

Evaluación térmica de un secador solar tipo invernadero mixto de pequeña capacidad

Daniel Hernández Tamayo^{a*}, Octavio García Valladares^b, Erick César Lopez Vidaña^c,
Ana María Lucho Gómez^a, Juan Pablo Hernández Jerónimo^a.

^aPosgrado del Instituto de Energías Renovables, UNAM, Temixco, México,
hetad@ier.unam.mx

^bInstituto de Energías Renovables, UNAM, Temixco, México

^cCentro de Investigación en Materiales Avanzados S.C., Durango, México

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo la evaluación térmica de un nuevo diseño de secador solar tipo invernadero mixto de pequeña capacidad y fácil instalación. El secador solar recibe calor a través de la radiación directa y difusa, esto a través de las paredes de policarbonato transparente. A su vez cuenta con un sistema de calentamiento de aire que consta de 4 colectores solares de placa plana conectados en serie, asistidos por un ventilador que direcciona el aire caliente al interior del invernadero. Las dimensiones del invernadero son 2.52 m de largo por 1.17 m de ancho con una altura promedio de 2.28 m y cuenta con 4 bastidores con capacidad de 10 charolas cada uno, cuyas dimensiones son de 43 x 63 cm.

Para poder llevar a cabo la evaluación del rendimiento térmico fue necesario instrumentar con sensores dentro y fuera del invernadero, las variables que se midieron fueron: irradiancia solar, temperatura, humedad relativa y flujo volumétrico del aire. Las pruebas de evaluación en el secador solar mixto tipo invernadero mostraron temperaturas en su interior entre 31 °C y 49 °C, con una irradiancia promedio de 934.43 W/m² en el plano de los colectores y un flujo másico de aire de 0.066 m³/s. Se evaluó el desempeño térmico del sistema mediante el secado de rebanadas de manzana y hojas de acelga.

De acuerdo con la evaluación, es posible llevar a cabo el proceso de secado de productos agropecuarios, ya que opera dentro del intervalo de temperaturas recomendado [40-60 °C]. Cabe mencionar que el acoplamiento de los

calentadores solares para el calentamiento de aire en convección forzada suministra una mayor cantidad de energía hacia el invernadero, mejorando su rendimiento, así como su capacidad y tiempo de secado.

Palabras clave: secado de manzana y acelga; secado solar tipo invernadero; evaluación térmica.

Abstract

This work aims at the thermal evaluation of a new design of a small-capacity, easy-to-install mixed greenhouse solar dryer. The solar dryer receives heat through direct and diffuse radiation, through the transparent polycarbonate walls. It also has an air heating system consisting of 4 flat plate solar collectors connected in series, assisted by a fan that directs the hot air into the greenhouse. The dimensions of the greenhouse are 2.52 m long by 1.17 m wide with an average height of 2.28 m and it has 4 racks with a capacity of 10 trays each, whose dimensions are 43 x 63 cm.

In order to carry out the evaluation of the thermal performance, it was necessary to instrument with sensors inside and outside the greenhouse. The variables that were measured were: solar irradiance, temperature, relative humidity and volumetric air flow. The evaluation tests in the greenhouse-type mixed solar dryer showed temperatures inside between 31 °C and 49 °C, with an average irradiance of 934.43 W/m² in the plane of the collectors and a mass air flow of 0.066 m³/s. The thermal performance of the system was evaluated by drying apple slices and chard leaves.

According to the evaluation, it is possible to carry out the drying process of agricultural products, since it operates within the recommended temperature range [40-60 °C]. It is worth mentioning that the coupling of solar heaters for forced convection air heating supplies a greater amount of energy to the greenhouse, improving its performance, as well as its drying capacity and time.

Keywords: apple and chard drying; greenhouse solar drying; thermal evaluation.

Introducción

El desarrollo económico y social de los países está estrechamente vinculado a los recursos energéticos. En este contexto, México cuenta con un gran potencial para aprovechar fuentes de energía alternativas, como la energía solar. A pesar de algunas barreras, se ha pronosticado que las tecnologías de energías renovables constituyen una estrategia efectiva para el secado de alimentos, aportando beneficios como bajo costo de operación, alta eficiencia y un aumento en las oportunidades de empleo [1].

La demanda de productos secos ha crecido no solo en el sector agrícola, en productos como el maíz, arroz y garbanzo, sino también en la industria. El secado suele ser la etapa final en muchos procesos antes del empaque, lo que facilita el manejo de diversos materiales, tanto biológicos como no biológicos. En el caso de los alimentos, el secado es una técnica de preservación clave, ya que los microorganismos responsables de la descomposición no pueden reproducirse en ausencia de agua [2].

