

Diseño de una Plataforma Experimental de Deshidratación Solar Instrumentada para la Caracterización del Proceso de Secado de Hierbas Medicinales

Design of an Instrumented Experimental Solar Drying Platform for Characterizing the Drying Process of Medicinal Herbs

Pascual Maldonado López ^{1,*}, Melisa Maldonado Nogales ²

¹ Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología, Cochabamba, Bolivia; ORCID: 0000-0002-7133-2438

² Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Tecnología, La Paz, Bolivia; melisamaldonadonogales@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1519-1175

* Correspondencia: pascualmaldonado.l@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

Se presenta el diseño de una plataforma experimental de deshidratación solar indirecta instrumentada para caracterizar el proceso de secado de hierbas medicinales mediante el registro sincronizado de variables térmicas, higrométricas y ambientales. La arquitectura integra un subsistema térmico de tecnología apropiada, adquisición de datos con Arduino Nano, una interfaz desarrollada en Python, visualización en tiempo real, regulación térmica ON/OFF con consigna ajustable mediante un potenciómetro de 10 kΩ y almacenamiento automático en formato XLSX. La instrumentación registra la temperatura interna del colector, la temperatura y humedad relativa dentro y fuera de la cámara, la iluminancia solar y la presión atmosférica; la masa del producto se determina únicamente al inicio y al final de cada ensayo mediante una balanza externa. El ventilador axial se ubica en la entrada inferior frontal del colector y, mientras la temperatura de la cámara permanece por debajo de la consigna, impulsa aire ambiente a través del colector, donde se calienta antes de ingresar a la cámara de deshidratado; al alcanzarse la consigna, el ventilador se desconecta. Como caso base de dimensionamiento se considera manzanilla en los Valles de Cochabamba, Bolivia (2 740 m s.n.m.), con una consigna de 42 °C, un colector solar plano calculado mediante el modelo Hottel-Whillier-Bliss y una cámara con tres bandejas y dos chimeneas de convección natural. El caso de diseño alcanza una eficiencia térmica calculada del colector del 50 % y un tiempo estimado de secado de aproximadamente dos jornadas solares. El aporte principal no reside en proponer una nueva configuración de secador solar, sino en estructurar una plataforma de bajo costo y replicable para comparar ensayos de distintas hierbas y condiciones térmicas a partir de registros temporales reproducibles. El prototipo mecánico constituye la base física de la plataforma; la validación mediante campañas experimentales sistemáticas multi-especie se plantea como la siguiente etapa de investigación.

Palabras clave: plataforma experimental de deshidratación solar; instrumentación Arduino Nano-Python; caracterización del proceso de secado; hierbas medicinales; tecnología apropiada; Hottel-Whillier-Bliss

Editor Académico: Carlos Baeza Torres

Recibido: 3 de agosto de 2026

Revisado: 18 de septiembre de 2026

Aceptado: 1 de octubre de 2026

Publicado: 7 de octubre de 2026

Cita: P. Maldonado López and M. Maldonado Nogales, "Diseño de una Plataforma Experimental de Deshidratación Solar Instrumentada para la Caracterización del Proceso de Secado de Hierbas Medicinales," *Andean Journal of Engineering Sciences*, vol. 1, no. 1, 6, 2026.

Derechos de autor: © 2026 por los autores. Publicado en acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons

Attribution (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract

This paper presents the design of an instrumented indirect solar drying experimental platform for characterizing the drying process of medicinal herbs through synchronized recording of thermal, hygrometric, and environmental variables. The architecture integrates an appropriate-technology thermal subsystem, Arduino Nano-based data acquisition, a Python interface, real-time visualization, ON/OFF thermal regulation with a setpoint adjusted by a 10 k Ω potentiometer, and automatic XLSX data storage. The instrumentation records temperatures at different points of the equipment, internal and external relative humidity, solar illuminance, and atmospheric pressure. Product mass is determined only at the beginning and at the end of each test using an external balance. The axial fan, located at the lower front inlet of the collector, drives ambient air through the collector, where it is heated before entering the drying chamber, while chamber temperature remains below the setpoint and is switched off when the setpoint is reached. Chamomile under the conditions of the Cochabamba Valleys, Bolivia (2,740 m a.s.l.), is used as the base sizing case with a 42 °C setpoint, a flat-plate collector calculated using the Hottel-Whillier-Bliss model, a three-tray drying chamber, and two natural-convection chimneys. The design case yields a calculated collector thermal efficiency of 50% and an estimated drying time of approximately two solar days. The main contribution is not a new solar-dryer configuration, but a low-cost, replicable experimental platform intended to compare different herbs and thermal conditions through reproducible time-series records. The mechanical prototype provides the physical basis of the platform; systematic multi-species experimental validation is proposed as the next research stage.

Keywords: experimental solar drying platform; Arduino Nano-Python instrumentation; drying-process characterization; medicinal herbs; appropriate technology; Hottel-Whillier-Bliss model

1. Introducción

El secado de productos agrícolas y medicinales es una operación de transferencia simultánea de calor y masa en la que la temperatura, la humedad relativa del aire, la radiación disponible y la circulación de aire condicionan la velocidad de eliminación de agua y la calidad final del producto. Los sistemas solares indirectos permiten separar el producto de la radiación solar directa y reducir el uso de combustibles o electricidad de red, por lo que constituyen una alternativa apropiada para aplicaciones rurales y de pequeña escala [1], [2].

Los Valles de Cochabamba presentan condiciones favorables para el aprovechamiento térmico solar. Para el diseño base se consideran una altitud de 2 740 m s.n.m., irradiancia media de 700 W/m² y presión barométrica reducida respecto al nivel del mar. Estas condiciones modifican la densidad del aire y la psicrometría del proceso, por lo que el desempeño de un sistema de secado debe evaluarse con parámetros locales y no únicamente con valores de referencia al nivel del mar [3], [4]. El valor de irradiancia utilizado para el dimensionamiento térmico procede de las fuentes climáticas de referencia [5]; durante los ensayos, el canal óptico BH1750 registra iluminancia en lux y se trata como una variable distinta.

En hierbas medicinales, el control térmico adquiere especial importancia porque varios compuestos bioactivos son termolábiles. Para la manzanilla, la literatura reporta que el método y la temperatura de secado modifican el rendimiento y la composición de

aceites esenciales y compuestos fenólicos, lo que justifica trabajar con intervalos térmicos moderados y documentar la evolución real de las condiciones de secado [6]–[8]. En este contexto, no basta con estimar un tiempo final de deshidratación: resulta útil disponer de registros temporales que permitan relacionar la respuesta térmica e higrométrica del sistema con las condiciones solares y con el estado inicial y final del producto.

Los antecedentes de secado solar agrícola y de hierbas medicinales muestran múltiples configuraciones de colectores, cámaras y sistemas de circulación [1], [2], [9], [10], así como aplicaciones recientes en la región andina [11], [12]. En el conjunto de antecedentes considerados para este trabajo, la mayor parte de los estudios se concentra en el desempeño de un secador o de un producto específico. Esto deja espacio para desarrollar plataformas experimentales replicables y de bajo costo que integren generación térmica, instrumentación multivariable, almacenamiento digital y regulación auxiliar, de modo que un mismo equipo pueda utilizarse en campañas comparativas con diferentes especies y condiciones de operación.

