



Imagen de: macrovector. La portada ha sido diseñada usando imágenes de Freepik.com

Captadores solares de placa plana para el secado solar indirecto de alimentos: características y aplicaciones

Flat plate solar collectors for indirect type solar food drying: characteristics, and applications

Eduardo Figueroa-García^{1,2*}, Arturo Moisés Chávez-Rodríguez¹

RESUMEN

La industria alimentaria utiliza hasta el 15 % del total de la energía eléctrica que demanda el sector industrial, principalmente en procesos de secado. Esto suscita la búsqueda de nuevas alternativas de secado que reduzcan el uso de energía eléctrica. Una opción es el secado solar, principalmente, el de tipo indirecto, a través de captadores solares de placa plana (CSPP). El objetivo de este trabajo fue analizar los recientes desarrollos de los CSPP, características, ventajas, desventajas, eficiencia y diversas tecnologías utilizadas en conjunto, para aumentar la eficiencia térmica en el secado solar. Los CSPP han desarrollado, a través de la hibridación con la utilización de otras fuentes de energía (eléctrica, biomasa, solar), un incremento en su eficiencia que los vuelve cada vez más viables para ser utilizados en procesos comerciales de secado de alimentos.

PALABRAS CLAVE: energía solar, secado solar, captador solar de placa plana, captador solar de placa plana híbrido.

ABSTRACT

The food industry uses up to 15 % of the total electrical energy demanded by the industrial sector, mainly in drying processes. This motivates the search for new drying alternatives that reduce the use of electrical energy. One option is solar drying; mainly indirect type solar drying, that uses flat plate solar collectors (FPSC). The objective of this work was to analyze the recent developments of the FPSC, their characteristics, advantages, disadvantages, efficiency, and the range of technologies used in conjunction with the FPSC to increase their thermal efficiency for solar drying. The FPSC have developed through hybridization with the use of other energy sources (electricity, biomass, solar), an increase in their efficiency, that increasingly turns them into viable options for food drying processes.

KEYWORDS: solar energy, solar drying, flat plate solar collector, hybrid flat plate solar collector.

*Correspondencia: eduardo.figueroa@cocula.tecmm.edu.mx/Fecha de recepción: 12 de abril de 2021/Fecha de aceptación: 16 de mayo de 2022/Fecha de publicación: 21 de julio de 2022.

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. ²Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Campus Cocula, calle Tecnológico núm. 1000, colonia Lomas de Cocula, Cocula, Jalisco, México, C. P. 48500.

INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria utiliza el secado como una de las principales técnicas de conservación. Permite eliminar el agua del producto, para evitar problemas de deterioro y proporcionarle características favorables para su consumo (Cálín-Sánchez y col., 2020). El costo de la energía eléctrica, en la actualidad, tiene constantes incrementos (Catorze y col., 2022), lo cual, influye directamente en los gastos de operación de la industria alimentaria, ya que los procesos que lleva a cabo consumen grandes cantidades de energía eléctrica (Lee, 2018). Estas empresas utilizan entre 10 % a 15 % del total de la energía que emplean todas las industrias en el mundo (Ndukwu y col., 2018). Algunas opciones energéticas, que se utilizan actualmente, son las que emplean fuentes renovables, como la solar y geotérmica, entre otras (Fudholi y Sopian, 2019). Predomina el uso de la energía solar, como energía alternativa, debido a que la tierra recibe en promedio 1 366 W/m² de radiación, de la cual es aprovechable 1 000 W/m² (Montero y col., 2015).

El secado solar de alimentos es una alternativa utilizada para reducir el costo de la energía eléctrica (Montero y col., 2015). Esta energía es aprovechada a través de sistemas de secado de tipo indirecto (TI) (Téllez y col., 2019), lo que evita la pérdida de características y compuestos de interés (azúcares, antocianinas color, entre otros), por la exposición directa al sol en los alimentos y reduce el consumo de energía no renovable, principalmente energía eléctrica. En el secado TI se utilizan captadores solares (CS) con cabinas de secado (El-Hage y col., 2018). Un inconveniente con los CS es que alcanzan bajas temperaturas y con ello eficiencia reducida, por lo que prolongan el tiempo de secado respecto a los secadores eléctricos (Sharma y col., 2017). Esto suscitó el desarrollo de CS con mayor eficiencia, por lo que en este trabajo se estudian diferentes diseños y materiales para su elaboración.

