

Incorporación de energía fotovoltaica a un secador solar de tipo directo/indirecto con la superficie ampliada del calentador de aire para comunidades sostenibles

Eduardo Ríos-Urban¹, Elisa Sánchez-Cruces², Eugenio Romantchik-Kriuchkova³

^{1,2,3}Universidad Autónoma Chapingo, México. Email: eriosu@chapingo.mx

Resumen

En la era Postpandemia COVID-19 se realizó un diagnóstico comunitario en Teotihuacán, México, principal destino turístico de este país. Las respuestas de más de 1,200 artesanos, agricultores, ganaderos, restauranteros, gobernadores y empresarios permitieron identificar al proceso de secado solar de alimentos como la tecnología más viable para implementarse e impulsar su productividad sin afectar el medio ambiente ni sus tradiciones ancestrales. Ante esta necesidad, se desarrolló en la Universidad Autónoma Chapingo, un secador solar móvil de tipo directo/indirecto con cubierta de policarbonato y estructura de aluminio, que se distingue por tener una superficie del calentador de aire tres veces superior a los secadores normalmente comercializados. Teotihuacán tiene un recurso solar promedio de 5.7 Horas Solar Pico, y propicia la incorporación de energía fotovoltaica para accionar los extractores de aire que retiran la humedad y controlan la temperatura. Se presentan las fases del trabajo: 1) Diagnóstico comunitario, 2) Diseño y construcción del secador, 3) Modelación matemática 4) Selección e instalación del sistema fotovoltaico, 5) Instrumentación del secador (variables medidas: temperaturas y humedades relativas interiores y exteriores, radiación solar, peso del producto). 6) Evaluación del secador con nopal (opuntia ficus indica). Como resultados principales se obtuvo que el modelo matemático tiene un coeficiente de determinación de 0.87 utilizando un método de coeficientes indeterminados para su solución y comparación con datos experimentales, se obtuvo un diseño del secador que es reproducible para otras zonas geográficas y que es muy liviano para su transporte (11.2 kg), se obtuvo un sistema fotovoltaico de 160W capaz de proporcionar 4 días de autonomía, el secador propuesto disminuye 35% el tiempo de secado con respecto a un secador común, el costo total aumento en solo 20%.

Palabras clave: sostenibilidad agrícola, secador de alimentos, energía solar.

Abstract

In the Post-COVID-19 pandemic era, a community diagnosis was carried out in Teotihuacán, Mexico, the main tourist destination in this country. The responses of more than 1,200 artisans, farmers, ranchers, restaurateurs, governors and businessmen allowed the identification of the solar food drying process as the most viable technology to be implemented and boost their productivity without affecting the environment or their ancestral traditions. Given this need, a direct/indirect type mobile solar dryer with a polycarbonate cover and aluminum structure was developed at the Chapingo Autonomous University, which is distinguished by having an air heater surface area three times larger than normally marketed dryers. Teotihuacán has an average solar resource of 5.7 Peak Solar Hours, and encourages the incorporation of photovoltaic energy to operate the air extractors that remove humidity and control the temperature. The phases of the work are presented: 1) Community diagnosis, 2) Design and construction of the dryer, 3) Mathematical modeling 4) Selection and installation of the photovoltaic system, 5) Instrumentation of the dryer (variable measurements: indoor and outdoor temperatures and relative humidities, solar radiation, product weight). 6) Evaluation of the dryer with cactus (opuntia ficus indica). As main results, it was obtained that the mathematical model has a coefficient of determination of 0.87 using a method of indeterminate coefficients for its solution and comparison with experimental data, a dryer design was obtained that is reproducible for other geographical areas and that is very light for its transport (11.2 kg), a 160 W photovoltaic system capable of providing 4 days of autonomy was obtained, the proposed dryer reduces the drying time by 35% with respect to a common dryer, the total cost increases by only 20 %.

Keywords: agricultural sustainability, food dryer, solar energy.