El presente trabajo sitúa la instrumentación y la capacidad de generar datos reproducibles como el aporte metodológico principal. La plataforma registra temperatura en distintos puntos, humedad relativa interna y externa, iluminancia solar y presión atmosférica, y almacena las series temporales mediante una interfaz Arduino Nano-Python. La masa del producto no se mide de forma continua dentro de la cámara: se determina externamente al inicio y al final de cada ensayo. Esta decisión evita introducir celdas de carga expuestas a gradientes térmicos, dilataciones de la estructura y posibles derivas de calibración, y delimita con claridad el alcance experimental de la plataforma.

El objetivo de este trabajo es diseñar e instrumentar una plataforma experimental de deshidratación solar indirecta capaz de registrar de manera continua las variables térmicas, higrométricas, lumínicas y barométricas del proceso, permitiendo comparar distintas condiciones de secado de hierbas medicinales mediante perfiles temporales reproducibles y la determinación de la masa inicial y final del producto. El dimensionamiento térmico se desarrolla con manzanilla como caso base de aplicación en los Valles de Cochabamba; la arquitectura de adquisición, sin embargo, se plantea de forma independiente de la especie procesada.

1.1. Fundamentos del Diseño y Variables de Interés

1.1.1. Clasificación de Deshidratadores Solares

Los deshidratadores solares se clasifican según la interacción de la radiación con el producto [1], [13]. En el tipo directo, el producto está expuesto directamente a la radiación solar, con menor costo constructivo pero mayor riesgo de degradación fotoquímica y contaminación. En el tipo indirecto, el calentamiento ocurre en un colector separado y el aire caliente circula hacia una cámara cerrada donde el producto no recibe radiación directa; esto permite mayor control térmico y mejor conservación de compuestos termolábiles, siendo el tipo preferido para plantas medicinales [9]. Los diseños modernos de pequeña escala combinan convección natural (chimenea solar) con aislamiento tipo sándwich para maximizar la eficiencia con mínima intervención mecánica.

1.1.2. Modelo Hottel–Whillier–Bliss (HWB)

El modelo HWB, sistematizado por Duffie y Beckman [14], es el estándar industrial para el diseño de colectores solares planos. Expresa el calor útil transferido al fluido como:

$$Q_u = F_R A_c [I_t (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (1)$$

donde F_R es el factor de remoción de calor (0.75–0.90 para colectores de vidrio simple), A_c el área activa del colector, I_t la irradiancia incidente, $(\tau\alpha)$ el producto transmitancia–

absortancia de la cubierta, UL el coeficiente global de pérdidas y T_i la temperatura de operación.

1.1.3. Psicrometría a Presión de Altitud

A 2 740 m s.n.m., la presión barométrica se reduce a 72.41 kPa (un 28.5 % menos que al nivel del mar), lo que modifica la densidad del aire ($\rho_a = 0.867 \text{ kg/m}^3$) y la humedad específica. La humedad específica se calcula a partir de la presión de saturación (ecuación de Magnus [15]) y la ley de Dalton [16] (Ecs. (2)–(3)):

$$P_{sat}(T) = 610.78 \exp\left(\frac{17.27 T}{T + 237.3}\right) \quad (2)$$

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P_a - P_v} \quad (3)$$

La diferencia $\Delta\omega = \omega_s - \omega_e$ entre el aire de salida y el aire de entrada es la fuerza impulsora de la transferencia de masa en la cámara.

1.1.4. Convección Natural y Tiraje de Chimenea

El tiraje térmico de una chimenea vertical resulta de la diferencia de densidad entre el aire exterior frío (ρ_a) y el aire caliente interior (ρ_{ch}) a lo largo de la altura efectiva H_{ch} [17] (Ec. (4)):

$$\Delta P_{ch} = (\rho_a - \rho_{ch}) g H_{ch} \quad (4)$$

La velocidad de extracción se obtiene aplicando el coeficiente de descarga $C_d = 0.65$ (Ec. (5)):

$$v_{ch} = C_d \sqrt{\frac{2\Delta P_{ch}}{\rho_{ch}}} \quad (5)$$

1.2. Brecha de Aplicación y Justificación

Los métodos artesanales de secado al sol directo presentan limitaciones que dificultan tanto la calidad del producto como la obtención de datos comparables entre ensayos. Para el propósito de esta investigación se identifican cuatro problemas principales:

- Exposición no controlada: la radiación solar directa, el polvo y los contaminantes ambientales dificultan mantener condiciones reproducibles de secado y pueden afectar la calidad de las hierbas [6], [18].
- Variabilidad térmica e higrométrica: sin instrumentación, no se conoce con precisión cómo evolucionan la temperatura y la humedad relativa durante la jornada ni cómo responden a cambios en el recurso solar.
- Escasa trazabilidad experimental: el uso de observaciones puntuales o de una única medición final impide reconstruir el comportamiento temporal del proceso y comparar con rigor diferentes condiciones de operación.
- Dificultad de replicación: los equipos comerciales de laboratorio pueden resultar costosos o poco accesibles para pequeños productores y grupos universitarios que requieren plataformas sencillas, reparables y construibles localmente.

La propuesta responde a estas limitaciones mediante una plataforma que combina un módulo térmico pasivo con un sistema digital de adquisición y registro. Su justificación se organiza en tres dimensiones:

Científica y experimental: está diseñada para obtener series temporales sincronizadas de las variables que gobiernan el proceso y construir una base de datos comparable entre especies, temperaturas de operación y jornadas solares.

Tecnológica y económica: utiliza materiales, electrónica y herramientas de amplia disponibilidad, con una arquitectura que puede mantenerse y modificarse localmente sin depender de equipamiento especializado.

Ambiental y territorial: el calentamiento principal proviene de energía solar y el diseño se adapta a las condiciones barométricas y climáticas de los Valles de Cochabamba, reduciendo el uso de energía externa durante la operación térmica.

2. Materiales y Métodos

2.1. Arquitectura y Secuencia de Diseño de la Plataforma Experimental

La plataforma se concibe como la integración de cuatro bloques funcionales: generación térmica solar, cámara de secado y evacuación por convección natural, instrumentación y adquisición digital, y protocolo experimental. El proceso de diseño se organiza en diez etapas con entradas, cálculos y salidas encadenadas (Figura 1 y Tabla 1). El diseño de partida corresponde a un trabajo previo de los autores.

