

Performance evaluation of a multi-arc ribbed mixed solar dryer for quinoa drying

Jose Quiñonez-Choquecota¹; Antonio Holguino-Huarza¹; Julio Pedro Quispe-Aymachoque¹; Lucio Quea-Gutierrez¹; Jorge Luis Apaza-Cruz¹; Julio Fredy Chura-Acero¹

¹Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú, josequch@unap.edu.pe, aholguino@unap.edu.pe, pquispe@unap.edu.pe, lquea@unap.edu.pe, jlapaza@unap.edu.pe, jchura@unap.edu.pe

Abstract– Thermal solar energy is a clean and sustainable energy source that can meet energy demands in various areas of life, such as drying agricultural products. The objective of this research was to design and construct a single-flow mixed-mode solar dryer with enhanced artificial roughness, consisting of multiple-arched ribs attached to the upper surface of the flat absorber plate, and to evaluate its thermal performance for the drying of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) under mass flow rates ranging from 0.189 kg/min to 1.893 kg/min, comparing the results with those of open sun drying. The solar dryer is low-cost (approximately 100 USD), includes a drying chamber, and features a rib geometry optimized to improve thermal efficiency. It also incorporates an autonomous air blower system powered by photovoltaic energy. The study evaluated the thermal performance of the solar air heater, the overall drying efficiency, and the moisture ratio. The tests were conducted under both forced convection (1.197 kg/min, 1.547 kg/min, and 1.893 kg/min) and natural convection (0.189 kg/min) conditions. The results showed that the maximum average thermal efficiency of the solar collector was 77% at an average solar irradiance of 1055 W/m² and a mass flow rate of 1.197 kg/min, with an average drying temperature of 56 °C. The highest average overall drying efficiency reached 23.28%, and the shortest drying time was 2.1 hours at the same flow rate. The mixed-mode solar dryer achieved optimal efficiency at a forced flow of 1.02 kg/min, reducing drying time by 68% compared to open sun drying. The moisture ratio (MR) analysis revealed that efficiency decreased at the extreme flow rates (0.189–1.893 kg/min), highlighting the importance of selecting an appropriate airflow rate.

Keywords– mixed-mode solar dryer, natural and forced convection, multiple-arched fins, thermal performance, quinoa drying kinetics.

Evaluación del rendimiento de un secador solar mixto con nervadura en forma de arco múltiple para el secado de la quinua

Jose Quiñonez-Choquecota¹; Antonio Holguino-Huarza¹; Julio Pedro Quispe-Aymachoque¹; Lucio Quea-Gutierrez¹; Jorge Luis Apaza-Cruz¹; Julio Fredy Chura-Acero¹

¹Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú, josequch@unap.edu.pe, aholguino@unap.edu.pe, pquispe@unap.edu.pe, lquea@unap.edu.pe, jlapaza@unap.edu.pe, jchura@unap.edu.pe

Resumen– La energía solar térmica es una energía limpia y sostenible que puede satisfacer la demanda energética en diversos ámbitos de la vida como para secar productos agrícolas. El objetivo de esta investigación fue diseñar y construir un secador solar de tipo mixto de un solo flujo con una mejora de rugosidad artificial que consiste de nervaduras en forma de arco múltiple acoplado en la parte superior de la placa plana absorbente para luego evaluar el rendimiento térmico para el proceso de secado de la quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) para flujos masicos comprendidos de 0,189 kg/min a 1,893 kg/min y compararlo con el secado al sol abierto. El secador solar es de bajo costo de aproximadamente 100 USD, las nervaduras tienen una geometría óptima que afecta positivamente a la eficiencia térmica, tiene una cámara de secado y un sistema de sopladores de aire que funciona de forma autónoma con energía fotovoltaica. Se evaluó el rendimiento térmico del calentador solar, la eficiencia global de secado y la razón de humedad. Los flujos masicos de prueba fueron bajo los regímenes, forzado (1,197 kg/min, 1,547 kg/min y 1,893 kg/min) y régimen de convección natural (0,189 kg/min). Los resultados revelan que, la eficiencia térmica promedio máxima del colector solar es 77 % para una irradiancia solar media de 1055 W/m² y para un caudal masico de 1,197 kg/min donde la temperatura promedio de secado fue 56 °C. La eficiencia general promedio máxima alcanzada fue de 23,28 % y el tiempo de secado mínimo fue de 2,1 horas, para un flujo de 1,197 kg/min. El secador solar mixto tiene una máxima eficiencia para un flujo forzado de 1,02 kg/min y el tiempo de secado se reduce a un 68% en comparación del secado al sol abierto. La razón de humedad (MR) reveló que para los flujos extremos (0,189-1,893 kg/min) se tiene menor eficiencia demostrando la importancia de seleccionar adecuadamente el caudal de aire.

Palabras clave– secador solar mixto, convección natural y forzada, nervaduras de arco múltiple, rendimiento térmico, cinética de secado de la quinua.

I. INTRODUCCIÓN

La energía es esencial en nuestras actividades cotidianas, las energías renovables son una alternativa para proporcionar las necesidades energéticas sin afectar negativamente el medio ambiente. La energía solar térmica es una energía limpia y sostenible para satisfacer la demanda energética en diversos ámbitos de la vida, el Perú situada al sur global de nuestro planeta tierra, la energía solar es abundante y se puede utilizar para la calefacción o secado de productos agrícolas [1].