1. Introducción

En la actualidad, se ha investigado en conjunto los aspectos técnicos, económicos y ambientales relacionados a la implementación de energías renovables en comunidades en desarrollo [1,2]. Se debe realizar un diagnóstico energético de las comunidades para identificar las tecnologías que aumenten su productividad y desarrollo económico, sin afectar sus tradiciones y cuidando el medio ambiente [3]. Los secadores solares son una buena tecnología para el desarrollo comunitario sostenible, porque su construcción y mantenimiento son de bajo costo, su operación es simple y pueden ser un modelo de negocio. En este trabajo se proponen las siguientes modificaciones a los secadores solares comunes:

- A) Uso de policarbonato como material de revestimiento, para aumentar la cantidad de calor ganado por radiación solar.
- B) Uso de aluminio como material de la estructura, para disminuir el peso y facilitar el transporte.
- C) Uso de energía fotovoltaica, para accionar los ventiladores que mueven el aire caliente incluso en comunidades que no disponen de la red eléctrica.
- D) Aumentar la superficie del calentador de aire, para incrementar la masa de aire caliente que cede su calor a los alimentos y así, disminuir el tiempo de secado.

Las propuestas anteriores atienden necesidades actuales reveladas en una investigación de 2023 sobre desarrollo tecnológico en secadores solares [4], donde además se enfatiza que deben utilizar energías renovables complementarias, así como de fácil y económica construcción para su reproducción por agricultores.

La cantidad de calor que reciben los productos en el secador depende del material de revestimiento seleccionado, influyendo en la humedad y temperatura de aire, en este sentido se han hecho trabajos destacados de análisis de diferentes materiales [5], se encontró que el material que propicia mayor temperatura es el PVC, pero no se han hecho con policarbonato. En relación al uso de energía fotovoltaica se han realizado diferentes aplicaciones en invernaderos basados en modelos matemáticos de estado estable [6], pero no dinámicos aplicados también en secadores que tienen el mismo principio de funcionamiento que los invernaderos.

Las comunidades sostenibles pueden usar los secadores solares de forma continua aún en días nublados, para ello, se deben diseñar sistemas de aprovechamiento de la radiación solar que puedan

almacenar la electricidad en un banco de baterías [7], entre otras tecnologías para mejorar la sostenibilidad tales como bombeo solar y energía solar térmica, principalmente para zonas alejadas de la red. La combinación de energía solar fotovoltaica y energía solar térmica en secadores solares es altamente recomendada para disminuir el tiempo de secado de los productos, ya que la electricidad se suministra a ventiladores de extracción de aire, para controlar la temperatura y humedad del secador [8]. Por otro lado, la modificación de la estructura común de los secadores solares es otra área de oportunidad, en este sentido existen trabajos donde se han propuesto nuevos diseños donde se ha aumentado la eficiencia global del secador tomando como referencia productos como tomate [9]. El objetivo de este trabajo es mejorar el rendimiento de un secador solar cuando se aplican cuatro propuestas de mejora: uso de policarbonato como material de revestimiento, uso de aluminio como material de estructura, uso de energía fotovoltaica para generación de electricidad y aumento de la superficie del calentador de aire.

2. Materiales y métodos

2.1. Diagnóstico comunitario.

En la era postpandemia COVID-19 se realizó el proyecto 317648 de CONACYT, con el fin de diagnosticar y dar transferencia tecnológica a productores primarios en Teotihuacán, México. Se realizó un evento masivo en el Centro de Conservación de la Vida Reino Animal en esta localidad, en donde se realizaron encuestas a productores, entrevistas con gobernadores, y se realizó transferencia tecnológica en energías renovables a más de 1200 habitantes. El diagnóstico reveló la necesidad de desarrollar un dispositivo de secado solar que sea sustentable en su funcionamiento, justificado por la demanda local y la alta disponibilidad de radiación solar (5.7 HSP, horas solar pico) en este sitio (19°41'00"N 98°52'00"O).



Fig. 1 Evento para elaboración de propuestas tecnológicas en Teotihuacán México.