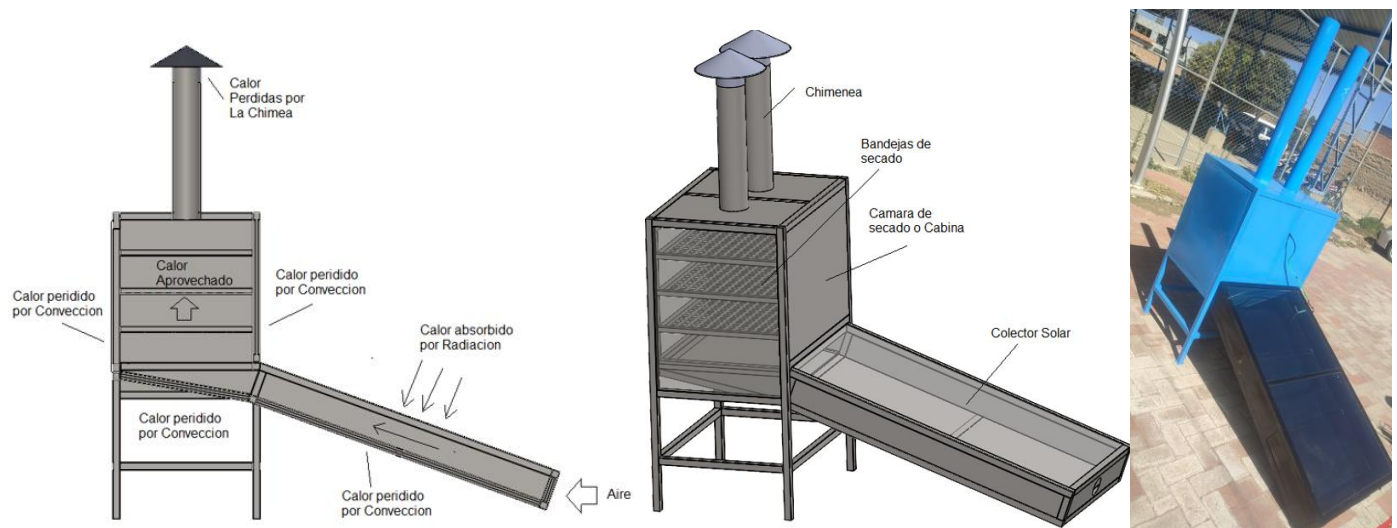


Figura 1. Configuración térmica de la plataforma experimental y prototipo mecánico construido; se observan las dos chimeneas de convección natural instaladas en paralelo.

Tabla 1. Secuencia metodológica de diseño e instrumentación de la plataforma experimental

#	Etapas	Ecuación / Método	Resultado
1	Condiciones de diseño	Datos SENAMHI, altitud	$I_t=700 \text{ W/m}^2$, $T_a=18^\circ\text{C}$, $P_a=72.41 \text{ kPa}$
2	Propiedades del aire	Gas ideal, ecuación de Magnus	$\rho_a=0.867 \text{ kg/m}^3$, $\omega_e=0.0108 \text{ kgv/kgas}$
3	Balance de masa del caso base	Conservación de masa (X_i , X_f)	$m_s=0.50 \text{ kg}$; $m_w=1.944 \text{ kg/lote}$
4	Colector solar (HWB)	Ec. (1): $Q_u=FR \times A_c \times [\dots]$	$A_c=0.812 \text{ m}^2$; $Q_u=284.5 \text{ W}$; $\eta_c=50\%$
5	Balance energético	$Q_u = \dot{m}_a \times \Delta \omega \times h_{fg} + Q_p + Q_{chim}$	$\dot{m}_a=3.08 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$; $\dot{m}_w=5.91 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$
6	Pérdidas por paredes	Resistencias térmicas en serie	$U_p=1.075 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Q_p=105.3 \text{ W}$
7	Tiempo de secado	$t = m_w / \dot{m}_w$; $t_r = f_c \times t$	$t=9.14 \text{ h}$; $t_r=13.7 \text{ h}$ (≈ 2 jornadas)
8	Chimeneas	Ecs. (4)-(5); arreglo en paralelo	$V_{req}=3.55 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
9	Instrumentación	Arduino Nano + sensores + potenciómetro + Python + XLSX	T , HR , E_v , P , T_{set} y estado del ventilador
10	Protocolo	Pesaje externo + registro	m_i , m_f , Δm y tiempo

Nota: El factor de corrección $f_c=1.5$ contempla la variabilidad diaria de la irradiancia solar (perfil sinusoidal) y el período de calentamiento matutino del equipo [2].

2.2. Parámetros y Condiciones del Caso Base de Dimensionamiento

La Tabla 2 resume las condiciones climáticas y de proceso utilizadas para dimensionar el subsistema térmico. Estos valores corresponden al caso base de manzanilla y no constituyen condiciones fijas para todas las futuras campañas experimentales; la plataforma está concebida para registrar la variación real de las variables durante cada ensayo.

Tabla 2. Parámetros de diseño del caso base de manzanilla para los Valles de Cochabamba, Bolivia

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Irradiancia solar promedio	It	700	W/m ²
Temperatura ambiente	Ta	18	°C
Humedad relativa ambiente	HR	60	%
Altitud	z	2 740	m s.n.m.
Presión barométrica local	Pa	72.41	kPa
Temperatura de secado	Ti	42	°C
Temperatura de salida chimenea	Ts	30	°C
Humedad inicial, caso manzanilla (base húmeda)	Xi	0.80	kg/kg
Humedad final, caso manzanilla (base húmeda)	Xf	0.10	kg/kg
Capacidad de procesamiento por lote	mp	2.5	kg producto fresco
Transmitancia-absortancia del colector	$\tau\alpha$	0.85	adim.
Factor de remoción de calor	FR	0.82	adim.
Coefficiente global de pérdidas del colector	UL	7.0	W/m ² ·K
Ángulo de inclinación del colector	β	20	°

Nota: Fuente: Global Solar Atlas [3]; Lucano y Fuentes [5]; ASHRAE [4]; datos de SENAMHI Bolivia; elaboración propia.

2.3. Tecnología Apropiada y Construcción del Prototipo

El criterio de tecnología apropiada se aplica tanto al subsistema térmico como a la instrumentación: la plataforma debe poder construirse, mantenerse y repararse con recursos accesibles en el contexto local. Esto permite que el equipo funcione simultáneamente como infraestructura de investigación universitaria y como referencia tecnológica para aplicaciones de pequeña escala [19].

2.3.1. Materiales Disponibles Localmente

Los principales materiales del prototipo se resumen en la Tabla 3. La selección prioriza disponibilidad local, resistencia al ambiente de secado, facilidad de fabricación y compatibilidad con la instalación de sensores y del módulo electrónico.

Tabla 3. Materiales principales de la plataforma experimental de deshidratación solar

Material	Especificación	Función
Vidrio claro templado	e=4 mm, 1.18×0.62 m	Cubierta colector
Lámina galvanizada negra	Cal. 28, pintura alta T°	Placa absorbadora
Estructura metálica	Perfiles inox y galv.	Estructura general
Espuma de poliuretano	e=29 mm, k=0.038 W/mK	Aislante paredes
Malla metálica inox.	4 mm cuadrícula, 1 m ²	3 bandejas de secado
Tubo PVC o galvaniz. (×2)	ø 114 mm, 0.70 m c/u	Chimeneas de tiraje (2 unidades)
Madera tratada	Bastidor cabina	Marco estructural
Pintura negra alta T°	>120 °C, 0.3 L	Tratamiento absorbador
Adquisición y registro	Arduino Nano; Shield; pot. 10 kΩ; SHT31×2; DS18B20; BMP085; BH1750	Sistema de adquisición
Mano de obra total	Mecánica + eléctrica	Construcción y ensamble
Balanza externa	Pesaje fuera de cámara	Masa inicial y final
Impulsión de aire	FS12038 DP200 + SRD-05VDC-SL-C	Ventilador + relé