Entre los CS desarrollados actualmente se encuentran los de placa plana (CSPP) y los diseñados con materiales con cambio de fase o

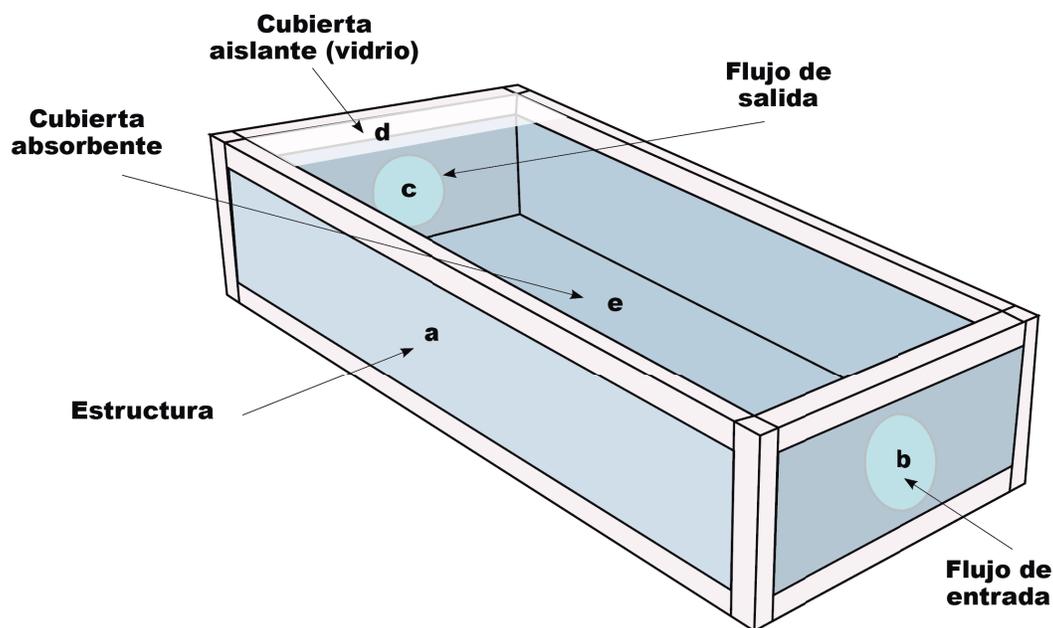
almacenamiento (CSPPMCF), con nanofluidos (CSPPN) e híbridos (CSPPH), los cuales utilizan energía solar a través de un CSPP y otra fuente de energía (eléctrica, combustión, geotérmica) (Shalaby y col., 2014; Espinoza, 2016). La tecnología desarrollada permite obtener mayores beneficios del secado solar, al ahorrar en el consumo de energía eléctrica, disminuir el tiempo de secado e incrementar su eficiencia, con lo que se logra, en algunos casos, un secado solar energéticamente eficiente, adecuado para la operación de secado continuo (Hashim y col., 2014; Bokor y col., 2019; Murali y col., 2020).

El objetivo de este trabajo fue analizar los avances en el desarrollo de captadores solares de placa plana (CSPP), principalmente los captadores solares de placa plana híbridos (CSPPH), destacando las características, ventajas, desventajas, eficiencia y tecnologías utilizadas para el secado solar de tipo indirecto.

Captador solar de placa plana

Un sistema de secado solar de TI consiste en un CS, principalmente CSPP (Figura 1) y una cabina de secado donde se mantiene el producto a deshidratar.

El CSPP convencional consiste en una caja de color oscuro, con una capa transparente, en la que entra aire a temperatura ambiente por un extremo, el cual es calentado en el interior, conducido hacia la cabina de secado y expulsado al entorno posteriormente, lo que mantiene un flujo de aire seco y caliente que se transforma en aire húmedo y de menor temperatura al interactuar con el alimento. En la cabina de secado se coloca el producto a deshidratar y se le hace pasar el flujo de aire caliente, con temperaturas que pueden variar de 30 °C a 80 °C (Fudholi y Sopian, 2019). Los CSPP tienen gran aplicabilidad en uso doméstico o industrial y se han utilizado ampliamente en todo el mundo debido a su estructura simple, operación confiable, bajo costo, rendimiento favorable, mejor calidad de los productos fotosensibles secos y mayor control de secado, comparado con el secado solar de tipo directo (SSD)



■ Figura 1. Captador solar de placa plana, a) estructura del captador solar de placa plana, b) orificio de flujo de entrada de aire, c) orificio de flujo de salida de aire, d) cubierta aislante del colector en la parte superior, e) cubierta absorbente del colector en la parte inferior.

Figure 1. Flat plate solar collector, a) flat plate solar collector structure, b) air inlet flow opening, c) air outlet flow opening, d) superior collector insulating cover, e) inferior collector absorbing cover.