2.2. Características de los secadores solares experimentales de tipo directo/indirecto.

En la Universidad Autónoma Chapingo se diseñaron y construyeron dos secadores solares (Figura 1). Ambos, son de tipo directo porque permiten la incidencia de la radiación solar sobre los productos, y al mismo tiempo, de tipo indirecto porque tienen un calentador de aire que entra a la cámara de secado. La diferencia es que el primero es un secador común (Fig. 2) que tiene un calentador de aire tradicional y el segundo tiene el calentador de aire más grande en una proporción de 3:1.



Fig. 2. Secadores solares experimentales.

El material de revestimiento de los secadores es policarbonato de doble capa con espesor de 6 mm, posee una transmisividad (τ) de la radiación del 88%, su función es permitir el paso de radiación solar de onda corta y retener la radiación de onda larga (calor) al interior de la cámara de secado. El material de la estructura es de aluminio y tiene una densidad promedio de 2.7 g/cm³, esto es para facilitar su movilidad, ya que la estructura de los secadores comunes es de acero con una densidad de 7.84 g/cm³.

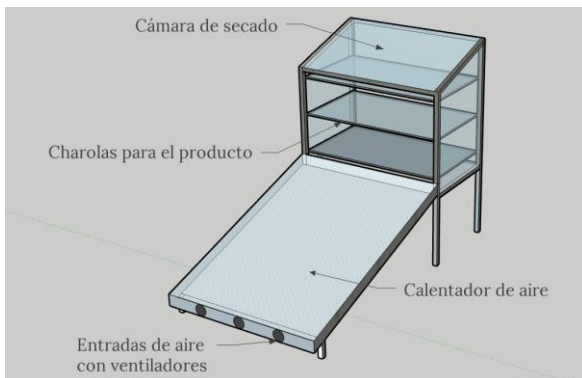


Fig. 3. Partes de un secador solar común con calentador de aire.

2.3. Modelación matemática, instrumentación y validación.

Se desarrolló un modelo dinámico para calcular la temperatura y humedad del secador bajo diferentes condiciones climáticas. Las variaciones de humedad y temperatura de aire con respecto al tiempo se representan por el siguiente sistema de dos ecuaciones diferenciales con dos incógnitas, obtenidas a partir de un balance de energía entre el calor ganado y el calor perdido en el secador:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\dot{m}_a c_p} \left[A_c \tau (1 - \alpha) R_{ext} - A_c K_c (T - T_{ext}) - \rho \dot{V} (c_p (T - T_{ext}) + \lambda_v (\omega - \omega_{ext})) \right] \quad \text{Ec.1}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\rho}{\dot{m}_a} \dot{V} (\omega - \omega_{ext}) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde $\frac{dT}{dt}$ representa la razón de cambio de la temperatura con respecto al tiempo, \dot{m}_a es el flujo másico de aire en kg/s, c_p es la capacidad calorífica del aire, J/(kg°C), A_c es el área del revestimiento en m², τ es la transmisividad del policarbonato sin unidades, α es el coeficiente global de pérdidas, R_{ext} es Radiación solar total exterior en W/m², K_c es el coeficiente global de transferencia de calor en W/m²°C, $(T - T_{ext})$ es la diferencia de temperaturas de aire interior y exterior en °C, ρ es la densidad del aire en kg/m³, \dot{V} es el flujo de ventilación en m³/s, λ_v es el calor de vaporización del agua en J/kg, $(\omega - \omega_{ext})$ es la diferencia de humedad específica interior y exterior en kg_{vapor}/kg_{aire seco}, $\frac{d\omega}{dt}$ es a razón de cambio de la humedad con respecto al tiempo.

Mediante un método de coeficientes indeterminados [10] se resolvió el sistema de las ecuaciones 1 y 2. Para realizar la validación del modelo se utilizaron datos experimentales obtenidos de una estación meteorológica ubicada dentro de la Universidad como datos de entrada al modelo, y se compararon con datos experimentales obtenidos de la instrumentación de los secadores, mediante sensores de temperatura y humedad (EliTech modelo RCW-360-Plus) y de un piranómetro (Fluke, modelo FLK-IRR1-SOL). Con los resultados de este modelo matemático se identificaron las temperaturas máximas del secador solar y se seleccionaron los ventiladores y su caudal para controlar la temperatura.

