnel. Diseño de autor.

El secador solar tipo túnel alcanza temperaturas de 50 °C a 55 °C dentro la cámara de secado con irradiancias máximas de 1000 W/m². En la Fig. 2, se muestra el secador solar en operación.



Fig. 2. Secador solar tipo túnel con hibridación de tecnologías solares en operación.

C. Características generales de operación del secador solar.

El secador solar está diseñado para operar durante el día y la noche, sin necesidad de cuidar el producto de contaminantes externos tales como bacterias que pueda contener el aire ambiente, así como también preservar su color ya que es un sistema cerrado.

El flujo másico de aire del colector solar plano se puede regular con el extractor de aire que tiene implementado el secador solar tipo túnel, es posible regular el flujo de aire de acuerdo a las necesidades del proceso de secado; en cuanto a los colectores de tubos evacuados se emplea una pequeña bomba para recircular el agua y se enciende un segundo extractor de aire para que impulse el aire caliente del intercambiador de calor y posteriormente lo ingrese a la cámara de secado, ambos sistemas pueden trabajar en conjunto o de manera individual, eso dependerá del producto a secar y el clima. En la Fig. 3 se puede observar la ubicación del colector solar de aire en el secador solar tipo túnel.



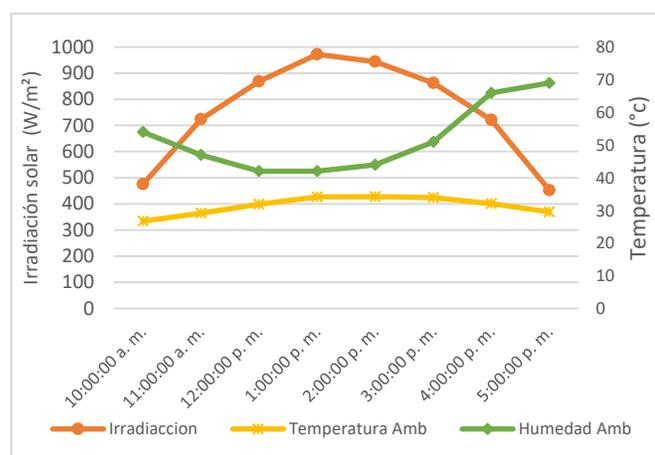
Fig. 3. Ubicación del colector solar de aire. Diseño de autor.

Es importante mencionar que el secador construido y puesto en operación fue fundamental para llevar a cabo el dimensionamiento de un prototipo experimental a mayor escala, mismo que a su vez, apoyará para proporcionar las bases para la construcción de una Planta industrial para el secado de productos marinos con hibridación de tecnologías solares y contemplando energía convencional de respaldo, a instalarse en una comunidad de pescadores en el Estado de Campeche, Campeche, México.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

A. Variables climatológicas.

Durante el período de pruebas se registraron los parámetros climatológicos en la estación meteorológica instalada en la



Facultad de Ingeniería de la UAC. Las características (datos del fabricante) son los mostrados en la Tabla 2. En la Fig. 4, se muestra una imagen de la estación meteorológica.

En la Fig. 5, se puede observar el comportamiento climático de un día soleado representativo durante el periodo de pruebas. La irradiación máxima registrada fue de 972 W/m² a las 13:00 h, la humedad relativa a esta hora fue de 42 % y la temperatura ambiente máxima en los días de prueba fue de 34.1 °C.

Tabla 2.

Características de los equipos de medición de la estación meteorológica.

Variable	Descripción	Modelo	Error Máximo
Radiación global	Piranómetro marca LI-COR	LI-200R	Azimet: < ± 1% sobre 360° a 45° de elevación
Humedad relativa	NRG Systems	RH-5X	± 3%
Temperatura Ambiente	NRG Systems	110S	± 1.1 °C
Dirección del viento	NRG Systems	Series #200P	± 3°
Anemómetro	Windsensor	P2546C-OPR	± 0.3 m/s

Fuente: Datos del fabricante.



Figura 4. Estación meteorológica instalada en la facultad de ingeniería

Fig. 5. Irradiación solar, temperatura ambiente y humedad relativa en un día de prueba tomado como referencia.

