

Evaluación térmica de un secador solar multipropósito

Thermal evaluation of a multipurpose solar dryer

David Cambara-González¹ <https://orcid.org/0000-0002-6476-4822>

Yudith González-Díaz² <https://orcid.org/0000-0003-124-1146>

Julio L. Ramos-Martínez³ <https://orcid.org/0009-0007-0235-1698>

¹Agencia de Estudios Medioambientales, Grupo Empresarial GeoCuba Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba

²Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

³Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones, Informática y Biomédica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

*Autor para la correspondencia davidcambaragonzalez2@gmail.com

RESUMEN

El secado solar de alimentos es una de las formas más antiguas de conservación y se utiliza tanto de manera natural como con equipos especializados. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño térmico de un secador solar multipropósito de 12 m³, ubicado en el Centro de Investigación de Energía Solar (CIES), construido en la década de 1980 y que opera actualmente en condiciones diferentes a las de su diseño original. Se realizaron mediciones de temperatura en la cámara de secado utilizando una cámara infrarroja para obtener los perfiles térmicos y calcular el coeficiente de transferencia de calor, comparándolo con los valores reportados durante la etapa de diseño. Las mediciones fueron realizadas con el sistema de ventilación apagado y en funcionamiento. Los resultados mostraron temperaturas máximas de 79,8 °C sin ventilación y de 73,7 °C con ventilación, evidenciando el efecto regulador del sistema de ventilación en el 6 °C en la temperatura del material a secar cuando la ventilación estaba activa. El coeficiente de transferencia de calor obtenido indicó que la eficiencia térmica

actual del equipo es del 98,8 % en comparación con la eficiencia de diseño, sugiriendo que el secador mantiene un desempeño térmico cercano a su condición original y no requiere modificaciones estructurales desde una perspectiva técnico-económica.

Palabras clave: secado solar; evaluación térmica; termografía infrarroja; transferencia de calor; eficiencia térmica.

ABSTRACT

Solar drying of food is one of the oldest methods of preservation and is used both naturally and with specialized equipment. This study aimed to evaluate the thermal performance of a multipurpose solar dryer with a capacity of 12 m³, located at the Solar Energy Research Center (CIES), built in the 1980s and currently operating under conditions different from its original design. Temperature measurements were taken in the drying chamber using an infrared camera to obtain thermal profiles and calculate the heat transfer coefficient, comparing it with the values reported during the design stage. Measurements were conducted with the ventilation system turned off and in operation. The results showed maximum temperatures of 79,8 °C without ventilation and 73,7 °C with ventilation, highlighting the regulating effect of the ventilation system on the thermal behavior of the dryer. An approximate increase of 6 °C in the temperature of the material being dried was observed when the ventilation was active. The obtained heat transfer coefficient indicated that the current thermal efficiency of the equipment is 98.8% compared to the design efficiency, suggesting that the dryer maintains thermal performance close to its original condition and does not require structural modifications from a technical-economic perspective.

Keywords: solar drying; thermal evaluation; infrared thermography; heat transfer; thermal efficiency.

Recibido: 09/11/2025

Aceptado: 26/12/2025

Introducción

El secado solar de alimentos constituye una de las técnicas de conservación más antiguas empleadas por la humanidad ⁽¹⁾ y continúa siendo de gran relevancia en la actualidad debido a su bajo consumo energético, simplicidad operativa y reducido impacto ambiental. En comparación con los métodos de secado convencionales basados en combustibles fósiles o energía eléctrica, el secado solar aprovecha una fuente renovable ampliamente disponible, lo que lo convierte en una alternativa sostenible, especialmente en regiones con alta radiación solar ^(2,3).

Con el desarrollo tecnológico, el secado solar ha evolucionado desde prácticas rudimentarias hasta sistemas diseñados que permiten un mayor control de las variables del proceso, tales como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire. En este contexto, los secadores solares multipropósito han adquirido especial importancia, ya que permiten el procesamiento de diferentes productos agrícolas y forestales, ⁽⁴⁾ adaptándose a diversos requerimientos térmicos y operacionales.

El desempeño térmico de un secador solar depende, en gran medida, de su diseño constructivo y de sus condiciones de operación. ⁽⁵⁾ Elementos como el sistema de ventilación, los materiales de cerramiento y la geometría de la cámara de secado influyen directamente en la distribución de temperaturas y en la eficiencia global del equipo. Sin embargo, muchos secadores solares continúan en operación durante décadas, sometidos a modificaciones estructurales, envejecimiento de materiales o cambios en los regímenes de trabajo, lo cual puede provocar desviaciones significativas respecto a las condiciones de diseño original.