2.3.2. Proceso de Fabricación Artesanal

El equipo puede ser construido en aproximadamente 40 horas-hombre por dos personas con conocimientos básicos de soldadura, carpintería y corte de chapa metálica, herramientas comunes en cualquier taller rural de los Valles de Cochabamba. El proceso se divide en cinco etapas:

1. **Colector solar:** corte y armado del marco metálico, colocación del aislante (espuma o cartón alveolar), instalación de la placa absorbente de acero galvanizado pintado de negro mate de alta temperatura y fijación de la cubierta de vidrio con silicona selladora.
2. **Cámara de secado:** construcción del cajón tipo sándwich (lámina exterior + espuma de poliuretano 29 mm + lámina interior) con puerta trasera de inspección. La espuma es el aislante crítico que reduce U_p a $1.075 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (resistencias térmicas en serie [20]).
3. **Bandejas:** tres marcos rectangulares de perfiles metálicos con malla inoxidable de 4 mm. Superficie total de carga: 1.00 m^2 ($\approx 0.33 \text{ m}^2$ por bandeja) para 2.5 kg de producto fresco (caso manzanilla, 2.5 kg/m^2).
4. **Chimeneas:** dos tubos de PVC o galvanizado de $\varnothing 114 \text{ mm}$ y 70 cm de longitud cada uno. El cálculo indica que esta configuración proporciona capacidad teórica suficiente para la evacuación pasiva del aire por tiraje natural, incluso a la reducida densidad del aire de los Valles de Cochabamba. El ventilador del modo experimental cumple una función diferente: se instala en la entrada inferior frontal del colector para impulsar aire ambiente a través del colector y hacia la cámara, no para realizar la extracción por las chimeneas.
5. **Ensamble final:** el colector se acopla a la cámara por la parte inferior con un ángulo de inclinación de 20° hacia el norte (hemisferio sur). Las dos chimeneas se instalan en paralelo en la parte superior de la cámara (Figura 1). El equipo completo tiene dimensiones de $1.00 \times 0.85 \times 1.80 \text{ m}$.

El prototipo puede operar en dos modos claramente diferenciados. En modo térmico pasivo, el secado puede desarrollarse por circulación natural y evacuación mediante las chimeneas, sin intervención electrónica. En modo experimental, el sistema Arduino Nano-Python y los sensores forman parte esencial de la plataforma porque permiten registrar las variables del proceso y gobernar una impulsión forzada auxiliar. La temperatura objetivo T_{set} se ajusta físicamente mediante un potenciómetro de $10 \text{ k}\Omega$. Cuando la temperatura de la cámara T_c es inferior a T_{set} , el ventilador instalado en la entrada inferior frontal del colector toma aire del ambiente y lo impulsa a través del colector solar; el aire se calienta durante su recorrido y posteriormente ingresa a la cámara de deshidratado. Cuando T_c alcanza o supera la consigna, el ventilador se desconecta. Los datos del ensayo se almacenan para análisis posterior.

2.4. Instrumentación, Adquisición de Datos y Regulación Térmica

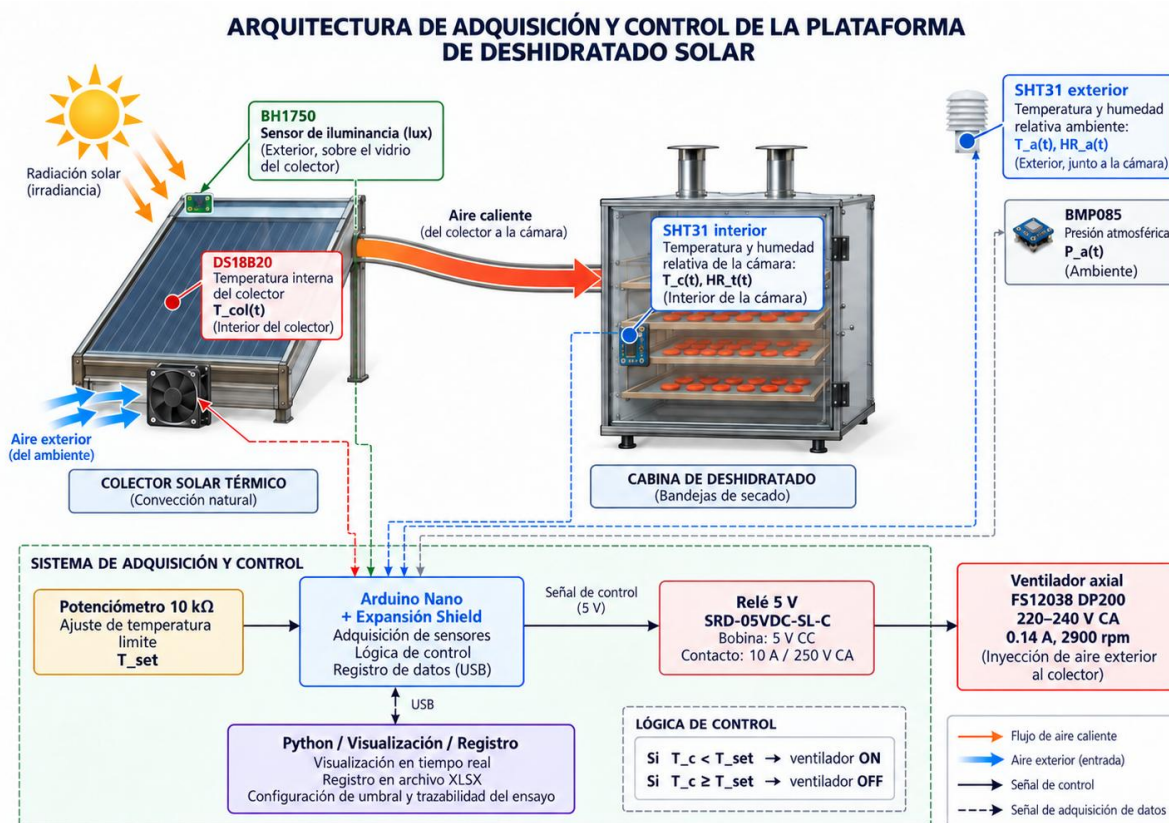
Para el modo experimental se integra un sistema de adquisición basado en Arduino Nano y una aplicación desarrollada en Python. El subsistema recibe las señales de los sensores, las presenta en tiempo real y registra las series temporales. La regulación térmica utiliza como consigna T_{set} el valor definido mediante un potenciómetro de $10 \text{ k}\Omega$. Mientras la temperatura de la cámara T_c permanezca por debajo de la consigna, el ventilador axial situado en la entrada inferior frontal del colector impulsa aire ambiente a través de la superficie calentada del colector y hacia la cámara; cuando T_c alcanza o supera T_{set} , el ventilador se desconecta.

La función científica de la instrumentación es asegurar trazabilidad: cada ensayo genera un registro temporal común para temperatura, humedad relativa, iluminancia solar y presión atmosférica. De esta manera pueden compararse jornadas y especies bajo

condiciones ambientales diferentes sin confundir los valores climáticos de diseño con las variables realmente observadas durante el proceso.