Los calentadores solares de aire son los tipos de colectores solares en donde el aire se calientan por intermedio de la placa absorbente que transfiere el calor al aire que fluye dentro del calentador solar. El calentador solar de aire consta de una placa

absorbente de metal pintada de negro para aumentar su capacidad absorción de la radiación, una cubierta de vidrio o una placa de policarbonato con alta transmisividad y baja absorptividad que reduce las pérdidas de radiación y un conducto con aislante térmico [2]. Los calentadores solares de aire son especialmente adecuados para el secado de alimentos a baja a media temperatura es decir de 40 °C a 70 °C [3, 4]. El rendimiento de un calentador solar es bajo principalmente debido a la baja conductividad térmica del aire, siendo la principal causa la subcapa laminar que se forma cerca de la superficie absorbente al fluir el aire sobre la placa. Una forma de eliminar la subcapa laminar es incorporando la rugosidad artificial que genera turbulencia en el aire, eliminando la subcapa laminar y aumenta el rendimiento [5, 6]. En la literatura sobre calentadores solares de aire se revelan diversas formas para incorporar la rugosidad artificial en la placa plana absorbente, los más destacadas son, en forma de costillas múltiples en V [7] y las nervaduras en forma de arco múltiple [5, 6, 8, 9]. Por otro lado los que calentadores solares de aire de doble o triple flujo en contra corriente son también los que tiene mayor eficiencia [10].

El secado de alimentos es un proceso de conservación basado en la eliminación de agua mediante transferencia simultánea de calor y masa. Esta reducción de humedad inhibe el crecimiento microbiano y enzimático, preservando así la calidad nutricional e higiénica del producto [11]. Además, teniendo el producto deshidratado, se prolonga significativamente la vida útil, facilitando el almacenamiento y distribución para consumo posterior [12, 13]. El secado tradicional, conocido como secado solar directo o secado al aire libre, consiste en exponer el alimento directamente a la radiación solar y al flujo de aire natural, extendiéndolo sobre superficies como el suelo, mallas, bandejas o lonas [14]. El secado solar abierto presenta importantes limitaciones técnicas y sanitarias. Entre sus principales desventajas destacan: 1) contaminación por partículas ambientales (polvo, tierra); 2) riesgo de deterioro biológico debido a plagas (insectos, aves y roedores); 3) degradación fotoquímica por exposición prolongada a radiación UV; y 4) pérdida de calidad nutricional del producto final. Estos factores comprometen significativamente la inocuidad y vida útil del alimento [13].

Como alternativa tecnológica para superar las limitaciones del secado solar tradicional, los secadores solares son una solución innovadora. Estos sistemas permiten un control más

eficiente del proceso de deshidratación, porque permite proteger los alimentos de contaminantes externos mediante cámaras cerradas, permite optimizar la transferencia de calor mediante diseños especializados, y se logra reducir significativamente las pérdidas por acción de plagas o condiciones climáticas adversas. Esta tecnología representa un avance sustancial en la preservación de alimentos, particularmente en regiones con alta disponibilidad de radiación solar [4, 11]. Los secadores solares pueden clasificarse según dos criterios fundamentales: el modo de aprovechamiento de la radiación solar y el mecanismo de circulación del aire. Según el primer criterio, existen tres configuraciones principales: 1) secado solar abierto, donde los alimentos se exponen directamente a la radiación; 2) modo directo, que utiliza una cámara con cubierta transparente; y 3) modo indirecto, que emplea un colector térmico separado. Adicionalmente, el modo mixto combina ambos principios mediante un calentador solar de aire y una cámara de secado transparente [11]. En cuanto a la circulación de aire, esta puede lograrse mediante convección natural o forzada (empleando ventiladores mecánicos). [4, 11, 15]. Existen diversos estudios realizados en diferentes tipos de secadores, los resultados encontrados demuestran que los secadores solares reducen el tiempo de secado en comparación con el secado al sol abierto, y que los secadores solares con rugosidad artificial de convección forzada tienen mayor eficiencia [4, 15, 16]. Existen estudios de secadores solares de convección forzada con sopladores alimentados por paneles solares fotovoltaicos que hace que el proceso de secado sea autónomo y más eficiente en comparación con el secado tradicional [3, 17-20].

En las investigaciones revisadas se han secado mediante secadores solares productos alimenticios como, frutas verduras y cereales [21]. La quinua (*Chenopodium Quinoa Willd.*), cereal originario de la región andina con especial predominio en Perú y Bolivia, destaca por su excepcional valor nutricional, particularmente por su alto contenido de proteínas completas y aminoácidos esenciales [22]. Este cultivo ancestral representa un recurso estratégico para la seguridad alimentaria global debido a su adaptabilidad a condiciones climáticas adversas, para su consumo humano, requiere un procesamiento postcosecha que incluye etapas de lavado y secado, procesos que en la actualidad siguen realizándose predominantemente mediante métodos tradicionales por pequeños productores [22-25]. En particular no se encontró ningún estudio sobre el secado de la quinua mediante un secador solar mixto de convección forzada.

Por tanto, dado que en la región de puno en Perú la radiación solar es abundante y es factible su aprovechamiento [26], el presente trabajo tiene como objetivo, diseñar y construir un secador solar de tipo mixto de un solo flujo con una rugosidad artificial de nervaduras en forma de arco múltiple acoplado en la parte superior de la placa plana absorbente y evaluar el rendimiento térmico para el proceso de secado de la quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) para flujos masicos

comprendidos de 0,189 kg/min a 1,893 kg/min y compararlo con el secado al sol abierto.

II. METODOLOGÍA

A. Descripción del montaje experimental

El secador solar mixto diseñado y construido tiene los siguientes componentes: 1) un calentador solar de aire, 2) una cámara de secado y 3) un sistema de sopladores de aire de corriente continua que funciona de forma autónoma con un panel solar fotovoltaico.