2.4. Selección e instalación del sistema fotovoltaico para la ventilación forzada.

La implementación de energía fotovoltaica en el secador depende de los resultados de modelación del apartado anterior, ya que el parámetro inicial es \dot{V} el

flujo de ventilación en m^3/s , una vez que se ha calculado se pueden seleccionar el número de ventiladores y en consecuencia su potencia eléctrica en Watts. Para comenzar el diseño de sistemas fotovoltaicos es necesario determinar la energía demandada en kWh por día del proceso de aplicación, en este caso es un secador solar, en consecuencia, se podrán determinar el número de paneles solares y el sistema de almacenamiento (controlador de carga, batería e inversor).

Una vez determinada la energía en kWh, el siguiente paso es proponer los paneles solares que generen esa energía, para ello se debe seleccionar un panel con una potencia unitaria determinada, en este trabajo se proponen 2 paneles de 80 W cada uno. Dado el recurso solar de 5.7 HSP, se tiene que ambos paneles pueden generar una energía por día total de:

$$E = N_p P_u HSP \quad \text{Ec. 3}$$

Donde E es la energía diaria generada por los paneles solares en kWh y que debe ser igual o superior a la energía demandada por los ventiladores del secador. N_p es el número de paneles solares, P_u es la potencia unitaria de los paneles solares en kW, HSP es el número de horas solar pico del sitio donde se van a ocupar los paneles solares, este valor es variable de acuerdo a la posición geográfica global.

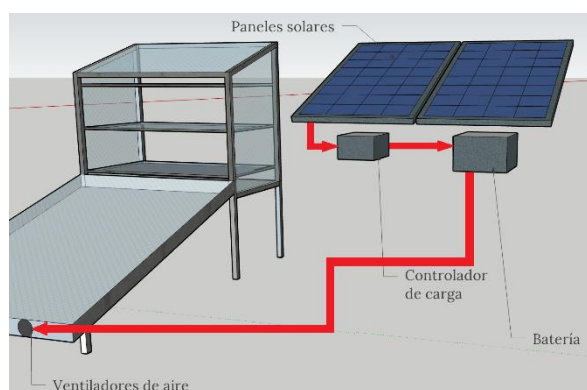


Fig. 4. Flujo de energía eléctrica desde el sistema fotovoltaico hacia los ventiladores de aire del secador.

La selección de los paneles depende del número de días de autonomía para el secador solar. Es decir, suponiendo que existen días nublados a lo largo del año, entonces se debe multiplicar el día de días de autonomía por el valor de la energía generada y determinar el número de paneles solares correspondiente. La selección del controlador de carga debe ser en función de la corriente eléctrica total entregada por los paneles seleccionados, luego el banco de baterías deberá ser propuesto en función de la energía total generada. Finalmente, el inversor de corriente será dependiente de la potencia total instalada de los ventiladores en el secador. La Figura 3 muestra

el esquema de instalación general de instalación del sistema fotovoltaico y el flujo de energía eléctrica. Los paneles solares aprovechan la radiación solar para generar corriente eléctrica, la cual pasa por un controlador de carga que tiene la función de gestionar la corriente eléctrica que llega a la batería, es decir, monitorea el voltaje de la batería, si es bajo, deja pasar la corriente, si el voltaje es alto, cierra el paso de corriente. En seguida, la batería debe almacenar la corriente que es demandada por los ventiladores del secador y después entregarla incluso en días nublados.

2.5. Evaluación del prototipo experimental.

Se utilizaron ambos secadores, el que posee un diseño común y el secador propuesto que posee una superficie del calentador de aire aumentada en 3 veces. Se seleccionó como producto alimenticio el nopal (*Opuntia Ficus-Indica*) ya que es un alimento ampliamente producido y comercializado en Teotihuacan, México para diversos productos deshidratados, ya que posee altos índices de fibra sin azúcar y se puede mezclar con muchas bebidas y alimentos. Tales como licores, bebidas energéticas, aguas de sabor, tortillas, dulces típicos de la región, batidos de proteínas para mejorar el rendimiento físico, entre otros.