2.4.1. Arquitectura General del Sistema de Adquisición y Control

El sistema está conformado por una placa Arduino Nano basada en el microcontrolador ATmega328P, operando a 16 MHz y lógica de 5 V, montada sobre un Arduino Nano Expansion Shield y comunicada con la laptop mediante USB Mini-B [21]. La instrumentación incorpora dos sensores SHT31 para temperatura y humedad relativa [22]: uno instalado dentro de la cámara de deshidratado, que registra $T_c(t)$ y $HR_c(t)$ y cuya temperatura T_c actúa como variable de realimentación del control, y otro situado en el exterior de la cámara, que registra la temperatura y humedad relativa ambientales $T_a(t)$ y $HR_a(t)$. Un sensor DS18B20 se ubica en el interior del colector solar para registrar la temperatura del aire en el colector $T_{col}(t)$ [23]. El sensor BMP085 registra la presión atmosférica del ambiente [24]. El sensor BH1750 se instala en el exterior, sobre la cubierta de vidrio del colector, y registra la iluminancia incidente $E_v(t)$ en lux [25]. Un potenciómetro de 10 k Ω conectado a una entrada analógica establece la consigna térmica T_{set} utilizada por la lógica de control. La Figura 2 resume la ubicación de los sensores, la trayectoria del aire y la arquitectura de control, mientras que la Figura 3 muestra la interfaz principal de monitoreo y grabación. El BH1750 no sustituye a un piranómetro; por ello, sus lecturas no se convierten directamente a irradiancia en W/m² sin una calibración específica.



Nota: el BH1750 registra iluminancia en lux. La irradiancia de diseño I_t (W/m²) proviene de datos climáticos y no se infiere directamente del BH1750.

Figura 2. Arquitectura de adquisición y control de la plataforma experimental: BH1750 ubicado sobre el vidrio del colector; DS18B20 en el interior del colector; SHT31 para temperatura y humedad relativa dentro de la cámara y un segundo SHT31 en el exterior; BMP085 para presión atmosférica; consigna T_{set} ajustada mediante potenciómetro de 10 k Ω ; control Arduino Nano-relé; y ventilador axial situado en la entrada inferior frontal del colector. Cuando $T_c < T_{set}$, el ventilador introduce aire ambiente al colector, el flujo se calienta al atravesarlo y continúa hacia la cámara; cuando $T_c \geq T_{set}$, el ventilador se desconecta.



Figura 3. Estructura funcional de la interfaz de monitoreo y registro; la consigna Tset se ajusta físicamente mediante el potenciómetro y se visualiza junto con el estado del ventilador.

2.4.2. Variables Registradas Durante el Ensayo

Durante cada ensayo se registran de forma continua las siguientes variables: temperatura del aire en el interior del colector $T_{col}(t)$ mediante el DS18B20; temperatura $T_c(t)$ y humedad relativa $HR_c(t)$ dentro de la cámara mediante el SHT31 interior; temperatura ambiente $T_a(t)$ y humedad relativa $HR_a(t)$ mediante el SHT31 exterior; iluminancia incidente $E_v(t)$ mediante el BH1750 ubicado sobre el vidrio del colector; y presión atmosférica $P_a(t)$ mediante el BMP085. La temperatura T_c medida por el SHT31 interior es la variable utilizada por la lógica de regulación. La interfaz muestra además la consigna Tset definida por el potenciómetro y el estado ON/OFF del ventilador (Figura 4). La masa del producto no forma parte del registro continuo y se determina externamente al inicio y al final del ensayo, según el protocolo descrito en la Sección 2.5.

VARIABLES MEDIDAS Y LÓGICA DE REGULACIÓN



Figura 4. Variables registradas y lógica de regulación térmica basada en la consigna Tset ajustada mediante potenciómetro.

2.4.3. Puesta en Marcha y Visualización en Tiempo Real

Para iniciar un ensayo, el módulo de adquisición se conecta a la laptop mediante USB y se selecciona el puerto de comunicación correspondiente. El operador fija previamente la temperatura objetivo mediante el potenciómetro de 10 kΩ. Una vez establecida la conexión, la aplicación recibe y representa en tiempo real $T_{col}(t)$, $T_c(t)$, $HR_c(t)$, $T_a(t)$, $HR_a(t)$,

$E_v(t)$, $P_a(t)$, la consigna T_{set} y el estado del ventilador. De este modo puede verificarse simultáneamente la estabilidad de la comunicación, la respuesta térmica del colector, la evolución térmica e higrométrica de la cámara y las condiciones ambientales del ensayo (Figura 5).

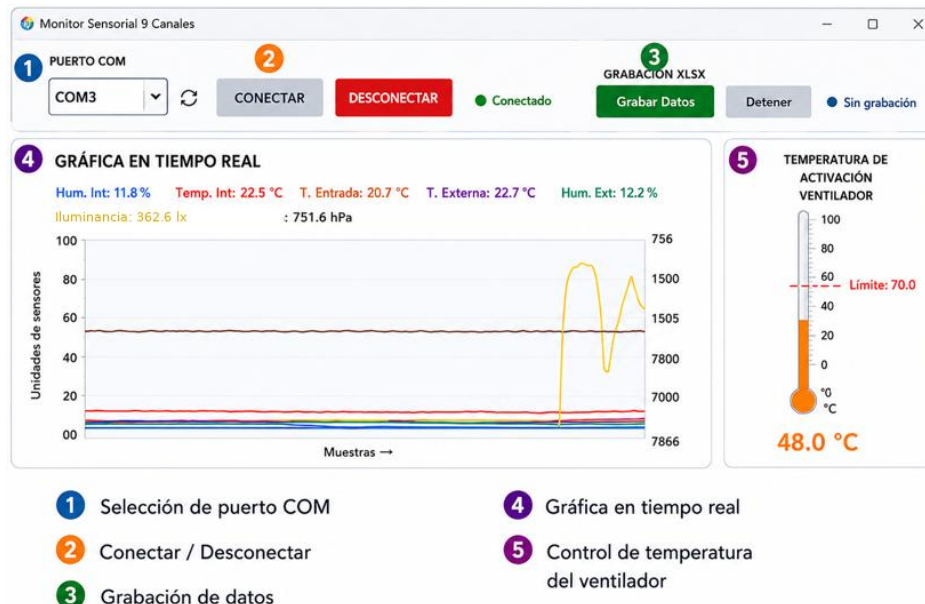


Figura 5. Gráfica en tiempo real de las variables térmicas, higrométricas, de iluminancia y presión registradas por la aplicación.

Estos perfiles temporales no deben interpretarse como una curva cinética de humedad del producto, ya que la plataforma no mide masa de forma continua. Su utilidad consiste en caracterizar las condiciones reales a las que estuvo sometido el material y relacionarlas posteriormente con la duración del ensayo, la masa inicial, la masa final y, cuando se disponga de una determinación externa, la humedad inicial y final.