El calentador solar presenta las siguientes características técnicas: la estructura fue fabricada con madera de pino (3,2 cm × 6 cm), aislamiento térmico de poliestireno de 2,9 cm instalado bajo la placa absorbente, placa absorbente de hierro galvanizado de 0,8 mm de espesor y 129,5 cm largo × 77,5 cm de ancho, acabado superficial con pintura negra mate de 0.96 de absorbancia, mejora térmica con rugosidad artificial mediante nervaduras de arco múltiple construidas con alambre de hierro galvanizado de 3 mm de diámetro, similares a los investigados por [9], [8] y [27], como se muestra en la figura 1. La cubierta del calentador solar de aire fue de policarbonato alveolar con protección UV de 6 mm [28]. La dimensión final del calentador solar fue 129,5 cm largo × 83,9 cm de ancho. El diámetro hidráulico del canal por donde fluye el aire fue de 5,96 cm.

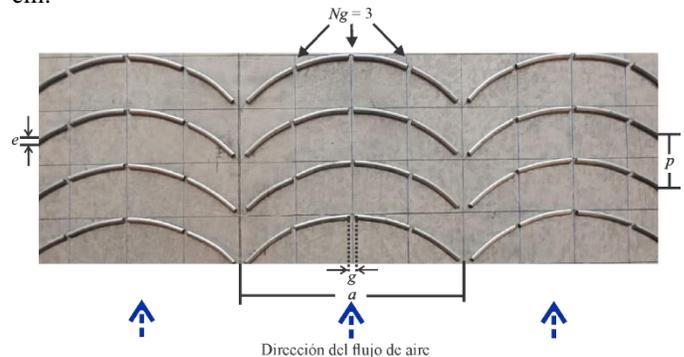


Fig. 1. Placa absorbente con nervaduras en forma de arco múltiple de alambre de 3 mm.

La forma deseada de las nervaduras se ha obtenido mediante un cilindro de madera cuyo diámetro se obtiene mediante la ecuación [27]:

$$D = \frac{a}{\cos(90-\alpha)} \quad (1)$$

El diseño eficiente sugerido por [9] fue. $a = 155$ mm, $p = 36$ mm, $e = g = 3$ mm, $\alpha = 60^\circ$, obteniéndose el diámetro $D = 180$ mm que permite el máximo rendimiento.

La cámara de secado fue fabricada de madera de pino y policarbonato, para disminuir las pérdidas de calor se instaló doble capa de policarbonato de 0,6 cm haciendo un total de 1,2 cm de espesor. La superficie de la bandeja de secado donde se

seca producto fue de 0,271 m². La salida de aire de la cámara de secado es un canal rectangular de 70 cm x 1,5 cm.

El sistema de sopladores de corriente continua está compuesto de dos sopladores centrífugos de 10,8 W cada uno y un controlador de velocidad, este sistema funciona con un panel solar de 35 W, una batería de 18 Ah junto a un controlador de carga. El sistema de sopladores se montó en la entrada del calentador solar mediante un ducto trapezoidal donde se insertaron los dos ventiladores que impulsan el aire como se muestra en la figura 2. El costo total del secador solar mixto fue aproximadamente de 100 USD, sin considerar el sistema fotovoltaico.



Fig. 2 Configuración experimental del secador solar mixto.

B. Instrumentación y procedimiento experimental

El secador solar mixto fue evaluado en la región de Puno, Perú (15°49'21.4"Sur, 70°00'45.4"Oeste; altitud: 3825 msnm). El calentador solar de aire se instaló con un ángulo de 15° respecto a la horizontal como se muestra en la figura 3. El secador solar fue diseñado con una capacidad de 5 kg de granos de quinua. La quinua utilizada para el experimento fue la variedad denominada, Blanca de Juli, que fue escarificada y lavada durante aproximadamente 30 minutos que antes de secar.

Se prepararon muestras de 154 g de quinua húmeda, distribuidas uniformemente en bandejas con un espesor de 1,5 cm, tanto en el secador como en el sistema de control (secado solar abierto). Las pruebas se realizaron en el mes de octubre de 2024, el periodo de prueba fue de 9:00 a.m. a 3:00 p.m. cada día. Dicho periodo se eligió tras realizar pruebas previas al secar al sol abierto de modo que la masa de la muestra de secado alcanzó un estado de equilibrio en 6 horas. Durante las pruebas experimentales, se monitorearon los siguientes parámetros con una frecuencia de 10 minutos: temperatura del aire a la entrada del colector (T1-aire), temperatura del aire a la salida del colector (T2-aire), temperatura de la placa absorbente (T3-placa), temperatura ambiente (T4-ambiente), temperatura de la cámara de secado (T5-cámara), temperatura de salida de la cámara de secado (T6-cámara), radiación solar, humedad relativa del aire en la entrada al colector, rapidez del aire y la pérdida de peso de las muestras (mediciones cada 30 minutos).

El secador solar se evaluó bajo cuatro flujos máxicos: flujo forzado (1,197, 1,547 y 1,893 kg/min) y convección natural (0,189 kg/min). En este último caso, se desinstaló el ducto trapezoidal conteniendo los ventiladores para establecer condiciones de flujo completamente natural.

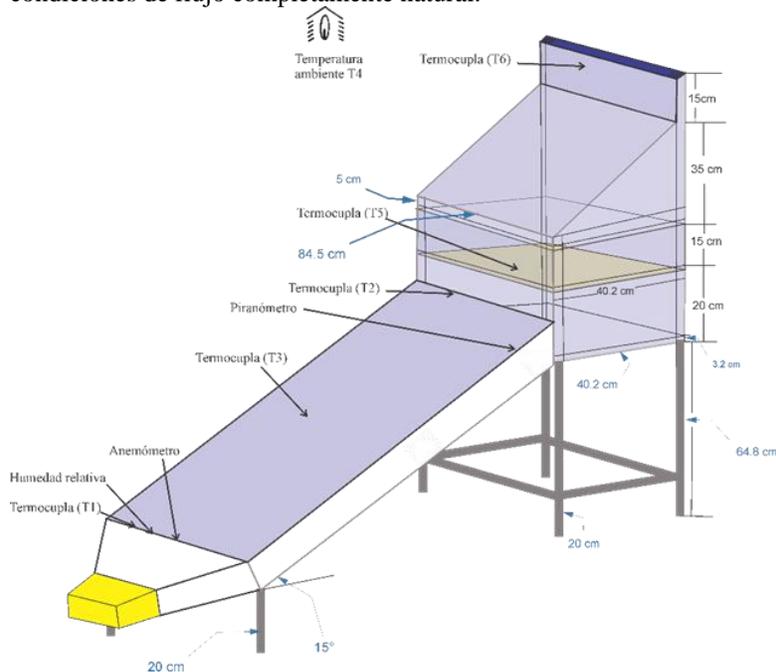


Fig. 3 Dimensiones e instalación de sensores en el secador solar mixto.