La evaluación térmica periódica de estos sistemas resulta esencial para determinar su estado operativo real y fundamentar decisiones técnicas y económicas relacionadas con su rehabilitación o modernización. En este sentido, la termografía infrarroja se ha consolidado como una herramienta eficaz para el análisis no invasivo de sistemas térmicos, ^(6,7,8,9) permitiendo la obtención de mapas de temperatura detallados y la identificación de zonas de acumulación o déficit térmico sin interrumpir el funcionamiento del equipo. ⁽¹⁰⁾

El Centro de Investigación de Energía Solar (CIES) dispone de un secador solar multipropósito construido en la década de 1980, el cual continúa

brindando servicios a diversas entidades productivas. No obstante, las condiciones actuales de operación difieren de las consideradas en su etapa de diseño, lo que hace necesario evaluar su comportamiento térmico real. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento térmico del secador solar multipropósito del CIES, analizando la influencia del sistema de ventilación y comparando su desempeño actual con el de diseño, a partir del coeficiente de transferencia de calor.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

El estudio experimental se desarrolló en el secador solar multipropósito de 12 m³ de capacidad del CIES (figura 1) durante el mes de marzo de 2025.



Fig. 1- Secador solar multipropósito de 12 m³ de capacidad

Para la medición de la temperatura se utilizó una cámara infrarroja FLIR A655 SC (figura 2), con resolución de 640 × 480 píxeles y sensibilidad térmica inferior a 0,05 °C.



Fig. 2- Cámara infrarroja utilizada

Las mediciones se realizaron cada 30 min, entre las 8:00 a.m. y las 12:00 m, bajo dos condiciones de operación: con ventilación apagada y con ventilación encendida. Se registraron temperaturas en la madera a tres alturas (0,2; 0,4 y 0,6 m), así como en el techo y en cuatro secciones de cada pared.

Las imágenes termográficas fueron adquiridas mediante el software FLIR ResearchIR® y procesadas utilizando el método multiumbral de Otsu, siguiendo la metodología propuesta por Ramos.⁽¹⁰⁾ Para el funcionamiento con ventilación encendida se calculó el coeficiente de transferencia de calor entre las paredes y el aire interior, considerando la madera a 0,2 m como zona fría y las secciones de mayor temperatura como zonas calientes.

El coeficiente de transferencia de calor se determinó mediante la expresión:

$$h = \frac{Nu * \lambda}{l} \quad (1)$$

donde:

Nu: número de Nusselt (adimensional)

λ : conductividad térmica del aire (W/mK)

l: distancia entre el punto frío y el caliente (2,736 m)

La temperatura media del aire se calculó como media logarítmica de la diferencia de temperaturas:

$$T_{media} = \frac{T_c - T_f}{\ln(T_c - T_f)} \quad (2)$$

donde:

T_c : Temperatura del punto caliente (°C)

T_f : Temperatura del punto frío (°C)

El valor del Reynolds se obtuvo por la fórmula:

$$Re = \frac{v * l}{\nu} \quad (3)$$

donde:

v : velocidad del aire en la cámara de secado (2 m/s)

l: distancia entre el punto frío y el caliente (2,736 m)

ν : viscosidad cinemática (m²/s)

Como el Reynolds es turbulento, pero inferior 500000, el Nusselt se calculó por la ecuación:

$$Nu = 0,67 * Re^{0,5} * Pr^{0,33} \dots\dots\dots(4)$$

donde:

Re: número de Reynolds (adimensional)

Pr: número de Prandlt (adimensional)

Resultados y discusión

Las figuras 3 y 4 muestran las imágenes obtenidas a las 12:00 m con ventilación encendida y apagada, respectivamente.

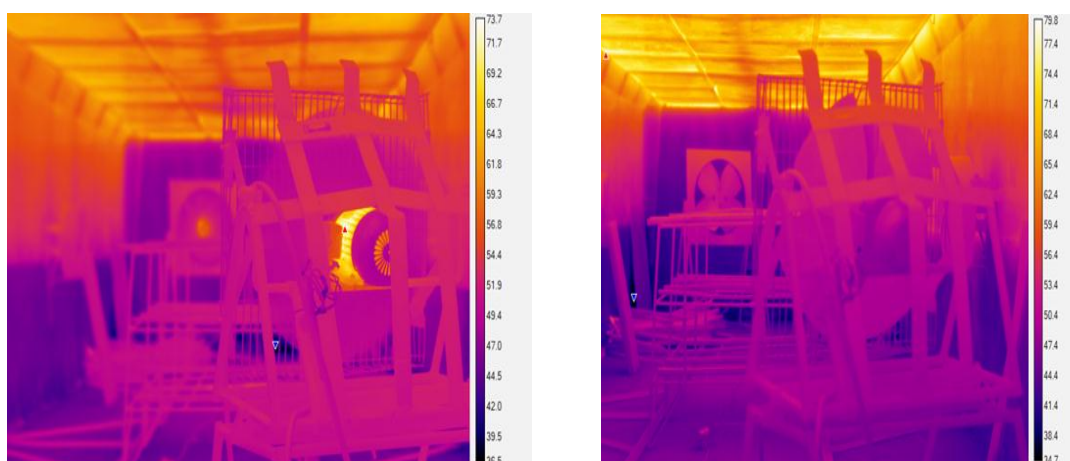


Fig. 3- Medición con ventilación encendida **Fig. 4-** Medición con la ventilación apagada