Para el secado efectivo de alimentos, especialmente frutas y verduras, se requiere aire caliente en un rango de temperatura de entre 45 y 60 °C. Este proceso permite conservar la mayor parte de los nutrientes, particularmente proteínas y minerales, con mínima afectación a sus propiedades comestibles y nutritivas. En países tropicales, el secado de productos agrícolas se ha realizado tradicionalmente al aire libre. Sin embargo, este método presenta desventajas, como una transferencia de calor incontrolada y una velocidad de secado lenta, además de pérdidas ocasionadas por insectos, animales y contaminación microbiana. Como resultado, la calidad de los productos suele ser deficiente, impidiendo su competitividad en el mercado internacional [3].

Metodología

En este estudio se llevó a cabo la evaluación térmica de un secador solar tipo invernadero. Las pruebas se realizaron durante los meses de agosto y septiembre de 2024, abarcando un horario de 3 horas antes y 3 horas después del mediodía solar (calculado para cada día de prueba). Las mediciones de temperatura e irradiancia se registraron cada minuto. Este enfoque permitió un monitoreo detallado de las condiciones térmicas y ambientales, esenciales para la caracterización del rendimiento del secador solar.

Descripción del equipo e instrumentación

El deshidratador solar tipo invernadero mixto consta de 4 colectores de aire dispuestos en serie (cada uno con un área de 1.83 m²), conectados a un ventilador trifásico de 1 ½ HP el cual desplaza el aire caliente de los colectores al interior del secador. El

invernadero está hecho con paredes de policarbonato de 6 mm de grosor permitiendo el ingreso de radiación directa y difusa al interior como se muestra en la Figura 1a, además su aumento de energía interna se debe al aire caliente que entra al invernadero por parte de los colectores. El secador solar cuenta con 40 charolas de 43 x 63 cm; las dimensiones del invernadero son 2.52 m de largo por 1.17 m de ancho con una altura promedio de 2.28 m. Los instrumentos de medición usados durante las pruebas fueron 8 termopares tipo T ($\pm 0.5^\circ\text{C}$), 6 piranómetros kipp & zonen ($\pm 2\% \mu\text{w}/\text{m}^2$), 1 medidor de flujo Sierra Quadra Therm ($\pm 0.5^\circ\text{C}$ y Nm^3/h), 1 medidor de velocidad de aire Extech ($\pm 5\%$), dispuestos según la figura 1b.



Figura 1. Deshidratador solar tipo invernadero mixto

Pruebas de secado

Se realizaron dos pruebas experimentales en el secador tipo invernadero, la primera consistió en secar manzana por lo que fueron rebanadas, pesadas y colocadas sobre las mallas, esta prueba inició a las 9:36 y terminó a las 15:36 h. La segunda prueba se llevó a cabo para el secado solar de acelga, la cual inició a las 9:31 y culminó a las 15:31 h. La humedad inicial de la manzana fue de 85 % (b.h.) mientras que la acelga tuvo un valor igual a 91.4 % (b.h.) (ver figura 2a y 2b).



Figura 2. Productos deshidratados con diferentes cortes

Resultados

A continuación, se presentan los perfiles de temperatura a la entrada, dentro del invernadero y a su salida, para los días de prueba, los cuales se muestran en la figura 3a y 3b. Para el secado de manzana se obtuvieron temperaturas que van desde los 31°C hasta los 49°C , mientras que para el secado de acelga se tuvieron temperaturas de 24°C hasta 46°C .