En cada una de las cámaras de secado de ambos secadores se introdujo un total de 8.2 kg (Fig. 5) de nopal (*Opuntia Ficus-Indica*) en estado fresco, fue cortado en trozos de 5 cm de largo por 0.5 cm de ancho. Ambos secadores funcionan con ventiladores en la parte inferior de los calentadores de aire (Fig. 4).

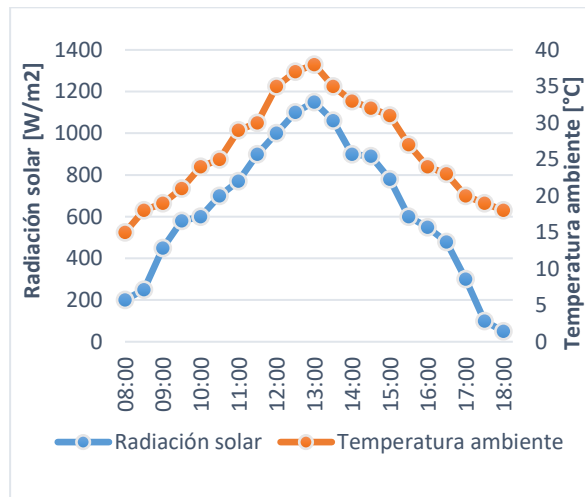


Fig. 5. Nopal en estado fresco en cortes de 5 cm de largo por 0.5 cm de ancho.

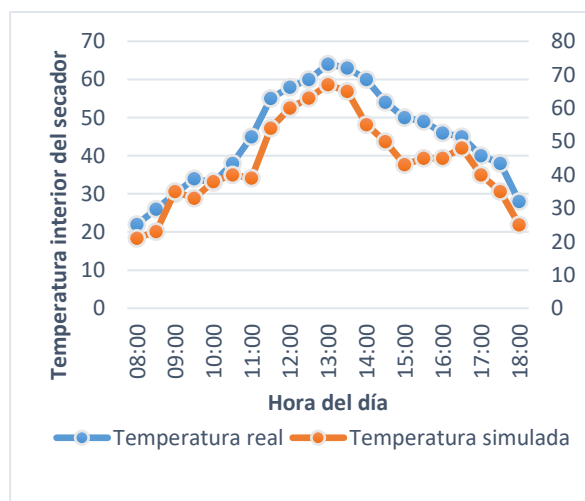
Para obtener las curvas de secado, se requirió tomar las medidas de pérdida de humedad en muestras de 1.2 kg, utilizando una báscula digital para alimentos (Uline modelo H9984) en intervalos de 30 minutos, lo anterior se realizó en un día con cielo despejado el 21/06/2024.

2.6. Resultados

Los valores de temperatura ambiente y radiación solar bajo las cuales se desarrolló la evaluación del secador fueron:



El modelo matemático tiene un coeficiente de determinación de 0.82, y este es una medida de la precisión de los valores de humedad y temperatura de aire al interior del secador obtenidos con las ecuaciones diferenciales mostradas anteriormente (Ecuaciones 1 y 2). Se muestra a continuación el resultado del modelo matemático para la temperatura interior del secador comparada con la temperatura real medida.



El sistema fotovoltaico seleccionado tiene las siguientes características:

2 paneles solares	80 Watts de potencia unitaria
1 controlador de carga	10 amperes de corriente máxima
1 batería	12 volts y 40 Ah.