Los instrumentos utilizados se muestran en la tabla 1.

TABLA I
ESPECIFICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS

Instrumentos	Marca/Modelo	Rango	Precisión
Anemómetro de hilo caliente	Lutron AM-4224SD	0-25 m/s	±5%
Piranómetro	Apogee SP-420	0-1750 W/m ²	±10 W/m ²
Medidor de Humedad	Lutron AM-4247SD	5-95%	±3%
Registrador de datos	Pico TC-8	-270-1820 °C	-
Termocupla	Tipe K	-200-1372 °C	±0,5 °C
Amperímetro	UNI-T UT61E+	0-220 A	±0,5%
Balanza analítica	Baoshishan	0-200 g	±0,1 g

C. Parámetros de rendimiento

La eficiencia térmica del colector solar, es la relación entre el calor útil cedido al aire y la energía solar total que incide sobre el colector, la cual se estima mediante la siguiente ecuación [29]:

$$\eta_{t,c} = \frac{\dot{m}_a c_a (T_{o,c} - T_{i,c})}{I A_c} \quad (2)$$

Donde, $\dot{m}_a = \rho_a A_{st} V_{prom}$ es el flujo masico total del aire (en kg/s) (con ρ_a como densidad del aire, A_{st} área de sección

transversal y V_{prom} de rapidez promedio del aire). c_a es el calor específico del aire a presión constante (en J/kg°C). $T_{o,c}$ es la temperatura del aire que sale del colector, y $T_{i,c}$ es la temperatura del aire que entra al colector (en °C). La irradiancia es I (en W/m²), y A_c es el área del colector solar (en m²).

En secador solar de modo mixto recibe la radiación solar sobre el calentador solar y la cámara de secado es una de las ventajas. La eficiencia térmica general del secador se define como la relación entre la energía necesaria para eliminar el agua del alimento y el calor suministrado al secador [15, 30]. La eficiencia térmica general del secador mixto se obtiene considerando el consumo de energía de los ventiladores mediante la ecuación [15, 20, 31]:

$$\eta_d = \frac{m_w h_{fg}}{[(A_c I + A_{dc} I)(\tau\alpha)_\theta + P_{fan}] t_d} \quad (3)$$

Donde: m_w es la cantidad de agua perdida o evaporada del producto que se obtiene restando la masa la masa inicial del producto (m_i) menos la masa final del producto (m_f) al final del periodo de secado total [17, 32]. h_{fg} es el calor latente de vaporización del agua (en J/kg), que se puede determinar mediante la ecuación, $h_{fg} = 4186(597 - 0.56T_{pr})$ en donde T_{pr} es la temperatura del producto superficial del alimento en °C [33, 34]. A_{dc} es el área de la bandeja donde se seca la quinua. El producto de la transmitancia y absortancia para un ángulo de incidencia θ $(\tau\alpha)_\theta = k_{\tau\alpha} (\tau\alpha)_n$ donde $k_{\tau\alpha} = 1 - 0.136[(1/\cos\theta) - 1]$ es válido para $\theta < 60^\circ$ [29]. P_{fan} es la potencia utilizada por los sopladores para bombear el aire dentro del sistema, y t_d es el tiempo que duró el secado (en s).

El secado de un producto se caracteriza mediante la relación de humedad (MR) que se define como el contenido de humedad en un momento dividido entre el contenido de humedad inicial del producto, se representa gráficamente como la relación de humedad frente al tiempo. Como el caudal y las temperaturas de aire fluctúan dentro de la cámara de secado durante todo el periodo de secado debido a las variaciones de la temperatura, la relación de humedad se estima mediante la versión simplificada dado por la ecuación [18, 23]:

$$MR = \frac{MC_t}{MC_i} \quad (4)$$

Donde, MC_t es el contenido de humedad en el tiempo t , $MC_i = (m_i - m_d)/m_d$ es el contenido de humedad inicial, todos los datos de humedad se expresan en base seca (kg de agua/kg de materia seca).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Rendimiento del secador

Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en días consecutivos en condiciones meteorológicas estables y cielos despejados. Las mediciones registraron una humedad relativa ambiental entre 8% (mínima al mediodía) y 21% (máxima

matutina), mientras que la velocidad del viento mostró un promedio de 2 m/s con mayor incidencia durante las tardes. Para el proceso de secado, se utilizó quinua previamente escarificada y lavada para eliminar las saponinas, cumpliendo así con los estándares de calidad alimentaria.

El secador sola se evaluó para cuatro condiciones operativas: Tres regímenes de convección forzada con flujos máscicos de aire de 1,197, 1,547, 1,893 kg/min; y un régimen de convección natural (0,189 kg/min), logrado mediante la remoción del ducto trapezoidal de entrada al colector.

Paralelamente, se realizaron pruebas de control mediante secado solar abierto bajo las mismas condiciones ambientales, permitiendo una comparación directa de los métodos. Todos los experimentos se ejecutaron simultáneamente para garantizar condiciones climáticas equivalentes.