2.4.4. Regulación Térmica ON/OFF con Consigna Ajustable

La temperatura objetivo T_{set} se establece mediante un potenciómetro de 10 k Ω , lo que permite adaptar el ensayo a la temperatura de secado requerida por cada especie (Figura 6). El Arduino Nano compara continuamente la temperatura de la cámara T_c , medida por el SHT31 instalado dentro de la cabina, con la consigna. Mientras $T_c < T_{set}$, activa un módulo relé de un canal basado en el SRD-05VDC-SL-C, con bobina de 5 V CC y contactos nominales de hasta 10 A a 250 V CA. El relé conmuta un ventilador axial FS12038 DP200 de 120 × 120 × 38 mm, alimentado a 220–240 V CA, 0.14 A, 50/60 Hz y 2900 rpm, instalado en la entrada inferior frontal del colector. Al activarse, el ventilador toma aire del ambiente y lo impulsa a través del colector; durante este recorrido el aire recibe energía solar térmica y posteriormente ingresa a la cámara de deshidratado. Cuando $T_c \geq T_{set}$, el relé se desactiva y el ventilador se detiene, interrumpiendo la impulsión forzada de aire a través del colector. En forma lógica, $u_f = 1$ para $T_c < T_{set}$ y $u_f = 0$ para $T_c \geq T_{set}$, donde u_f representa el estado del ventilador. Para el caso base de manzanilla se adopta $T_{set} = 42^\circ\text{C}$; para otras hierbas el operador modifica la consigna con el potenciómetro. Este esquema limita el aporte convectivo forzado, pero no constituye un control isotérmico perfecto: la inercia térmica puede producir pequeñas sobreoscilaciones, razón por la cual la temperatura de la cámara se registra durante todo el ensayo.

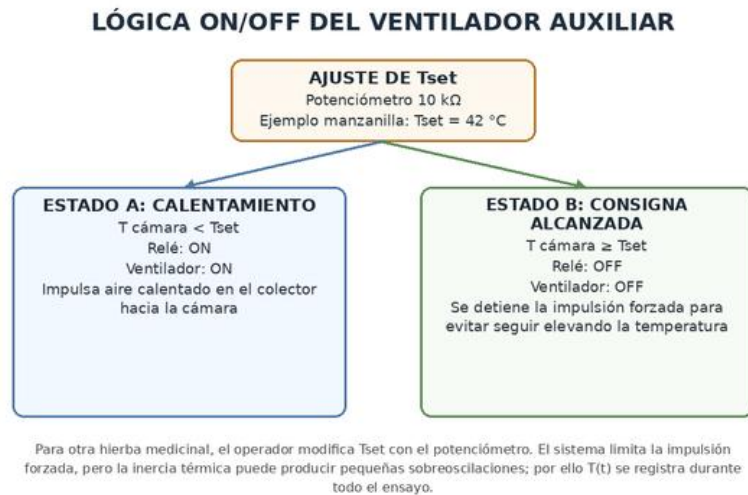


Figura 6. Lógica ON/OFF de la regulación térmica: ventilador activado por debajo de Tset y desconectado al alcanzar la consigna; ejemplo base para manzanilla, Tset = 42 °C.

2.4.5. Registro de Datos y Trazabilidad Experimental

La aplicación desarrollada en Python incorpora una función de grabación en formato XLSX, formato de hoja de cálculo elegido por su compatibilidad con herramientas de análisis y por facilitar el intercambio de datos. Cada archivo conserva la secuencia temporal de las variables registradas y permite comparar jornadas, identificar episodios de sobre-calentamiento y documentar las condiciones de cada ensayo (Figura 7).

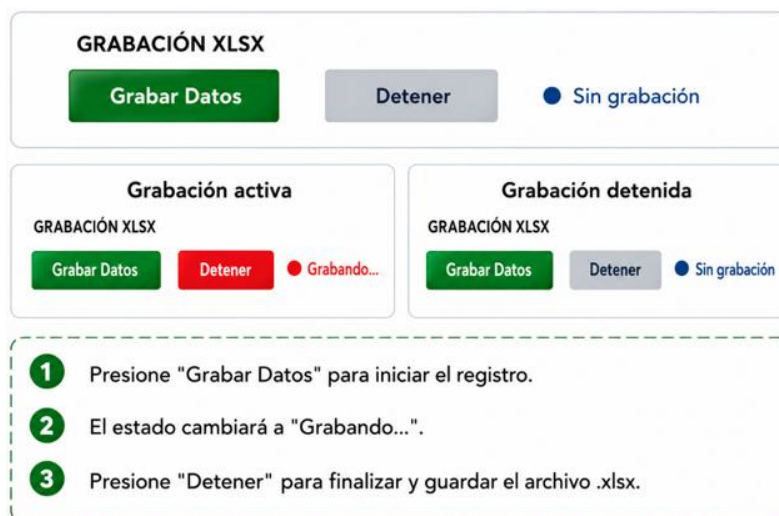


Figura 7. Función de grabación de datos utilizada para almacenar las mediciones del ensayo en formato XLSX.

En conjunto, el subsistema Arduino Nano-Python transforma el prototipo térmico en una plataforma de experimentación: integra adquisición multivariable, visualización, registro y regulación térmica mediante una consigna ajustable. El ventilador no genera calor; su función es aportar energía mecánica al flujo de aire. Cuando $T_c < T_{set}$, fuerza la entrada de aire ambiente por la zona inferior frontal del colector, obliga su paso a través del colector solar y favorece el transporte del aire calentado hacia la cámara. Cuando $T_c \geq T_{set}$, la impulsión forzada se detiene y la evacuación puede continuar por las chimeneas mediante tiraje natural. Esta arquitectura permite documentar y reproducir las condiciones de operación para comparar distintos ensayos sobre una base común.

2.5. Protocolo Experimental y Variables de Caracterización

El protocolo separa las variables registradas automáticamente de las magnitudes determinadas fuera de la cámara. Antes de cada ensayo se identifica la especie, se acondiciona una cantidad definida de producto, se determina su masa inicial m_i con una balanza externa y se ajusta mediante el potenciómetro la consigna T_{set} correspondiente a la temperatura de secado seleccionada. A continuación se inicia el registro digital. Durante el ensayo, si $T_c < T_{set}$, el ventilador introduce aire ambiente por la entrada inferior frontal del colector y lo obliga a recorrer el colector solar antes de ingresar calentado a la cámara; cuando $T_c \geq T_{set}$, el ventilador se desconecta. El ensayo concluye según el criterio establecido para la especie o el programa experimental, momento en el que se determina la masa final m_f con la misma balanza. La pérdida global de masa se calcula como $\Delta m = m_i - m_f$.

El uso de una balanza externa evita instalar celdas de carga dentro de la cámara, donde las variaciones de temperatura, la dilatación de la estructura y las corrientes de aire podrían introducir deriva o requerir procedimientos adicionales de compensación. En consecuencia, la plataforma no pretende obtener $m(t)$, $X(t)$ o moisture ratio de forma continua. Su alcance es caracterizar las condiciones de proceso mediante $T(t)$, $HR(t)$, $E_v(t)$ y $P(t)$, donde E_v representa iluminancia en lux, y asociarlas con m_i , m_f , Δm y el tiempo total de ensayo.

La Tabla 4 resume las variables de caracterización, los componentes de instrumentación utilizados, la modalidad de registro y la especificación nominal relevante para la reproducibilidad del sistema.