(Lingayat y col., 2017). Sin embargo, las principales desventajas son la dependencia de las condiciones meteorológicas, el tiempo de utilización disponible y la ubicación geográfica (El-Hage y col., 2018).

En la Figura 2 se muestra la clasificación de los CSPP, diferenciándolos por sus principales características térmicas. Los CSPP utilizan convección natural y forzada para introducir el aire a la cámara de secado. Los de convección natural, tienen circulación del aire debido al efecto de termosifón (movimiento ascendente del aire que ocurre naturalmente cuando se calienta) y los de convección forzada utilizan un ventilador eléctrico o soplador para forzar el aire, dentro o fuera del captador; por lo tanto, es posible controlar la velocidad de secado en este tipo de equipo (Fudholi y col., 2015; Arunsandeep y col., 2018). Parikh y Agrawal (2012), en Jaipur, India, analizaron un secador de gabinete con convección natural conectado a un

CSPP, para secar rodajas de chile verde (*Capsicum annuum*) y papa (*S. tuberosum*). Compararon 2 tipos de cubierta de aislamiento (vidrio y policarbonato) en el CSPP, con el fin de incrementar el aislamiento, y por ende, la eficiencia del secador. Encontraron que la eficiencia que se tenía (9 % a 12 %) se incrementó hasta 23.7 % con vidrio como lámina de cubierta y hasta 18.5 % con lámina de policarbonato. Asimismo, reportaron que la cubierta de vidrio disminuyó el tiempo de secado, lo que se asoció al aumento de la temperatura en el secador.

Goud y col. (2019) desarrollaron un CSPP para comparar la convección forzada contra la natural, durante el secado de chile verde (*Capsicum annuum*) y okra (*Abelmoschus esculentus*). La humedad inicial fue de 8.39 kg/kg peso seco y 10.12 kg/kg peso seco, respectivamente. El flujo de aire se alimentó con ventiladores que funcionaron con paneles solares fotovoltaicos.



■ **Figura 2.** Clasificación de los captadores solares de placa plana (Modificado a partir de Fudholi y Sopian, 2019).

Figure 2. Flat plate solar collectors' classification (Modified form of Fudholi y Sopian, 2019).

taicos (PF), con una velocidad de aire constante (1.8 m/min). El sistema con convección forzada redujo la humedad del chile a 0.01 kg/kg peso seco y de la okra a 0.12 kg/kg peso seco; de tal manera que, la eficiencia del captador fue de 74.13 % y 78.30 %, respectivamente. En el sistema de convección natural se redujo la humedad del chile a 0.238 kg/kg de peso seco y el de la okra a 0.3 348 kg/kg de peso seco. La eficiencia del captador fue de 62.19 % y 68.05 %, respectivamente. Concluyeron que la convección forzada presentó mejores resultados, ya que se obtuvo menor contenido de humedad en el producto final y con ello mayor eficiencia de secado, aunque la temperatura alcanzada fue mayor al utilizar convección natural, debido a un menor recambio de aire. En otro estudio, Lingayat y col. (2017), en NIT Warangal (India), desarrollaron un CSPP de tipo indirecto para secado de banana (*Musa paradisiaca*), con una placa corrugada de cobre en el interior del CSPP para aumentar la superficie de absorción de calor solar, un área de captación de 2 m², inclinación del CSPP de 23.5° y una radiación solar promedio de 8.3 kW/m². La eficiencia térmica reportada fue de 31.50 % para el CSPP

y 22.38 % para la cabina de secado. López-Vidana y col. (2020) realizaron un secado solar de tomate (*Solanum lycopersicum*) en el municipio de Emiliano Zapata, Morelos, México, en el cual construyeron un CSPP teniendo como cubierta una placa transparente de policarbonato en modo convección natural, y encontraron una eficiencia de secado de 4.48 % y la eficiencia del CSPP para calentamiento de aire entre 52.30 % y 55.45 %.

Un CSPP con doble paso (primario y secundario), implementado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, para el secado de zanahoria y tomate, mostró que el dispositivo solar alcanzó una eficiencia de secado de 22.8 % para tomate, con una radiación de 7.23 kW/m² y una eficiencia de 37.9 % para zanahoria, con una radiación de 5.65 kW/m². La incorporación de un segundo CSPP, en el dispositivo evaluado, demostró ser una estrategia adecuada para mejorar el proceso de secado, manteniendo el sistema simple y económico, sin la necesidad de energías no renovables (Camas-Nafate y col., 2019). Tlatelapa-Becerro y col. (2020) secaron hojuelas de tejocote (*Crateagus mexicana*),

utilizando un CSPP con área de captación de 2.033 m², tiempo de secado de 5 h y humedad inicial de 79.01 % a 79.81 %. El proceso les permitió reducir la humedad por debajo del 20 %.