La Figura 4 presenta la evolución temporal de los parámetros térmicos registrados durante los cuatro días experimentales para los distintos flujos máscicos evaluados (0,189, 1,197, 1,547 y 1,893 kg/min), incluyendo temperaturas claves: entrada/salida del colector (T_1/T_2), placa absorbente (T_3), ambiente (T_4), cámara de secado (T_5/T_6) e irradiancia. Los principales hallazgos fueron: la radiación solar fluctuó entre 763,9 y 1181,7 W/m² (promedios diarios: 1042,78 – 1055,94 W/m²) alcanzando máximos al mediodía, la temperatura ambiente varió de 14,94 a 21,99°C (promedios: 18,31 - 20,92°C), con mínimos matutinos.

El comportamiento térmico del sistema tuvo las siguientes características: la placa absorbente tuvo temperaturas promedio decrecientes con el flujo, esto es 80,90°C (a 0,189 kg/min), 62,30°C (a 1,197 kg/min), 5,45°C (a 1,547 kg/min), 42,69°C (a 1,893 kg/min) registrado un máximo de 91,40°C (para 0,189 kg/min al mediodía). La bandeja de secado presentó las siguientes temperaturas promedios: 54,95°C, 56,42°C, 49,66°C y 43,91°C para los flujos respectivos (0,189, 1,197, 1,547 y 1,893 kg/min), observándose un rango de variación de: 34,73 – 91,39°C. En definitiva, las tendencias clave es que existe una relación inversa entre flujo máscico y temperaturas alcanzadas tanto en la placa absorbente y la cámara de secado, en particular, a mayor caudal (1,893 kg/min) se mostró la menor temperatura en cámara (43,91°C). Otro aspecto es que se tiene mayores pérdidas térmicas significativas cuando la placa supera 80°C.

La Figura 5 muestra la variación diaria de la eficiencia térmica del colector solar de aire, calculada mediante (2), para los cuatro flujos máscicos evaluados. Los resultados indican que: Las eficiencias térmicas promedio fueron: 9,42% para flujo natural (0,189 kg/min) 77,38% para flujo forzado (1,197 kg/min) 74,00% para flujo forzado (1,547 kg/min) 58,20% para flujo forzado (1,893 kg/min) Las tendencias observadas son: la eficiencia más baja correspondió al régimen de convección natural, a eficiencia máxima se obtuvo con el flujo forzado de 1,197 kg/min. Se identificó una relación inversa entre el flujo máscico y la eficiencia térmica para los casos de flujo forzado.

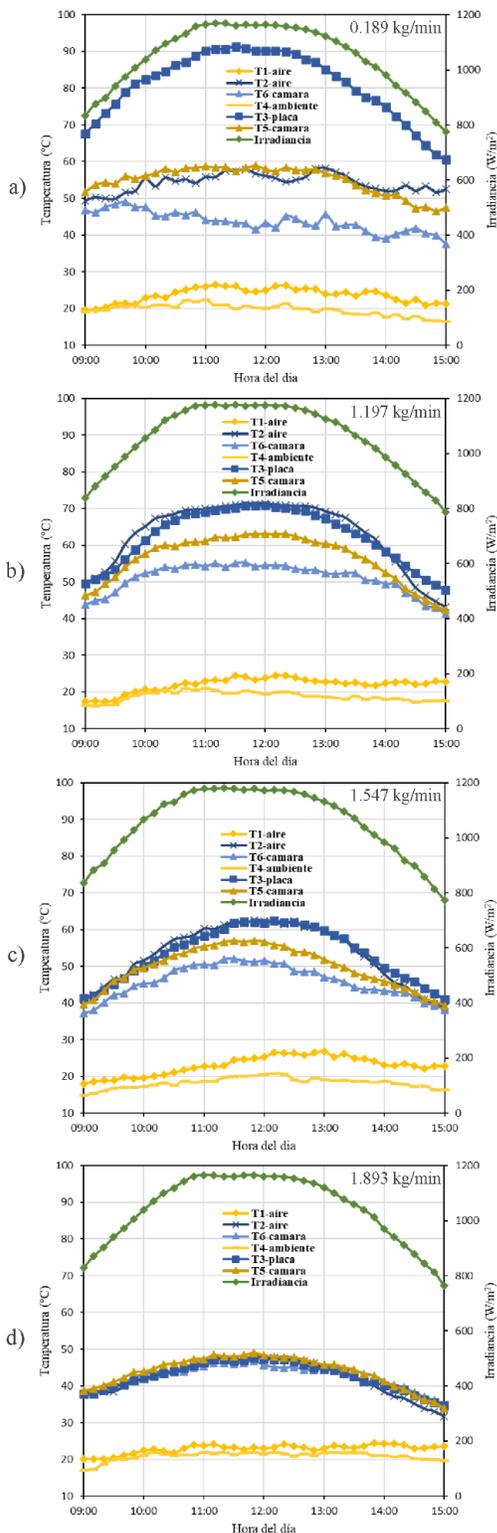


Fig. 4 Variación de las temperaturas y radiación solar con el tiempo para los cuatro flujos de aire.

Los factores determinantes fueron la baja eficiencia en convección natural (9,42%) se atribuye principalmente al

ángulo de inclinación del colector (15°) que no permitió el flujo, por lo que se presume mayores pérdidas de calor. En los flujos forzados, el incremento del caudal másico redujo progresivamente la eficiencia térmica.

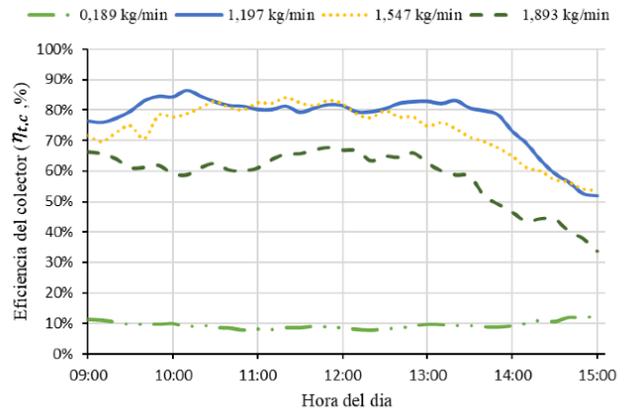


Fig. 5 Eficiencia térmica del colector solar calentador de aire durante el día para los cuatro flujos de aire.