B. Colector solar de aire.

Se llevaron a cabo diferentes pruebas operando el secador de túnel únicamente con el colector solar de aire, variando la velocidad del aire con la finalidad de encontrar la velocidad de secado óptima, se presenta en la Fig. 6, la gráfica en la que se alcanzaron mayores temperaturas con una velocidad de 2.5 m/s.

Se puede observar que las temperaturas en la entrada del túnel de secado, en medio y al final son muy similares y permanecieron constantes, además, siguen la campana de la irradiación solar, la temperatura máxima obtenida fue de 50 °C a la 1:00 pm, estas temperaturas son apropiadas y las esperadas para obtener un proceso de secado eficiente (Devan et al., 2020).

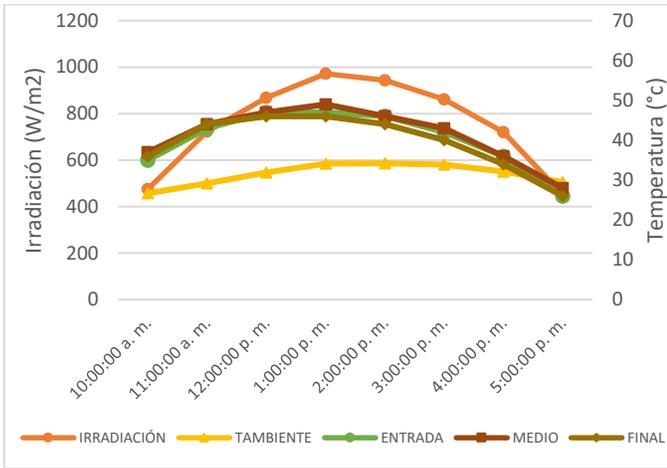


Fig. 6. Temperaturas en el colector solar de aire respecto a la irradiación solar.

C. Colector solar de tubos evacuados.

En la Fig. 7 se pueden analizar las temperaturas alcanzadas en el túnel de secado operando con el calentador solar de tubos evacuados.

Fig.7. Comportamiento térmico dentro la cámara de secado con tubos evacuados respecto a la irradiación solar y temperatura ambiente.

Se puede apreciar en la Fig. 7 que las temperaturas interiores dentro del secador son muy similares y uniformes a lo largo del túnel de secado, a la 1:00 pm aumenta la temperatura dentro del secador y posteriormente disminuye lento y de manera gradual, en todos los puntos donde se ubicaron sensores de temperatura estas permanecieron muy semejantes durante las pruebas, la más alta temperatura promedio medida en el túnel con esta tecnología fue de 43 °C en promedio, esta temperatura es adecuada para secar principalmente hierbas aromáticas (Castillo Téllez et al., 2018).

Se muestra en la Fig. 8, las temperaturas del agua alcanzadas en el colector solar de tubos evacuados durante los días de prueba.

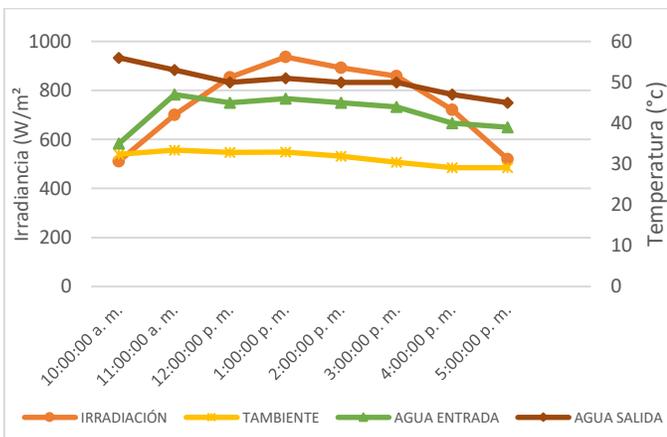


Fig. 8. Temperatura alcanzada por el agua en los colectores de tubos evacuados, comparando la irradiación solar y la temperatura ambiente.