Los cambios de estructura, materiales y parámetros inducen mejoras significativas en la eficiencia de los CSPP. Otros desarrollos versátiles son los CSPPMCF, que permiten el almacenamiento de calor en sus materiales durante el día, para liberarlo cuando existe escasa o nula radiación. Además, se pueden utilizar por un periodo de tiempo mayor (El-Khadraoui y col., 2017). Este tipo de sistemas muestran mejores eficiencias, entre 45 % a 54 %, en comparación con el sistema convencional, debido al almacenamiento de energía calorífica. Para lograr el almacenamiento de calor se han utilizado diferentes materiales, como cera y parafina, entre otros. Estos captadores presentan una reducción de tiempo de secado y calidad aceptable en los productos (El-Khadraoui y col., 2017; El-Sebaii y Shalaby, 2017; Essalhi y col., 2017; Natarajan y col., 2017). Otro tipo de CSPP con almacenamiento son los CSPPN, que utilizan un almacenamiento auxiliar de calor a través de nanofluidos. En estos equipos se mejora la tasa de transferencia de calor desde la placa absorbente al fluido de transferencia, donde el fluido almacena el calor y de ahí se realiza la transferencia al punto final (El-Khadraoui y col., 2017; El-Sebaii y Shalaby, 2017; Abuşka y col., 2019; Borode y col., 2019; Charvát y col., 2019; Zhou y col., 2019; Simonetti y col., 2020).

Captador solar de placa plana híbrido

Un CSPPH utiliza energía solar a través de un CSPP y otra fuente de energía para generar energía térmica (eléctrica, combustión, geotérmica). Estos sistemas híbridos ofrecen versatilidad, ya que pueden operar de manera independiente (funcionar únicamente con energía solar) o híbrida (aplicar energía solar y otra fuente de energía) a conveniencia del usuario. Además, permiten tener un mejor control del proceso, mayor temperatura de secado y velocidad de secado, debido a la fuente de energía complementaria (Torres-Gallo y col., 2017; Tarigan, 2018).

Captadores solares de placa plana híbridos con sistema auxiliar de combustión

Los CSPPH por combustión están integrados por un CSPP y una fuente de energía auxiliar calorífica por combustión. Se disponen de diferentes tipos, por ejemplo, de biomasa (material lignocelulósico) o gas, para el proceso de combustión (Shreelavaniya y col., 2021). La elección del tipo de combustión depende de la disponibilidad, recursos económicos y calidad deseada en los productos. Los CSPPH solar-biomasa presentan temperatura del aire en promedio de 42 °C y una eficiencia del 42.2 %, mayor que en el SSD, en parámetros meteorológicos similares (Abubakar y col., 2018). Un CSPPH solar-biomasa desarrollado en la región de Ashanti, Ghana, en África, para secado de semilla de maíz (*Zea mays*), fue comparado con un sistema de SSD y un secador a escala laboratorio, en un periodo de prueba de 7 h. Se obtuvieron temperaturas promedio para cada sistema de secado de 52.3 °C, 41.4 °C y 30.3 °C, respectivamente. La reducción del contenido de humedad fue de 7.7 kg/kg peso seco en el CSPPH, de 5.2 kg/kg peso seco en el sistema de SSD y de 2.9 kg/kg peso seco, en el equipo de laboratorio. Los resultados demostraron que el uso del CSPPH fue más eficiente reduciendo el contenido de humedad, lo que lo hace una técnica viable y económica para el secado de semillas de maíz (Bosomtwe y col., 2019).

Rizal y Muhammad (2018) realizaron una intercalación de tiempos de secado con un CSPPH, para secado de pescado. Iniciaron el secado con el CSPP durante 7 h y continuaron secando con aire caliente, producido por un horno de biomasa, en un periodo de 14 h al día siguiente. La cámara de secado se mantuvo de 40 °C a 50 °C, obteniéndose un producto seco en 21 h. Destacaron que el estudio se hizo en condiciones meteorológicas desfavorables, lo que dificulta el secado. Sin embargo, este sistema funciona solo con apoyo de la fuente de energía por combustión, que en este caso fue biomasa.

En general, la fuente de energía complementaria en los CSPPH, tiene una mayor contribución en la relación de energía calorífica del

sistema total, logrando CSPPH energéticamente eficientes, adecuados para la operación de secado continuo; mientras que, la participación de la energía solar conduce a la reducción de costos de operación, principalmente. Otro beneficio de la fuente de energía complementaria es que permite alargar los tiempos de uso del secador y secar incluso en condiciones climáticas desfavorables (Rizal y Muhammad, 2018; Murali y col., 2020).