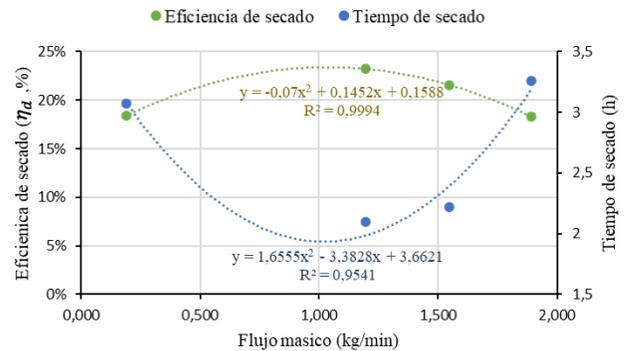


Fig. 6 Correlación de la eficiencia general de secado y el tiempo de secado respecto al flujo masico del aire.

En la figura 6, se muestra la variación de la eficiencia general promedio de secado del secador solar mixto obtenida mediante la ecuación (3) respecto al flujo masico, el tiempo de secado con respecto al flujo masico del aire y sus respectivas curvas de ajuste donde existe un buen ajuste. La eficiencia general promedio máxima alcanzada fue del 23,28 % y el tiempo de secado mínimo fue de 2,1 horas, logrados para un flujo de 1,197 kg/min, con una temperatura promedio de secado de $56,42^\circ\text{C}$. La curva de ajuste de la eficiencia general de secado nos indica que la eficiencia general de secado no será significativamente mayor que el 23,28 %, y la curva de ajuste del tiempo de secado nos revela que este será muy próximo a 2.1 horas. Además, la eficiencia general máxima y el tiempo de secado mínimo se logran cuando el flujo masico es de 1,02 kg/min. En el caso del secado al sol abierto, el tiempo de secado fue de 5,82 horas. Al comparar el tiempo de secado al sol abierto con el tiempo de secado mínimo en el caso forzado, se observa una reducción del tiempo de secado de hasta un 68%

para el secado de la quinua a un caudal de 1.197 kg/min, siendo la temperatura promedio de secado 56,42 °C.

Para estudiar el proceso de secado también se determina la relación de humedad mediante el contenido de humedad en base seca, para ello se secaron cuatro muestras de 154 g en un horno de aire caliente hasta que su masa se mantuvo constante, que fue de 91,2 g. El contenido de humedad inicial era de 0,69 kg/kg en base seca. El contenido de humedad (MC) para considerar como seco fue de 0,12 kg/kg en base seca, lo que equivale a una humedad promedio del producto del 10,6 %, que se ha considerado para el tiempo de secado. La figura 6 muestra la gráfica de la relación de humedad (MR) (obtenida con (4)) versus el tiempo de secado para los diferentes flujos masicos considerados en el estudio. Se observa que, para las cuatro pruebas de secado al sol abierto, las curvas son similares siendo la disminución de la humedad menos rápida que los otros casos, y alcanzando el secado en un tiempo promedio de 5,82 horas. Para el secado por convección forzada o natural en la cámara de secado, la razón de humedad presenta un comportamiento similar para los flujos de 0,189 kg/min y 1,893 kg/min, con tiempos de secado son 3,28 horas y 3,07 horas respectivamente. Esto significa que el caudal cumple un rol muy importante en el secado, por lo que no debe ser excesivo ni muy bajo. Para el secado por convección forzada con flujos masico de 1,197 kg/min, 1.547 kg/min, el tiempo de secado fue de 2,10 horas y 2,22 horas respectivamente. Al contrastar los hallazgos mostradas en las figuras 5 y 6 observamos que el secador solar mixto diseñado es eficiente para un flujo forzado de aproximadamente 1,02 kg/min, y se puede reducir el tiempo de secado para la quinua en un 68%.

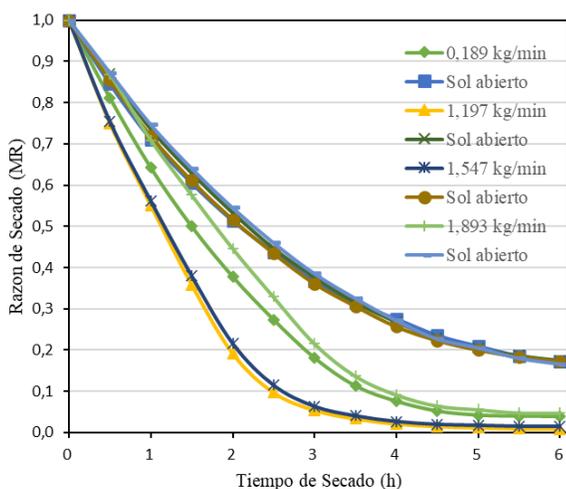


Fig. 7 relación de humedad con el tiempo de secado a tasas de flujo de masa de aire variadas y al sol abierto.