Se puede observar en la Fig. 8 que las temperaturas de entrada y salida del colector permanecen prácticamente constantes a lo largo del día. La temperatura más elevada tanto en la salida del termotanque como en la entrada al túnel de secado fue de 51 °C y 46 °C, respectivamente. Ambas temperaturas de entrada y salida del colector solar de tubos evacuados permanecen muy por arriba de la temperatura ambiente.

D. Colector solar de aire y Colector solar de tubos evacuados

En la Fig. 9, se pueden observar las temperaturas alcanzadas en el secador de túnel, trabajando con ambas tecnologías al mismo tiempo, es decir, tanto con el colector de agua como el colector de aire. Al analizar esta gráfica se puede ver que, al igual que en los casos anteriores, se logra que la temperatura sea uniforme en toda la cámara de secado, la temperatura máxima alcanzada en este modo de operación es de 47 °C, con una irradiancia máxima de 952.3 W/m² y temperatura ambiente máxima de 35.7 °C.

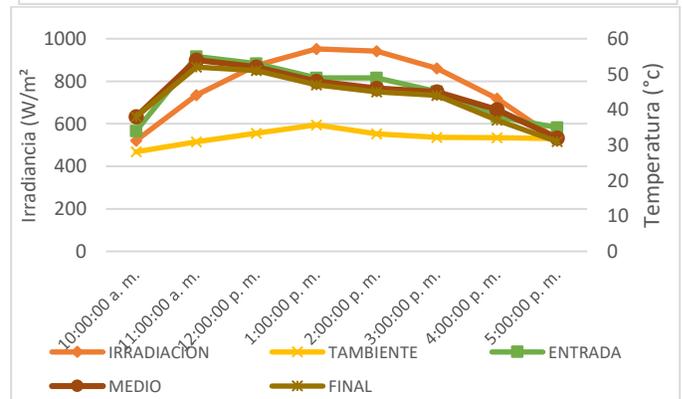
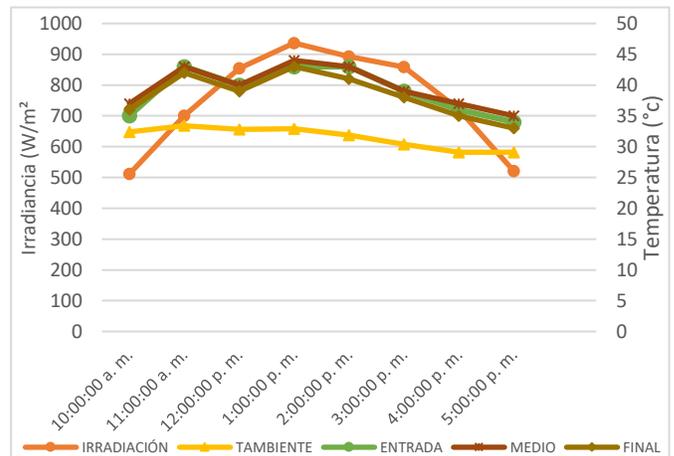


Fig. 9. Comparativo de las temperaturas alcanzadas en la cámara de secado trabajando con tubos evacuados y calentador de aire al mismo tiempo, con respecto a la irradiancia solar recibida.

E. Secado de semilla de marañón.

La Fig. 10 muestra el comportamiento del contenido de humedad en base seca para dos velocidades de aire diferentes (1.5 m/s y 2.5 m/s), con tiempos de secado de 1270 minutos y 1060 minutos para 55 °C, respectivamente, trabajando con el secador solar utilizando ambas tecnologías solares (tubos evacuados y colector solar de aire), misma que resultó la mejor opción ya que se alcanzó mediante esta tecnología la más alta temperatura en el secador solar de túnel.