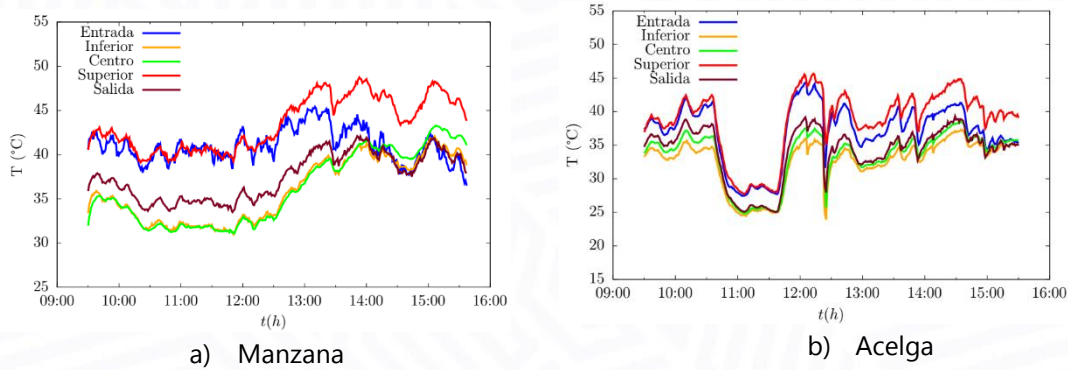


Figura 3. Curvas de temperatura para ambas prueba

La eficiencia de los colectores se determinó mediante la ecuación 1 [4].

$$\eta_{col} = \frac{\dot{m}_{aire} C_{p_{aire}} (T_{out} - T_{in})}{n_{col} G A_B} \quad (1)$$

donde: \dot{m}_{aire} es el flujo másico de aire (kg/s), $C_{p_{aire}}$ es el calor específico a presión constante del aire (J/kg °C), T_{in} y T_{out} son las temperaturas del aire a la entrada del primer colector y a la salida del último respectivamente, n_{col} es el número de colectores conectados en serie, G es la irradiancia instantánea (W/m^2) en el plano inclinado de los colectores y A_B es el área bruta de un colector (m^2).

En la Figura 4a y 4b se puede apreciar la eficiencia térmica instantánea y la irradiancia en el plano del banco de colectores a lo largo del tiempo de la prueba. Para la prueba con la manzana, la eficiencia térmica instantánea de los colectores varió entre 25 % y 53 %; para la acelga se tuvieron valores entre 15% y 80%; con un promedio en la prueba de manzana de 34% y para la acelga de 37%. La diferencia entre ambas pruebas se debe a la disminución repentina en la irradiancia debido a que el día de la prueba de la acelga hubo presencia de nubes por periodos de tiempo relativamente largos.

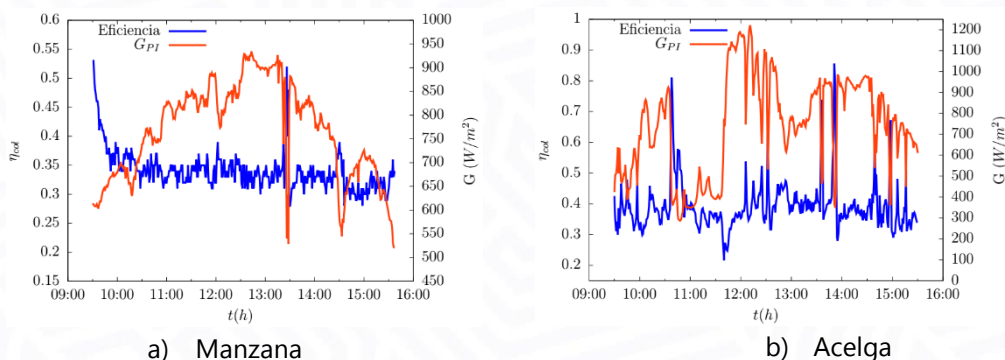


Figura 4 Eficiencia térmica instantánea del banco de colectores para ambas pruebas

La eficiencia del secador y de secado se calcularon conforme a las ecuaciones 2 y 3.

$$\eta_{sec} = \frac{m_{w,evap} h_{w,fg} + m_{p,T} C_{p,p,T} (T_{prom,inv} - T_{inicial,inv}) + n_{car} m_{al} C_{p,al} (T_{max,inv} - T_{amb})}{[n_{col} G A_B + (\sum_{i=1}^n G_i A_i) \tau_{pol} + IVF] * tp} \quad (2)$$

$$\eta_{sec} = \frac{m_{w,evap} h_{w,fg} + m_{p,T} C_{p,p,T} (T_{prom,inv} - T_{inicial,inv})}{[\dot{m}_{aire} C_{p,aire} (T_{in,inv} - T_{amb}) + (\sum_{i=1}^n G_i A_i) \tau_{pol} + IVF] * tp} \quad (3)$$