En el secador de tipo mixto se aprovecha la radiación solar de forma directa e indirecta, de modo que en la cámara de secado el aire se calienta de ambas formas. En esta investigación se observó que la eficiencia térmica del colector

solar depende principalmente de la radiación solar, el flujo masico y la temperatura de secado. Para una irradiancia solar media de 1055 W/m², la eficiencia térmica promedio del calentador solar de aire fue de del 77 % y la eficiencia global de secado del 23 %, para un flujo masico de 1,197 kg/min y una temperatura promedio de la cámara de secado de 56 °C. Las eficiencias obtenidas para el secador solar se encuentran dentro del rango aceptable, y en algunos casos la eficiencia obtenida supera a otros trabajos similares realizados por [18], [3], [32], [35], [36] y [31]. La alta eficiencia se debe a que la rugosidad artificial que consta de nervaduras de arco múltiple instalada en la placa absorbente, que han sido probados también por otros investigadores [9, 37] y que en esta investigación ha sido probado en un clima frio como la región de Puno. En síntesis, secar al sol abierto tiene múltiples desventajas que afectan al producto final, mientras que el secado de los alimentos mediante un secador solar tiene ventajas significativas que mejoran notablemente el tiempo de secado y protegen el producto final seco como resume [38]. Un aspecto importante es que, al usar la cubierta de policarbonato con filtro UV en el proceso de secado, se conserva el valor nutricional del producto seco [28, 39].

IV. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se probó experimentalmente un secador solar de tipo mixto construido con un colector solar de placa plana de flujo único con una rugosidad artificial de nervaduras en forma de arco múltiple acoplado en la parte superior de la placa absorbente. Se compararon el rendimiento térmico y el rendimiento global de secado, el efecto de los caudales de masa de aire, las temperaturas de secado, el tiempo de secado y se compararon con el secado al sol abierto. Los flujos masicos de prueba fueron bajo los regímenes, forzado (1,197 kg/min, 1,547 kg/min y 1,893 kg/min) y régimen de convección natural (0,189 kg/min). La rugosidad artificial instalada en la placa absorbente incrementó el rendimiento del colector solar, por lo que la eficiencia térmica promedio máxima del colector solar fue de 77 % para una irradiancia solar media de 1055 W/m², un flujo masico de 1,197 kg/min y una temperatura promedio de la cámara de secado de 56 °C. La eficiencia general promedio máxima alcanzada fue de 23,28 % y el tiempo de secado mínimo fue de 2,1 horas, que se logró para un flujo de 1,197 kg/min. Se estimó que el secador solar mixto diseñado tendría máxima eficiencia para un flujo forzado de 1,02 kg/min, y el tiempo de secado para la quinua, se reducirá en un 68% en comparación con el secado al sol abierto. Por otro lado, se describió la razón de humedad (MR) donde reveló que secador solar mixto redujo el tiempo de secado de quinua en 68% (de 5,82 a 2,10 horas) en comparación al secado al sol abierto, con flujo óptimo de 1,02 kg/min. Para los flujos extremos (0,189-1,893 kg/min) se mostraron menor eficiencia, demostrando la importancia de seleccionar adecuadamente el caudal de aire. Además, usar la cubierta de policarbonato con filtro UV, permite conservar el valor nutricional de la quinua.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional del Altiplano - Puno.