Como resultado del análisis de las imágenes térmicas se pudieron apreciar diferencias notables entre el funcionamiento con y sin ventilación que se resumen en la tabla 1.

Tabla 1- Comparación del funcionamiento del secador en función de la ventilación.

Aspecto	Con ventilación	Sin Ventilación
Temperatura máxima	73,7°C	79,8°C
Temperatura del material a secar	57°C	51°C
Localización del punto máximo	Motor del ventilador	Techo del secador
Presencia de zonas frías	Solo en las zonas sin circulación de aire	Todo el fondo del secador

Estos resultados demuestran que, aunque no existe un mezclado perfecto, la ventilación instalada si permite la regulación térmica del interior de la cámara de secado.

Al procesar las imágenes por el método avanzado multiumbral de Otsu, se obtuvieron las imágenes segmentadas en la escala de gris que se presentan en las figuras 5 y 6.

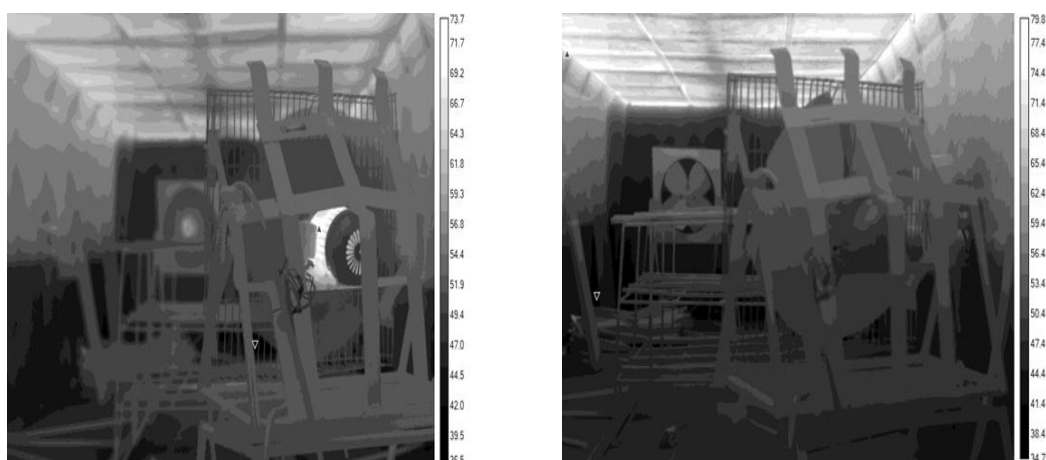


Fig. 5 - Segmentada ventilación encendida **Fig. 6** - Segmentada ventilación apagada

Los datos térmicos extraídos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2 - Temperaturas en Celsius con la ventilación encendida

Zona	8:30 am	9:00 am	9:30 am	10:00 am	10:30 am	11:00 am	11:30 am	12:00 m
Madera 0,2 m	41	46	49	54	54	54	56	55
Madera 0,4 m	41	47	51	55	55	55	56	57
Madera 0,6 m	41	47	51	55	56	57	56	57
Techo	46	45	54	60	60	60	60	64
Izquierda 1	43	49	50	61	62	60	61	64
Izquierda 2	40	47	48	57	58	59	60	61
Izquierda 3	37	45	45	52	56	56	58	59
Izquierda 4	35	43	40	48	51	52	54	56
Derecha 1	56	59	64	63	62	64	63	64
Derecha 2	56	59	64	63	62	62	60	61
Derecha 3	56	59	61	61	60	59	59	59
Derecha 4	54	59	58	58	57	57	57	56

En la tabla se resalta en rojo las zonas calientes para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor, pues siempre se considerará como zona receptora o fría la de la madera a 0,2 m. No se realizó el cálculo del coeficiente de transferencia de calor para el funcionamiento sin ventilación porque esta operación implica factores no incluidos en el estudio.

El análisis evidenció que, sin ventilación, se alcanzan temperaturas máximas superiores concentradas en el techo, mientras que con ventilación se obtiene

una distribución térmica más homogénea y un incremento en la temperatura del material a secar.