Captadores solares de placa plana híbridos con sistema auxiliar de energía geotérmica

Los CSPPH por energía geotérmica están integrados por un CSPP y una fuente de energía auxiliar calorífica por energía geotérmica. Consiste en la utilización de manera directa de esta energía a través del vapor de un pozo geotérmico y su principal ventaja es la disponibilidad las 24 h (Helvaci y col., 2019). Sandali y col. (2019) desarrollaron un análisis numérico de un CSPPH en Argelia, en el que incorporaron un intercambiador de calor tubular en un CSPP de 24 tubos, con una temperatura del fluido de 70 °C. Determinaron que el intercambiador de calor mejora significativamente y obtuvieron temperaturas de 46 °C a 58 °C. Además de que el intercambiador de calor da continuidad al proceso de secado por la noche o en situaciones climáticas desfavorables a la energía solar. Asimismo, Ananno y col. (2020), realizaron un diseño conceptual de un CSPPH solar-geotérmico, con un área de captación solar de 1 m² y un área de la tubería del intercambiador de calor tierra-aire de 3.67 m². En el análisis numérico determinaron que el CSPPH puede operar por 20 h, y con la integración de la fuente de energía geotérmica incrementaron la eficiencia en un 20.5 % respecto a solo la utilización de un captador solar de placa plana a un caudal máxico de 0.02 kg/s. Otro CSPPH elaborado para el secado de granos de cacao, con una superficie de captación de 1.2 m², con un intercambiador de calor geotérmico, con 42 tubos escalonados y con un fluido a 60 °C, demostró que el uso de un sistema híbrido mejora la eficiencia un 16 % en el secado y redujo el tiempo de secado en un 23 % (Gunawan y col., 2021).

Captadores solares de placa plana híbridos con sistema auxiliar de energía eléctrica

Los CSPP pueden ser asistidos por paneles fotovoltaicos (PF). Estos están constituidos por celdas solares fotovoltaicas, las cuales son las encargadas de transformar la energía solar a energía eléctrica a través de un dispositivo semiconductor de dos capas, el cual es incidido por la luz solar produciendo una diferencia de voltaje y por ende genera energía eléctrica (Guerra y col., 2018). No se consideran sistemas híbridos de secado debido a que la energía proveniente de estos paneles no se utiliza para generar energía térmica que se utilice directamente en el secador (Fudholi y Sopian, 2019). Los PF se utilizan para generar energía eléctrica, que se emplea en algún componente del secador, como es el caso de los ventiladores de la cámara de secado con convención forzada. Este tipo de captadores presentan un aumento de eficiencia de 12.81 % a 14.41 % en estudios teóricos y experimentales, respectivamente (Fudholi y Sopian, 2019).

Otra línea de desarrollo de los CSPP híbridos, con uso de PF, es el implementar y alimentar eléctricamente un rastreador de sol, para aprovechar al máximo la radiación solar. Esto permite una rotación del CSPP para lograr la mayor captación. Se ha reportado un incremento de la temperatura de salida de hasta 69.1 °C, con lo que se logró la reducción del tiempo de secado de alimentos de un 16.6 % a 36.6 % (Samimi-Akhijahani y Arabhosseini, 2018). Lo anterior demuestra que, la combinación de dos fuentes de energía incrementa la temperatura de secado y disminuye el tiempo de secado.

Un método que ha presentado avances, en el secado de alimentos, es la utilización del calentamiento por inducción, el cual está conformado por una fuente de alimentación con energía eléctrica, integrado con electrodos en una cámara aislada, un sistema de control y regulación (Xue y col., 2018). Las aplicaciones son diversas, principalmente en procesos de fundición y calentamiento de materiales (Xue y col., 2018; Han y col., 2019; Voigt y col., 2020).

En el caso del secado de alimentos, Ortiz-Hernandez y col. (2020), desarrollaron un estudio en semillas de girasol altas en oleico, para comparar las afectaciones que causan los métodos de secado termo-solar y de secado con inducción electromagnética a bajas presiones. Concluyeron que el método por inducción acortó 2.5 veces el tiempo de secado y se incrementó el coeficiente de expansión volumétrica, lo que se reflejó en una reducción de la resistencia al corte, con ventajas significativas en la calidad de los productos; por lo que, puede ser una opción viable para la hibridación, como fuente de energía complementaria para los CSPPH, no obstante, el secado de alimentos por calentamiento por inducción ha sido poco explorado.