El secador solar con calentador de aire ampliado cuenta con 9 ventiladores de 12 V y 6 W de potencia unitaria, que funcionan durante 4 horas por día. La energía requerida es de:

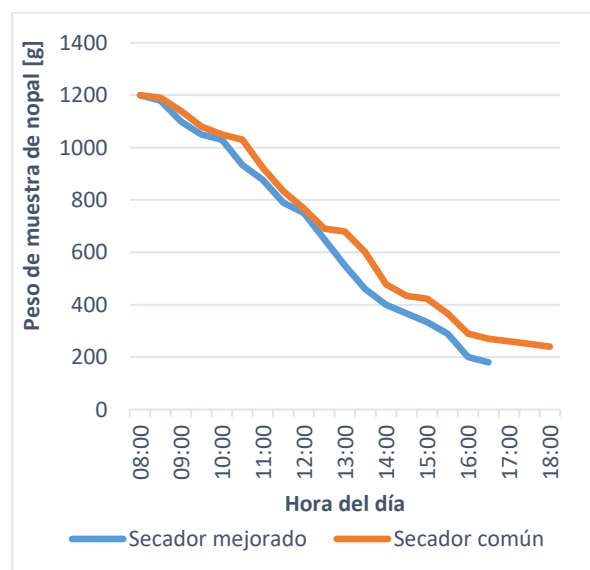
$$E_r = (9)(0.006kW)(4h) = 0.216 kWh$$

Para tener 4 días de autonomía la energía total que deben generar los paneles es de 0.864 kWh. Para utilizar la ecuación 3, se seleccionaron paneles de 80W, y despejando N_p , queda:

$$N_p = \frac{E}{P_u HSP} = \frac{0.864kWh}{(0.08kW)(5.7HSP)} = 1.89 \text{ paneles}$$

Es decir, deben ser 2 paneles solares, para completar el sistema fotovoltaico se utilizó un controlador de carga de 10 A y una batería de 12V y 40Ah.

Las curvas de secado de la Figura X, muestra la diferencia de tiempo de secado entre el secador de diseño común y el secador con la superficie del calentador de aire ampliado, se puede observar que el secador mejorado realizó la deshidratación del nopal desde 1200 g hasta 180 g en un tiempo de 9.5 horas, en cambio el secador con calentador de aire simple no logró realizar el secado en un mismo día, por lo que tuvo que ocupar un segundo día. El nopal que no se terminó de secar fue retirado del secador para evitar que gane humedad durante la noche, y al siguiente día fue ingresado nuevamente al secador, terminando el proceso de secado en casi 4 horas más.



Con esto se evidencia la necesidad de completar el proceso de secado en un mismo día para los secadores solares, ya que en caso contrario se pueden generar

problemas de ganancia de humedad y se incrementa las tareas de operación del secador. El uso del sistema fotovoltaico provee la energía eléctrica para accionar los ventiladores, y permite que la ventilación forzada, esta es indispensable para remover la humedad interior y controlar las temperaturas excesivas. Con otros métodos presentes en la literatura para acelerar el tiempo de secado se obtuvieron tiempos de secado de 8 hrs [11], se hace hincapié en la influencia de la alta variabilidad de condiciones experimentales, tales como nubosidad parcial y estación del año. En otro estudio en donde se utilizó un secador común se requirió de más de un día de secado (un día y medio) [12]. Por lo tanto se demuestra la importancia del uso de energía fotovoltaica y de potencializar el secador mediante la modificación del tamaño de su calentador de aire.

2.7. Conclusiones

El sistema fotovoltaico propuesto consta de dos paneles solares de 80 W cada uno, un controlador de carga de 10 A y una batería de 12 V y 40 Ah. Puede dotar de energía al secador durante 4 días de forma continua. El modelo matemático mostrado puede reproducirse para diferentes zonas geográficas utilizando datos de radiación solar, humedad y temperatura de aire, y se pueden obtener de estaciones meteorológicas con los resultados del modelo se pueden predecir el comportamiento de la temperatura y humedad de aire al interior del secador. El tiempo de secado del nopal (*Opuntia Ficus-indica*) disminuyó un 35% utilizando el secador propuesto, construido con policarbonato como material de revestimiento, aluminio como material de estructura, con paneles solares y con la superficie del calentador ampliada. El costo de los materiales de construcción de los secadores fue de \$234 dólares USD para el secador con diseño común y de \$280 dólares USD para el secador con la superficie del secador ampliada. Por lo anterior se concluye que es factible la implementación de las propuestas de este trabajo en el diseño y operación de secadores solares.