El coeficiente de transferencia de calor promedio obtenido fue de $3,34 \text{ W/m}^2\text{K}$, valor cercano al reportado para la condición de diseño ($3,38 \text{ W/m}^2\text{K}$),⁽¹¹⁾ lo que representa una eficiencia del 98,8 % con respecto al diseño.

Desde el punto de vista económico, el incremento potencial de eficiencia asociado a la reinstalación de la capa de cristal faltante resulta insignificante frente al costo del material, por lo que no se justifica dicha inversión.

Conclusiones

- 1- El secador solar alcanzó temperaturas máximas de $79,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sin ventilación y $73,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ con ventilación.
- 2- La ventilación contribuye a la regulación térmica e incrementa la temperatura del material en aproximadamente $6 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 3- La eficiencia térmica actual representa el 98,8 % de la eficiencia de diseño.

En conjunto, los resultados confirman la viabilidad operativa del secador solar multipropósito del CIES en su estado actual.

Referencias bibliográficas

1. PADILLA-FRÍAS, Keyla Andrea, et al. Evaluación de la influencia de la temperatura en procesos de secado. @ *limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 2020, **16** (1), p. 98-110. [ref. de 5 diciembre 2025]. Disponible en: https://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/ALIMEN/article/view/3935/2152
2. ESPINOZA, Jaime. Innovación en el deshidratado solar. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 2016, **24** (Especial), p. 72-80. [ref. de 18 noviembre 2025]. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052016000500010&script=sci_arttext&tlng=en
3. GUAPULEMA MAYGUALEMA, Rocío, et al. Evaluación de la eficiencia de un sistema de secado solar directo para granos de cacao en tena. *Centro Azúcar*, 2023, **50**(3). [ref. de 8 enero 2026]. Disponible en:

http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S222348612023000300034&script=sci_arttext

4. ANDRADE LANDEROS, Luis Alfredo; ZAYAS BARRERAS, Imelda; RUBIO GASTELUM, Karen. Aprendizaje basado en proyectos: deshidratadora solar en el nivel medio superior del CBTA 116 como trascendencia de vida. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 2025, **15**(30). [ref. de 8 enero 2026]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?p200774672025000100006&script=sci_arttext
5. BENÍTEZ, Gustavo Manuel; TOLEDO, Jorge Fernando Toledo; OCHOA, Laura Lidia Martínez. Implementación de un prototipo de calentador solar para evaluar las variaciones de temperatura producidas en el interior de un cuarto de estudio en la ciudad de Loja. *AlfaPublicaciones*, 2025, **7**(21), p. 122-149. [ref. de 7 junio 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.33262/ap.v7i2.1.613>
6. LIANG, Xiaolong, et al. Advancing railway infrastructure maintenance: Thermodynamic parameter inversion of ballast bed and feasibility assessment of fouling detection via infrared thermography (IRT). *Infrared Physics & Technology*, 2024, **141**, p. 105398. [ref. de 15 mayo 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2024.105398>
7. ZHANG, Dongjie, et al. An in-situ detection method for assessing the thermal transmittance of building exterior walls using unmanned aerial vehicle–infrared thermography (UAV-IRT). *Journal of Building Engineering*, 2024, **91**, p. 109724. [ref. de 3 abril 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109724>
8. YOUSUF, Adeel; KHAWAJA, Hassan; VIRK, Muhammad S. A review of infrared thermography applications for ice detection and mitigation. *Cold Regions Science and Technology*, 2024, **218**, p. 104058. [ref. de 5 abril 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104058>
9. TANDA, Giovanni; MIGLIAZZI, Mauro. Infrared thermography monitoring of solar photovoltaic systems: A comparison between UAV and aircraft remote sensing platforms. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, **48**,

p. 102379. [ref. de 11 abril 2025]. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102379>

10. RAMOS, Julio Lázaro, *et al.* Heat-loss measurement using infrared thermography by multi-threshold analysis. *Applied Thermal Engineering*, **27**; 2025, p. 127433. [ref. de 1 marzo 2025]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431125020253>.

11. TORRES-TEN, Alonso, *et al.* Comportamiento térmico de un secador solar multipropósito con paneles aislantes autoportables. I Parte. *Tecnología Química*, 2013, **33**(2), p. 170-180. Consultado 21 de febrero 2025. Disponible en:

http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S222461852013000200006&script=sci_arttext&lng=en

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

Contribución de los autores

David Cambara González: recolección de datos, cálculo y redacción de artículo.

Yudith González Díaz: revisión crítica y corrección del artículo.

Julio L. Ramos Martínez: recolección de datos y procesamiento de las imágenes.