Los avances en el secado solar de alimentos analizados presentan un impacto positivo en el desarrollo de los procesos de conservación por deshidratación, ya que se ha logrado minimizar algunas desventajas de los CS, como son la dependencia total de las condiciones climáticas, la disponibilidad y la reducción del área de captación, mediante el uso de materiales de almacenamiento y principalmente, a través de la hibridación de los CS (García y col., 2019; Karki y col., 2019). Los CSPPH pueden ser utilizados comercialmente, por su fácil instalación, poco mantenimiento, reducción de los costos por uso de energía eléctrica, disminución de tiempo de secado y viabilidad económica (Al-damook y col., 2017). Además, estudios a futuro pudieran priorizar en la hibridación del uso de energía solar y eléctrica, debido a que los métodos más eficientes de secado son eléctricos (resistencias eléctricas, calentamiento por inducción, entre otras).

Los CSPP cumplen la función de secado y pueden ser más eficientes en varios parámetros (capacidad, eficiencia, reducción de tiempo de secado), con la integración de materiales en

cambio de fase y principalmente, la integración de la fuente de energía complementaria. Los CSPPH tienen mayor contribución en la relación de energía calorífica del sistema total, logrando ser energéticamente eficientes para la operación de secado continuo; mientras que, la participación de la energía solar se enfoca en la reducción de costos de operación, principalmente. Al respecto, es importante resaltar que se tiene una ganancia en temperatura o eficiencia de remoción de humedad, se alargan los tiempos de uso del secador y se puede secar en condiciones climáticas desfavorables (Rizal y Muhammad, 2018; Murali y col., 2020).

CONCLUSIONES

En el desarrollo que han tenido los captadores solares de placa plana (CSPP), para el secado solar de alimentos, destacan los beneficios potenciales de los captadores solares de placa plana híbridos (CSPPH), ya que cada vez más, son una opción viable para sustituir o minimizar el uso de energías no renovables. Los desarrollos presentados, desde un diseño especializado, el uso de diferentes materiales o integración de diversas tecnologías con los CSPP, han permitido incrementar la eficiencia térmica, reducir el tiempo de secado, incrementar la temperatura de operación y optimizar el aprovechamiento de la energía solar. Los CSPPH se han vuelto muy útiles para el secado solar de alimentos, al lograr temperaturas óptimas de secado y reducir el tiempo de proceso.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para cursar el doctorado en ciencias en biotecnología en procesos agropecuarios dentro del programa de doctorado del Instituto Tecnológico de Tlajomulco, incluido en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad.

REFERENCIAS

- Abubakar, S., Umaru, S., Kaisan, M. U., Umar, U. A., Ashok, B., and Nanthagopal, K. (2018). Development and performance comparison of mixed-mode solar crop dryers with and without thermal storage. *Renewable Energy*, 128: 285-298.