donde $m_{w,evap}$ es la masa de agua evaporada (kg), n_{car} es el número de carritos dentro del invernadero, m_{al} la masa de un carrito de aluminio incluyendo las charolas (kg), $m_{p,T}$ es la masa total del producto (kg), $C_{p,al}$, $C_{p,p}$ son el calor específico del aluminio y del producto a presión constante (J/kg °C) respectivamente, $h_{w,fg}$ es el calor latente de vaporización del agua (kJ/kg); $T_{inicial,inv}$, $T_{in,inv}$, $T_{prom,inv}$, $T_{max,inv}$ son la temperatura inicial, a la entrada, promedio y máxima dentro del invernadero (°C), T_{amb} es la temperatura ambiente (°C), G_i , A_i son la irradiancia (W/m²) y el área de captación (m²) en las posiciones donde se colocaron los piranómetros, τ_{pol} es la transmitancia del policarbonato, I es la corriente eléctrica (A), V es el voltaje (V) del ventilador, F es el factor de rendimiento del motor del ventilador y tp es el tiempo de duración de la prueba (s).

Los resultados obtenidos para ambas pruebas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Eficiencia del secado y del secador para las pruebas de manzana y acelga.

Producto	Eficiencia del secador (%)	Eficiencia del secado (%)
Manzana	10.65	15.66
Acelga	10.34	15.56

Al término de cada una de las pruebas se determinó la humedad final, el cual fue 16.94 % para la manzana y 19.91 % para la acelga. Además, se pesó cada una de las charolas para calcular la cantidad de agua evaporada en la manzana y la acelga. Los valores obtenidos en gramos se pueden observar en la figura 5a y 5b, en la cual se observa el comportamiento del secador mediante un mapa de colores, donde el color rojo representa en donde más agua se evaporó (la posición 1 es donde hay mayor captación de radiación por ser el nivel más cercano a la parte superior del invernadero, y por ende hay más evaporación de agua), y el color verde con tono más profundo donde menos agua se evaporó.

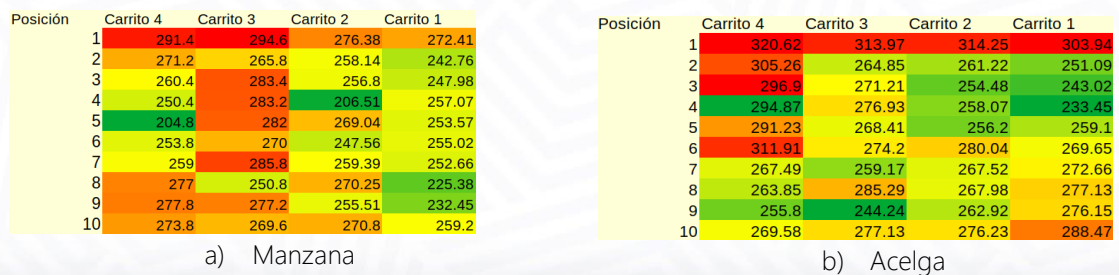


Figura 5. Masa de agua evaporada en cada una de las pruebas

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos se alcanzaron temperaturas ideales para llevar a cabo el proceso de secado de diferentes productos. En la prueba con manzana, la cantidad de agua removida fue de 10.45 l representando un 81.89 % de la masa total inicial, en el caso de la acelga se evaporó 10.98 l equivalente a un 78.34 % de la masa inicial total. La eficiencia del secador para el caso de la manzana fue de 10.65 % y de 10.34 % para la acelga; mientras que la eficiencia del secado para el primer producto fue 15.66 % y 15.56 % para el segundo. De lo anterior se puede concluir que se cuenta con un secador solar tipo invernadero mixto que cumple con las condiciones para un secado efectivo en un tiempo relativamente corto.

Agradecimientos

Al proyecto CONAHCYT 319188: "Centro comunitario para el deshidratado solar de productos agropecuarios de pequeños productores indígenas de Hueyapan, Morelos".

Referencias

- [1] F. Poggi, A. Firmino y M. Amado, "Planning renewable energy in rural areas: Impacts on occupation and land use", *Energy*, vol. 155, pp. 630–640, 2018.
- [2] A. E. ABARCA, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR ROTATORIO PARA LA OBTENCIÓN DE ESCAMAS PET", Trabajo de grado, ESC. SUPER. POLITEC. CHIMBORAZO, Ecuador, 2014.
- [3] K. Kant, A. Shukla, A. Sharma, A. Kumar y A. Jain, "Thermal energy storage based solar drying systems: A review", *Innovative Food Sci. & Emerg. Technol.*, vol. 34, pp. 86–99, abril de 2016. Accedido el 26 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.007>
- [4] International Organization for Standardization (ISO), ISO 9806:2013 Solar energy | Solar thermal collectors | Test methods, 2013.