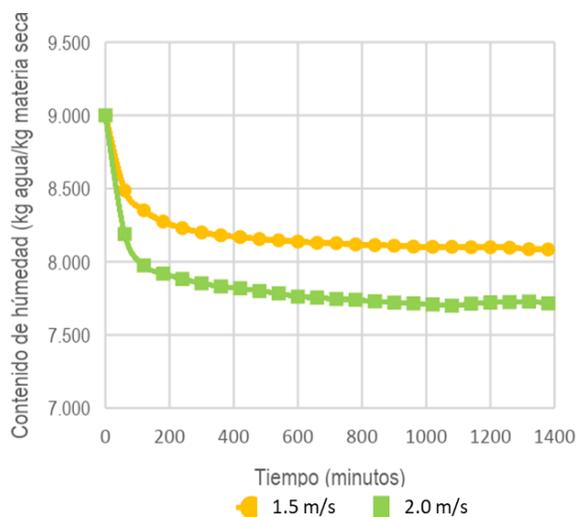


Fig. 10. Variación del contenido de humedad respecto al tiempo de secado en 2 diferentes velocidades de aire.

IV. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Como se logró observar en las gráficas mostradas en los tres modos de operación analizados en el secador tipo túnel, las temperaturas alcanzadas dentro de la cámara de secado se comportan de manera distinta, estas temperaturas que se alcanzaron son adecuadas para el secado solar de alimentos, de acuerdo con el producto a secar según nos convenga.

Las temperaturas máximas alcanzadas dentro el secador solar tipo túnel fueron de 52 °C y mínimas de 43 °C en intervalos de tiempo de las 12:00 pm a 1:00 pm, horario en el que se presentó la máxima irradiación solar en los días de prueba.

En cuanto al secado de semilla de marañón, se logró confirmar que se obtuvieron mejores resultados con el secador solar operando a 2 m/s que a 1.5 m/s y utilizando tanto el calentador solar de tubos evacuados como los colectores solares planos al mismo tiempo, sin embargo, los resultados son muy semejantes en ambos casos.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que es factible el deshidratado de alimentos mediante el secador solar tipo túnel con acoplamiento de colectores solares, siendo posible el secado de productos alimenticios incluso durante la

noche, obteniendo una ventaja considerable sobre el secado convencional en hornos eléctricos o de gas debido a que se logra alcanzar un ahorro energético importante con poca inversión y mínimo mantenimiento, obteniendo un producto deshidratado de calidad, contribuyendo además al cuidado del medio ambiente.

5. Referencia

- Castillo Téllez, M., Pilatowsky Figueroa, I., Castillo Téllez, B., López Vidaña, E. C., & López Ortiz, A. (2018). Solar drying of Stevia (*Rebaudiana Bertoni*) leaves using direct and indirect technologies. *Solar Energy*, 159, 898–907. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.031>
- Castillo-Téllez, M., Pilatowsky-Figueroa, I., López-Vidiana, E. C., Sarracino-Martínez, O., & Hernández-Galvez, G. (2017). Dehydration of the red chilli (*Capsicum annum* L., costeño) using an indirect-type forced convection solar dryer. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1137–1144. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.114>
- Chouicha, S., Boubekri, A., Mennouche, D., & Berrbeuh, M. H. (2013). Solar drying of sliced potatoes: an experimental investigation. *Energy Procedia*, 36, 1276–1285. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.144>
- Deng, Z., Li, M., Xing, T., Zhang, J., Wang, Y., & Zhang, Y. (2021). Literature research on the drying quality of agricultural products with using solar drying technologies. *Solar Energy*, 229, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.041>
- Dufera, L. T., Hofacker, W., Esper, A., & Hensel, O. (2021). Physicochemical quality of twin layer solar tunnel dried tomato slices. *Heliyon*, 7(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07127>
- Fargali, H. M., Nafeh, A. E. S. A., Fahmy, F. H., & Hassan, M. A. (2008). Medicinal herb drying using a photovoltaic array and a solar thermal system. *Solar Energy*, 82(12), 1154–1160. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.016>
- Kumar Mahara, N., & Nema, P. (2017). Review on Solar Energy Dryer for Drying the Agricultural Products. *IJSRD-International Journal for Scientific Research & Development*, 5(08), 2321–0613. www.ijrsrd.com
- Vaghela, D., Bhautik, G., Sengar, S. H., & In, & S. (2018). Comparative Study of Solar Tunnel and Open Sun Drying for Moringa Oleifera Leaves. 7(2), 472–476. www.ijset.net