Tabla 4. Variables, instrumentación y modalidad de registro de la plataforma experimental

Variable / función	Sensor / punto	Registro	Especificación nominal / finalidad
Adquisición y control	Arduino Nano + Expansion Shield + USB Mini-B	Continuo	ATmega328P; 16 MHz; lógica 5 V [21]
T cámara y HR interna	SHT31 / interior cámara	Continuo	$T_c(t)$, $HR_c(t)$; T_c realimenta el control; $\pm 2\%$ RH típ.; $\pm 0.2\%$ °C típ. [22]
T y HR ambientales	SHT31 / exterior cámara	Continuo	$T_a(t)$, $HR_a(t)$; condiciones de contorno; $\pm 2\%$ RH típ.; $\pm 0.2\%$ °C típ. [22]
T interna del colector	DS18B20 / interior colector	Continuo	$T_{col}(t)$; -55 a 125% °C; $\pm 0.5\%$ °C (-10 a 85% °C); 9–12 bits [23]
Iluminancia E_v	BH1750 / sobre vidrio colector	Continuo	$E_v(t)$, lux; 1–65 535 lx; I ² C [25]; no equivale directamente a irradiancia
Presión atmosférica	BMP085 / ambiente	Continuo	$P_a(t)$; 300–1100 hPa; res. 0.01 hPa; ± 1 hPa típ. [24]
Regulación e impulsión	Pot. 10 k Ω + Arduino + relé + ventilador (entrada colector)	T_{set} + ON/OFF	ON si $T_c < T_{set}$; OFF si $T_c \geq T_{set}$; relé 5 V; ventilador 220–240 V CA, 0.14 A, 2900 rpm
Masa m_i , m_f	Balanza externa	Inicial / final	Pérdida global Δm ; sin pesaje continuo
Tiempo	Software Python	Continuo	Duración y marca temporal del ensayo

Para comparaciones entre especies o temperaturas, deben mantenerse documentados la masa inicial, la geometría de carga, el criterio de finalización, la consigna T_{set} establecida con el potenciómetro y las condiciones ambientales de cada prueba. Cuando se requiera humedad inicial o final del producto, esta debe determinarse mediante un método externo de referencia y reportarse separadamente; el presente diseño no infiere la humedad instantánea a partir de la masa.

2.6. Estrategia de Validación Funcional de la Plataforma

La validación funcional se plantea en dos niveles. El primero verifica la cadena de adquisición mediante contraste de los canales de temperatura, humedad relativa, iluminancia y presión con instrumentos de referencia, verifica que el BH1750 no opere en saturación bajo las condiciones de ensayo y comprueba la estabilidad del registro temporal, la comunicación Arduino Nano-Python y la lógica de actuación del conjunto potenciómetro-Arduino-relé-ventilador: ventilador ON cuando $T_c < T_{set}$ y OFF cuando $T_c \geq T_{set}$. El segundo aplica el protocolo a ensayos de secado, registrando las variables continuas junto con la masa inicial, la masa final y el tiempo total. En ambos niveles deben documentarse la frecuencia de muestreo, la consigna T_{set} , el criterio de finalización y las condiciones ambientales. La irradiancia solar utilizada en el dimensionamiento térmico se toma de fuentes climáticas o de un piranómetro de referencia cuando esté disponible; el BH1750 se utiliza exclusivamente como canal de iluminancia.

El presente artículo define este procedimiento como requisito para la siguiente campaña experimental; no se presentan como resultados mediciones que todavía no hayan sido obtenidas. La comparación cuantitativa con literatura experimental deberá realizarse una vez que existan datos propios generados bajo este protocolo.

3. Resultados del Diseño y Capacidad Experimental Prevista

3.1. Balance de Masa del Caso Base de Dimensionamiento

Para dimensionar el subsistema térmico se adopta como caso base un lote de 2.5 kg de manzanilla fresca con humedad inicial $X_i = 80\%$ en base húmeda. Este valor se utiliza como condición de cálculo y no como resultado de una campaña experimental. La masa de sólido seco se obtiene, a partir del balance de masa de secado [26], mediante la Ec. (6):

$$m_s = m_p(1 - X_i) = 2.5(0.20) = 0.50 \text{ kg} \quad (6)$$

Convirtiendo el contenido de humedad a base seca ($X_{i,bs} = 4.0$; $X_{f,bs} = 0.111 \text{ kgH}_2\text{O/kgms}$), el agua a remover en el caso base se determina con la Ec. (7):

$$m_w = m_s(X_{i,bs} - X_{f,bs}) = 0.50(3.889) = 1.944 \text{ kg} \quad (7)$$

El cálculo conduce a una masa final teórica de 0.556 kg y a una remoción de 1.944 kg de agua por lote. En los ensayos reales, m_i y m_f deberán obtenerse mediante pesaje externo y compararse con estos valores de diseño.

3.2. Dimensionamiento del Colector Solar y Calor Útil

Con dimensiones de colector $L_c = 1.25 \text{ m}$ y $W_c = 0.65 \text{ m}$, el área activa es $A_c = 0.812 \text{ m}^2$. Aplicando el modelo HWB (Ec. (1)) con los parámetros de la Tabla 2 (Ecs. (8)–(9)):

$$Q_u = 0.82 \times 0.812[700 \times 0.85 - 7.0(42 - 18)] \quad (8)$$

$$Q_u = 0.82 \times 0.812(595 - 168) = 284.5 \text{ W} \quad (9)$$

La eficiencia térmica calculada del colector es $\eta_c = Q_u / (A_c \times I_t) = 284.5 / 568.4 = 50.0\%$. Este valor se utiliza para dimensionar la capacidad térmica de la plataforma y deberá contrastarse posteriormente con mediciones bajo condiciones reales de irradiancia, siguiendo métodos normalizados de ensayo de colectores [1], [27].

3.3. Balance Energético y Flujo de Aire del Caso Base

El balance energético distribuye el calor útil entre tres términos: evaporación del agua del producto, pérdidas por paredes y calor sensible evacuado por la chimenea. Resolviendo para el flujo másico de aire (Ecs. (10)–(12)):

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_a \Delta \omega h_{fg} = 46\,119 \dot{m}_a \quad (10)$$

$$Q_{chim} = \dot{m}_a c_p (T_s - T_a) = 12\,060 \dot{m}_a \quad (11)$$

$$\dot{m}_a = \frac{284.5 - 105.3}{46\,119 + 12\,060} = 3.08 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \quad (12)$$

La tasa de evaporación resultó $\dot{m}_w = \dot{m}_a \Delta \omega = 5.91 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$. El balance cierra de forma exacta ($Q_{evap} + Q_p + Q_{chim} = 142.0 + 105.3 + 37.2 = 284.5 \text{ W} = Q_u$) porque $\dot{m}_a$ se obtuvo precisamente despejándolo de esta misma ecuación de balance (Ecs. (10)–(12)); este cierre es, por tanto, una consecuencia algebraica del método de solución empleado y no debe interpretarse como una validación independiente del modelo.

La distribución calculada del calor útil es 49.9 % para evaporación, 37.0 % para pérdidas por paredes y 13.1 % para calor sensible evacuado. Las paredes tipo sándwich con núcleo de espuma de poliuretano ($k = 0.038 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $e = 29 \text{ mm}$) reducen las pérdidas frente a una pared sin aislamiento y estabilizan el ambiente térmico de la cámara.