- Abuşka, M., Şevik, S., and Kayapunar, A. (2019). A comparative investigation of the effect of honeycomb core on the latent heat storage with PCM in solar air heater. *Applied Thermal Engineering*. 148: 684-693.
- Al-damook, A. and Khalil, W. H. (2017). Experimental evaluation of an unglazed solar air collector for building space heating in Iraq. *Renewable Energy*. 112: 498-509.
- Ananno, A. A., Masud, M. H., Dabnichki, P., and Ahmed, A. (2020). Design and numerical analysis of a hybrid geothermal PCM flat plate solar collector dryer for developing countries. *Solar Energy*. 196: 270-286.
- Arunsanandee, G., Lingayat, A., Chandramohan, V. P., Raju, V. R. K., and Reddy, K. S. (2018). A numerical model for drying of spherical object in an indirect type solar dryer and estimating the drying time at different moisture level and air temperature. *International Journal of Green Energy*. 15(3): 189-200.
- Bokor, B., Akhan, H., Eryener, D., and Kajtár, L. (2019). The potential of solar air heating in the Turkish industrial sector. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 63(1): 57-66.
- Borode, A., Ahmed, N., and Olubambi, P. (2019). A review of solar collectors using carbon-based nanofluids. *Journal of Cleaner Production*. 24: 118311.
- Bosomtwe, A., Danso, J. K., Osekre, E. A., Opit, G. P., Mbata, G., Armstrong, P., and Akowuah, J. O. (2019). Effectiveness of the solar biomass hybrid dryer for drying and disinfestation of maize. *Journal of Stored Products Research*. 83: 66-72.
- Calín-Sánchez, Á., Lipan, L., Cano-Lamadrid, M., Kharaghani, A., Masztalerz, K., Carbonell-Barrachina, Á. A., and Figiel, A. (2020). Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods*. 9(9): 1261.
- Camas-Nafate, M. P., Alvarez-Gutiérrez, P., Valenzuela-Mondaca, E., Castillo-Palomera, R., and Perez-Luna, D. C. (2019). Improved agricultural products drying through a novel double collector solar device. *Sustainability*. 11(10): 2920.
- Catorze, C., Tavares, A. P., Cardão, P., Castro, A., Silva, M. E., Ferreira, D. W., ..., and Brás, I. (2022). Study of a solar energy drying system—Energy savings and effect in dried food quality. *Energy Reports*. 8: 392-398.
- Charvát, P., Klimeš, L., Pech, O., and Hejčík, J. (2019). Solar air collector with the solar absorber plate containing a PCM—Environmental chamber experiments and computer simulations. *Renewable Energy*. 143: 731-740.
- El-Hage, H., Herez, A., Ramadan, M., Bazzi, H., and Khaled, M. (2018). An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment. *Energy*. 157: 815-829.
- El-Khadraoui, A., Bouadila, S., Kooli, S., Farhat, A., and Guizani, A. (2017). Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM. *Journal of Cleaner Production*. 148: 37-48.
- El-Sebaei, A. A. and Shalaby, S. M. (2017). Experimental investigation of drying thymus cut leaves in indirect solar dryer with phase change material. *Journal of Solar Energy Engineering*. 139(6).
- Espinoza, J. (2016). Innovación en el deshidratado solar. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*. 24: 72-80.
- Essalhi, H., Tadili, R., and Bargach, M. N. (2017). Conception of a solar air collector for an indirect solar dryer. *Pear Drying Test. Energy Procedia*. 141: 29-33.
- Fudholi, A. and Sopian, K. (2019). A review of solar air flat plate collector for drying application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 102: 333-345.
- Fudholi, A., Sopian, K., Bakhtyar, B., Gabbasa, M., Othman, M. Y., and Ruslan, M. H. (2015). Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 51: 1191-1204.
- García, R. P., del-Rio-Oliveira, S., and Scalon, V. L. (2019). Thermal efficiency experimental evaluation of solar flat plate collectors when introducing convective barriers. *Solar Energy*. 182: 278-285.
- Goud, M., Reddy, M. V. V., Chandramohan, V. P., and Suresh, S. (2019). A novel indirect solar dryer with inlet fans powered by solar PV panels: Drying kinetics of Capsicum Annum and Abelmoschus esculentus with dryer performance. *Solar Energy*. 194: 871-885.
- Guerra, N., Guevara, M., Palacios, C., and Crupi, F. (2018). Operation and physics of photovoltaic solar cells: an overview. *I+ D Tecnológico*. 14(2): 84-95.
- Gunawan, Y., Margono, K. T., Rizky, R., Putra, N., Al-Faqih, R., Hakim, I. I., ..., and Nafis, S. (2021). Enhancing the performance of conventional coffee beans drying with low-temperature geothermal energy by applying HPHE: An experimental study. *Open Agriculture*. 6(1): 807-818.
- Han, W., Chau, K. T., and Lam, W. H. (2019). All-utensil domestic induction heating system. *Energy Conversion and Management*. 195: 1035-1043.
- Hashim, N., Daniel, O., and Rahaman, E. (2014). A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita moschata*) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2(2): 345-352.
- Helvacı, H. U., Menon, A., Aydemir, L. Y., Korel, F., and Akkurt, G. G. (2019). Drying of olive leaves in a geothermal dryer and determination of quality parameters of dried product. *Energy Procedia*. 161: 108-114.
- Karki, S., Haapala, K. R., and Fronk, B. M. (2019). Technical and economic feasibility of solar flat-plate collector thermal energy systems for small and medium manufacturers.

Applied Energy. 254: 113649.

Lee, C. (2018). Tracking Clean Energy Progress (TCEP): Key trends in energy transitions. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/topics/tracking-clean-energy-progress>. Fecha de consulta: 28 de noviembre de 2020.

Lingayat, A., Chandramohan, V. P., and Raju, V. R. K. (2017). Design, development, and performance of indirect type solar dryer for banana drying. *Energy Procedia*. 109: 409-416.

López-Vidaña, E. C., Cesar-Munguía, A. L., García-Valladares, O., Pilatowsky, I., and Brito-Orosco, R. (2020). Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*). *Renewable Energy*. 147: 845-855.

Montero, I., Miranda, M. T., Sepúlveda, F. J., Arranz, J. I., Rojas, C. V., and Nogales, S. (2015). Solar dryer application for olive oil mill wastes. *Energies*. 8(12): 14049-14063.