REFERENCIAS

- [1] K. Ukoba, K. O. Yoro, O. Eterigho-Ikelegbe, C. Ibegbulam, and T. C. Jen, "Adaptation of solar energy in the Global South: Prospects, challenges and opportunities," *Heliyon*, vol. 10, no. 7, p. e28009, Apr 15 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28009.
- [2] B. Markam and S. Maiti, "Artificial enhancer for small-scale solar air heater—A comprehensive review," *Cleaner Energy Systems*, vol. 4, 2023, doi: 10.1016/j.cles.2022.100046.
- [3] J. P. Ekka, P. Muthukumar, K. Bala, D. K. Kanaujiya, and K. Pakshirajan, "Performance studies on mixed-mode forced convection solar cabinet dryer under different air mass flow rates for drying of cluster fig," *Solar Energy*, vol. 229, pp. 39-51, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.06.086.
- [4] A. Kamarulzaman, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, "Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: A review," *Solar Energy*, vol. 221, pp. 559-582, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.04.056.
- [5] B. k. Ahirwar and A. kumar, "Review on different techniques used to enhance the thermal performance of solar air heater," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 220, 2024, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124979.
- [6] V. Goel et al., "A comprehensive study on the progressive development and applications of solar air heaters," *Solar Energy*, vol. 229, pp. 112-147, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.07.040.
- [7] K. Nidhul, A. K. Yadav, S. Anish, and S. Kumar, "Critical review of ribbed solar air heater and performance evaluation of various V-rib configuration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 142, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110871.
- [8] N. K. Pandey, V. K. Bajpai, and Varun, "Experimental investigation of heat transfer augmentation using multiple arcs with gap on absorber plate of solar air heater," *Solar Energy*, vol. 134, pp. 314-326, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.05.007.
- [9] R. Kumar, V. Goel, P. Singh, A. Saxena, A. S. Kashyap, and A. Rai, "Performance evaluation and optimization of solar assisted air heater with discrete multiple arc shaped ribs," *Journal of Energy Storage*, vol. 26, 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.100978.
- [10] A. E. Kabeel, M. H. Hamed, Z. M. Omara, and A. W. Kandeal, "Solar air heaters: Design configurations, improvement methods and applications – A detailed review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 1189-1206, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.021.
- [11] M. A. Kherrafi et al., "Advancements in solar drying technologies: Design variations, hybrid systems, storage materials and numerical analysis: A review," *Solar Energy*, vol. 270, 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112383.
- [12] C. K. Saha, N. K. Roy, J. Khatun, N. Tasnim, and M. S. Alam, "Solar hybrid dryers for fruits, vegetables, and fish: A comprehensive review on constructional features and techno-economic-environmental analysis," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 68, 2024, doi: 10.1016/j.seta.2024.103878.
- [13] D. Kong, Y. Wang, M. Li, and J. Liang, "A comprehensive review of hybrid solar dryers integrated with auxiliary energy and units for agricultural products," *Energy*, vol. 293, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.130640.
- [14] M. Kumar, S. K. Sansaniwal, and P. Khatak, "Progress in solar dryers for drying various commodities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, no. 1364-0321, pp. 346-360, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.15810.1016/j.rser.2015.10.158>.
- [15] A. B. Lingayat, V. P. Chandramohan, V. R. K. Raju, and V. Meda, "A review on indirect type solar dryers for agricultural crops – Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights," *Applied Energy*, vol. 258, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114005.
- [16] R. K. Saini et al., "Technological development in solar dryers from 2016 to 2021-A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113855.
- [17] V. R. Mugi and C. V.P., "Comparison of drying kinetics, thermal and performance parameters during drying guava slices in natural and forced convection indirect solar dryers," *Solar Energy*, vol. 234, pp. 319-329, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.02.012.
- [18] A. N. Mbakouop, H. Tchakounté, A. I. Ankungha, and C. B. Nzoundja Fapi, "Experimental performance analysis of a mixed forced convection solar dryer: Application to cocoa bean drying," *Solar Energy*, vol. 257, pp. 110-124, 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.04.010.
- [19] H. P. Bhavsar and C. M. Patel, "Performance investigation of natural and forced convection cabinet solar dryer for ginger drying," *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 6128-6133, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.050.
- [20] P. Rani and P. P. Tripathy, "Drying characteristics and exergetic investigation during mixed-mode solar drying of pineapple slices at varied air mass flow rates," *Renewable Energy*, vol. 167, pp. 508-519, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.11.107.
- [21] L. Fernandes and P. B. Tavares, "A Review on Solar Drying Devices: Heat Transfer, Air Movement and Type of Chambers," *Solar Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 15-42, 2024, doi: 10.3390/solar4010002.
- [22] A. Vega-Galvez, M. Miranda, J. Vergara, E. Uribe, L. Puente, and E. A. Martinez, "Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review," *J Sci Food Agric*, vol. 90, no. 15, pp. 2541-7, Dec 2010, doi: 10.1002/jsfa.4158.
- [23] V. Nowak, J. Du, and U. R. Charrondiere, "Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)," *Food Chem*, vol. 193, pp. 47-54, Feb 15 2016, doi: 10.1016/j.foodchem.2015.02.111.
- [24] E. Pereira, C. Encina-Zelada, L. Barros, U. Gonzales-Barron, V. Cadavez, and C. F. R. F. I., "Chemical and nutritional characterization of *Chenopodium quinoa* Willd (quinoa) grains: A good alternative to nutritious food," *Food Chem*, vol. 280, pp. 110-114, May 15 2019, doi: 10.1016/j.foodchem.2018.12.068.
- [25] V. Angeli et al., "Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): An Overview of the Potentials of the "Golden Grain" and Socio-Economic and Environmental Aspects of Its Cultivation and Marketization," *Foods*, vol. 9, no. 2, Feb 19 2020, doi: 10.3390/foods9020216.
- [26] Solargis. "Global horizontal irradiation - Perú." <https://globalsolaratlas.info/download/peru> (accessed).
- [27] A. P. Singh, Varun, and Siddhartha, "Effect of artificial roughness on heat transfer and friction characteristics having multiple arc shaped roughness element on the absorber plate," *Solar Energy*, vol. 105, pp. 479-493, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.04.007.
- [28] J. Rodríguez-Ramírez, L. L. Méndez-Lagunas, A. López-Ortiz, S. Muñiz-Becerá, and K. Nair, "Solar drying of strawberry using polycarbonate with UV protection and polyethylene covers: Influence on anthocyanin and total phenolic content," *Solar Energy*, vol. 221, pp. 120-130, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.04.025.
- [29] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
- [30] H. Essalhi, R. Tadili, and M. N. Bargach, "Conception of a Solar Air Collector for an Indirect Solar Dryer. Pear Drying Test.," *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 29-33, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.114>.
- [31] S. Kumar, H. Kumar Ghritahre, S. Agrawal, and S. Shekhar, "Investigation of a novel mixed-mode solar dryer using north wall reflector: An experimental study," *Solar Energy*, vol. 282, 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112909.
- [32] V. Reddy Mugi and V. P. Chandramohan, "Energy, exergy and economic analysis of an indirect type solar dryer using green chilli: A comparative assessment of forced and natural convection," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 24, 2021, doi: 10.1016/j.tsep.2021.100950.
- [33] S. Youcef-Ali, H. Messaoudi, J. Y. Desmons, A. Abene, and M. L. Ray, "Determination of the average coefficient of internal moisture transfer during the drying of a thin bed of potato slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 48, pp. 95-101, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00123-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00123-0).
- [34] A. H. Nikpey, A. Hajizadeh Aghdam, and S. Hamoud Shaltouki, "Dynamic simulation and thermoeconomic analysis of a novel indirect hybrid solar dryer," *Renewable Energy*, vol. 227, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120596.

- [35]A. Gupta, P. P. Borah, B. Das, and J. D. Mondal, "Energy and exergy based performance evaluation of an innovative PV-assisted solar dryer with and without modified absorber," *Solar Energy*, vol. 272, 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112464.
- [36]A. Lingayat, V. P. Chandramohan, V. R. K. Raju, and A. Kumar, "Development of indirect type solar dryer and experiments for estimation of drying parameters of apple and watermelon," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 16, 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100477.
- [37]R. Kumar, V. Goel, and M. Kumar, "Effect of providing gap in multiple-arc rib-roughened solar air heater - Part 1," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 2619-2625, 2020, doi: 10.1007/s12206-020-0535-3.
- [38]M. Rezaei et al., "Investigating performance of a new design of forced convection solar dryer," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 50, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101863.
- [39]P. K. Nair, A. L. Espinosa-Santana, L. Guerrero-Martínez, A. López-Ortiz, and M. T. S. Nair, "Prospects toward UV-blue filtered solar drying of agricultural farm produce using chemically deposited copper chalcogenide thin films on cellular polycarbonate," *Solar Energy*, vol. 203, pp. 123-135, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.04.012.