2.8. Agradecimientos

El presente trabajo es derivado del proyecto 315144 el cual ha sido financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México que atiende el PRONACE Energía y Cambio Climático. Se agradece a la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo por el apoyo al proyecto 23205-C-65 del cual se han obtenido los instrumentos de medición en su modalidad de convencionales.

2.9. Referencias

El estilo de las citas utilizado a lo largo del texto debe ser uniforme. El sistema de referencia será según se indica en el apartado siguiente. El orden de las referencias coincidirá con el orden de aparición de las citas en el texto.

3. Referencias

- [1] Francesca Vecchi, Roberto Stasi, Umberto Berardi. "Modelling tools for the assessment of Renewable Energy Communities". *Energy Reports*, Volume 11, 2024, Pages 3941-3962, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.03.048>.
- [2] Valeria Casalicchio, Giampaolo Manzolini, Matteo Giacomo Prina, David Moser. "From investment optimization to fair benefit distribution in renewable energy community modelling". *Applied Energy*, Volume 310, 2022, 118447, ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118447>.
- [3] Paolo Esposito, Elisa Marrasso, Chiara Martone, Giovanna Pallotta, Carlo Roselli, Maurizio Sasso, Massimiliano Tufo. "A roadmap for the implementation of a renewable energy community". *Heliyon*, Volume 10, Issue 7, 2024, e28269, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28269>.
- [4] Raj Kumar Saini, Devender Kumar Saini, Rajeev Gupta, Piush Verma, Robin Thakur, Sushil Kumar, Ali wassouf, "Technological development in solar dryers from 2016 to 2021-A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 188, 2023, 113855, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113855>.
- [5] Abdullah Alsadon, Ibrahim Al-Helal, Abdullah Ibrahim, Ahmed Abdel-Ghany, Saeed Al-Zaharani, Taha Ashour. "The effects of plastic greenhouse covering on cucumber (*Cucumis sativus* L.) growth". *Ecological Engineering*, Volume 87, 2016, Pages 305-312, ISSN 0925-8574, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.12.005>.
- [6] Eugenio Romantchik, Eduardo Ríos, Elisa Sánchez, Irineo López, José Reyes Sánchez. "Determination of energy to be supplied by photovoltaic systems for fan-pad systems in cooling process of greenhouses". *Applied Thermal Engineering*, Volume 114, 2017, Pages 1161-1168, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.011>.
- [7] S. Mekhilef, S.Z. Faramarzi, R. Saidur, Zainal Salam. "The application of solar technologies for sustainable development of agricultural sector".

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 18, 2013, Pages 583-594, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.049>.

[8] A. Khalil, Ahmad M. Khaira, Rawan H. Abu-Shanab, Mohamed Abdelgaied. "A comprehensive review of advanced hybrid technologies that improvement the performance of solar dryers: Photovoltaic/thermal panels, solar collectors, energy storage materials, biomass, and desalination units". Solar Energy, Volume 253, 2023, Pages 154-174, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.02.032>.

[9] Muhammad Zeeshan, Iram Tufail, Shahbaz Khan, Ilyas Khan, Saqib Ayuob. "Novel design and performance evaluation of an indirectly forced convection desiccant integrated solar dryer for drying tomatoes in Pakistan". Heliyon, Volume 10, 2024, ISSN 2405-8440. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29284>

[10] Zill, Dennis G. Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado, novena edición. ISBN-13: 978-607-481-313-5. ISBN-10: 607-481-313-2.

[11] José Torres, Oscar Hernández. Secado de nopal (Opuntia ficus) utilizando secador solar con sistema de reflectores. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-6: 39-46. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol3num6/Revista_Energia_Quimica_Fisica_V3_N6_6.pdf

[12] G. Durán, M. I. Margalef, M. Condorí, S. F. Castillo, L. M. Estrada. Ensayos de secado de nopalito (Opuntia Ficus indica L.Millar) en un secador solar pasivo de uso doméstico. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 15, 2011. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184. <https://iniciativasolidaria.itesa.edu.mx/resources/DCV1/4.%20Secado%20de%20nopal.pdf>