Murali, S., Amulya, P. R., Alfiya, P. V., Delfiya, D. A., and Samuel, M. P. (2020). Design and performance evaluation of solar-LPG hybrid dryer for drying of shrimps. *Renewable Energy*. 147: 2417-2428.

Natarajan, K., Thokchom, S. S., Verma, T. N., and Nashine, P. (2017). Convective solar drying of *Vitis vinifera* & *Momordica charantia* using thermal storage materials. *Renewable Energy*. 113: 1193-1200.

Ndukwu, M. C., Bennamoun, L., and Abam, F. I. (2018). Experience of solar drying in Africa: Presentation of designs, operations, and models. *Food Engineering Reviews*. 10(4): 211-244.

Ortiz-Hernandez, A. A., Araiza-Esquivel, M., Delgado-Ruiz, L., Ortega-Sigala, J. J., Durán-Muñoz, H. A., Mendez-García, V. H., and Vega-Carrillo, H. R. (2020). Physical characterization of sunflower seeds dehydrated by using electromagnetic induction and low-pressure system. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 60: 102285.

Parikh, D. and Agrawal, G. D. (2012). Solar drying in hot and dry climate of Jaipur. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*. 1(4): 224-231.

Rizal, T. A. and Muhammad, Z. (2018). Fabrication and testing of hybrid solar-biomass dryer for drying fish. *Case Studies in Thermal Engineering*. 12: 489-496.

Samimi-Akhijahani, H. and Arabhosseini, A. (2018). Accelerating drying process of tomato slices in a PV-assisted solar dryer using a sun tracking system. *Renewable Energy*. 123: 428-438.

Sandali, M., Boubekri, A., Mennouche, D., and Gherraf, N. (2019). Improvement of a direct solar dryer performance using a geothermal water heat exchanger as supplementary energetic supply. An experimental investigation and simulation study. *Renewable Energy*. 135: 186-196.

Shalaby, S. M., Bek, M. A., and El-Sebaei, A. A. (2014). Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review.

Renewable and Sustainable Energy Reviews. 33: 110-116.

Sharma, A. K., Sharma, C., Mullick, S. C., and Kandpal, T. C. (2017). Solar industrial process heating: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 78: 124-137.

Shreelavaniya, R., Kamaraj, S., Subramanian, S., Pangayarselvi, R., Murali, S., and Bharani, A. (2021). Experimental investigations on drying kinetics, modeling and quality analysis of small cardamom (*Elettaria cardamomum*) dried in solar-biomass hybrid dryer. *Solar Energy*. 227: 635-644.

Simonetti, M., Restagno, F., Sani, E., and Noussan, M. (2020). Numerical investigation of direct absorption solar collectors (DASC) based on carbon-nanohorn nano-fluids, for low temperature applications. *Solar Energy*. 195: 166-175.

Tarigan, E. (2018). Mathematical modeling and simulation of a solar agricultural dryer with back-up biomass burner and thermal storage. *Case Studies in Thermal Engineering*. 12: 149-165.

Téllez, M. C., Sierra, J. C. O., Zárraga, F. L., and Álvarez, D. C. M. (2019). Nut drying of India cultivated in Campeche, México through direct solar technologies and under controlled conditions. *Revista Bistua Facultad de Ciencias Basicas*. 17(3): 60-69.

Tlatelpa-Becerro, A., Rico-Martínez, R., Urquiza-Beltrán, G., and Calderón-Ramírez, M. (2020). Obtaining of *Crataegus Mexicana* leaflets using an indirect solar dryer. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 19(2): 669-676.

Torres-Gallo, R., Miranda-Lugo, P. J., and Martínez-Padilla, K. A. (2017). Design and construction of a hybrid system of heating air by combustion of biomass and solar radiation, using phase change material (PCM) as a source of thermal storage, for cassava drying. *Tecnológicas*. 20(39): 71-83.

Voigt, A. L., da-Cunha, T. V., and Bohórquez, C. E. N. (2020). Conception, implementation, and evaluation of induction wire heating system applied to hot wire gtaw (ihw-gtaw). *Journal of Materials Processing Technology*. 281: 116615.

Xue, Y., Wang, C., Hu, Z., Zhou, Y., Liu, G., Hou, H., ..., and Li, J. (2018). Thermal treatment on sewage sludge by electromagnetic induction heating: Methodology and drying characterization. *Waste Management*. 78: 917-928.

Zhou, C. Y., Wang, C., Cai, J. H., Bai, Y., Yu, X. B., Li, C. B., ..., and Cao, J. X. (2019). Evaluating the effect of protein modifications and water distribution on bitterness and adhesiveness of Jinhua ham. *Food Chemistry*. 293: 103-111.