3.4. Duración Teórica del Caso Base

El tiempo teórico de secado bajo irradiancia constante es (Ec. (13)):

$$t = \frac{m_w}{\dot{m}_w} = \frac{1.944}{5.91 \times 10^{-5}} = 32\,893 \text{ s} = 9.14 \text{ h} \quad (13)$$

Aplicando el factor de corrección $f_c = 1.5$ para contemplar el perfil sinusoidal real de la irradiancia y el calentamiento matutino (Ec. (14)):

$$t_r = f_c t = 1.5(9.14) = 13.7 \text{ h} \quad (14)$$

Con aproximadamente 7 h efectivas de sol por día, el cálculo conduce a una duración estimada de 13.7 h efectivas, equivalente a aproximadamente dos jornadas solares. Este tiempo es un valor de diseño; la duración experimental deberá obtenerse para cada especie y condición de operación a partir del registro real del ensayo y del criterio de finalización.

3.5. Capacidad Teórica de Evacuación por Convección Natural

El prototipo incorpora dos chimeneas idénticas de $H_{ch} = 0.70 \text{ m}$ y $D_{ch} = 114 \text{ mm}$ instaladas en paralelo (Figura 1). Las Ecs. (15)–(17) se aplican a una chimenea individual para estimar el tiraje y la capacidad de evacuación:

$$\Delta P_{ch} = (0.867 - 0.833)(9.81)(0.70) = 0.234 \text{ Pa} \quad (15)$$

$$v_{ch} = 0.65 \sqrt{\frac{2(0.234)}{0.833}} = 0.487 \text{ m/s} \quad (16)$$

$$\dot{V}_{ch} = v_{ch} A_{ch} = 0.487(0.01021) = 4.97 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (17)$$

El caudal volumétrico requerido por la cámara, obtenido a partir del flujo másico de aire del balance, es $V_{req, total} = 3.55 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. La capacidad teórica de una chimenea es $\dot{V}_{ch} = 4.97 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, aproximadamente 40 % superior al requerimiento total. Para dos chimeneas idénticas operando en paralelo, la capacidad geométrica teórica combinada es $9.94 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a un margen aproximado del 180 % respecto al caudal requerido. Este valor debe interpretarse como capacidad teórica de diseño; la distribución real del flujo entre ambas chimeneas deberá verificarse experimentalmente.

La Tabla 5 sintetiza los principales resultados del dimensionamiento del caso base y distingue los valores calculados de las magnitudes que requieren verificación experimental.

Tabla 5. Síntesis de resultados del dimensionamiento del caso base

Parámetro / Resultado	Expresión	Valor	Unidad
Área del colector solar	$A_c = L_c \times W_c$	0.812	m ²
Calor útil del colector	Q_u (HWB, Ec. (1))	284.5	W
Eficiencia térmica del colector	$\eta_c = Q_u / (A_c \times I_t)$	50.0	%
Densidad del aire (altitud)	$\rho_a = P_a / (R_a \times T_a)$	0.867	kg/m ³
Humedad específica entrada	ω_e (Magnus + Dalton)	0.0108	kgv/kgas
Humedad específica salida	ω_s (Ts, HR de salida = 78 %)	0.0300	kgv/kgas
Flujo másico de aire	$\dot{m}_a$ (balance energético)	3.08×10^{-3}	kg/s
Masa de agua evaporada por lote	$m_w = \dot{m}_s \times (\Delta X_{bs})$	1.944	kg/lote (teórico)
Pérdidas por paredes	$Q_p = U_p \times A_p \times \Delta T$	105.3	W
Tiempo teórico de secado	$t = m_w / \dot{m}_w$	9.14	h
Tiempo real estimado	$t_r = f_c \times t$	13.7	h (≈ 2 jornadas)
Tiraje térmico de chimenea	ΔP_{ch} (Ec. (15))	0.234	Pa
Caudal requerido total	$V_{req} = \dot{m}_a / \rho_a$	3.55×10^{-3}	m ³ /s
Diámetro nominal chimenea	D_{ch}	114	mm
Superficie total de secado (3 bandejas)	$A_{t,total} \approx 3 \times 0.333$	1.00	m ²
Coef. global de pérdidas por paredes	U_p (series térmicas)	1.075	W/m ² ·K
Caudal teórico por chimenea	V_{ch} (Ec. (17))	4.97×10^{-3}	m ³ /s
Capacidad teórica total (2 chimeneas)	$2 \times V_{ch}$	9.94×10^{-3}	m ³ /s
Margen teórico combinado	$(2V_{ch} - V_{req}) / V_{req}$	180	%

Nota: Fuente: elaboración propia. Los valores corresponden al caso base con $I_t = 700$ W/m², $T_a = 18$ °C, HR = 60 % y $z = 2\,740$ m s.n.m. La capacidad combinada de las dos chimeneas es una estimación teórica; no constituye una medición experimental del caudal real.

3.6. Capacidad Funcional Prevista de la Plataforma de Instrumentación

Desde el punto de vista funcional, la arquitectura desarrollada está diseñada para obtener registros sincronizados de $T(t)$, $HR(t)$, $E_v(t)$ y $P(t)$, junto con el estado de la regulación auxiliar y el tiempo de ensayo. Estos datos se almacenan en XLSX y pueden utilizarse para comparar la respuesta de la cámara entre jornadas y entre especies. La masa se incorpora al análisis únicamente mediante m_i y m_f medidos externamente. Por tanto, el resultado experimental previsto es una caracterización multivariable del proceso y no una curva cinética continua $X(t)$ o $MR(t)$.

Esta delimitación es metodológicamente relevante: evita atribuir a la plataforma una capacidad de medición que no posee y permite concentrar la validación futura en repetibilidad de sensores, estabilidad de los registros, respuesta de la regulación térmica y comparación de pérdida global de masa y tiempo de secado entre tratamientos.

4. Discusión

El aporte principal del trabajo no es la novedad geométrica del secador solar, configuración ampliamente documentada en la literatura, sino la integración de una infraestructura térmica de bajo costo con una arquitectura de instrumentación orientada a ensayos comparativos. El caso base demuestra que el subsistema térmico puede dimensionarse para las condiciones de altitud de Cochabamba, mientras que la adquisición Arduino Nano-Python está concebida para proporcionar la trazabilidad necesaria para registrar cómo varían las condiciones reales de operación.

La convección natural se mantiene como mecanismo básico de evacuación por las chimeneas, mientras que el ventilador cumple una función distinta: en modo experimental proporciona impulsión forzada en la entrada inferior frontal del colector cuando $T_c <$

Tset. El aire exterior atraviesa el colector, se calienta y llega a la cámara; al alcanzarse la consigna, el ventilador se desconecta para detener esa aportación convectiva forzada. Esta estrategia permite ajustar la temperatura objetivo según la especie mediante el potenciómetro, sin convertir el sistema en un secador de calefacción eléctrica. El cálculo muestra además que una sola chimenea tendría, en teoría, capacidad superior al caudal total requerido, mientras que las dos chimeneas instaladas incrementan la capacidad de evacuación y aportan redundancia. La distribución real del flujo, la relación entre impulsión forzada y tiraje natural y la respuesta dinámica de la temperatura deben verificarse experimentalmente.

La decisión de no incorporar celdas de carga internas responde al objetivo de mantener una plataforma robusta y replicable. Un sistema de pesaje instalado dentro de la cámara estaría sometido a temperatura variable, dilataciones de la estructura y circulación de aire, factores que exigirían compensación y calibración adicional. El pesaje externo al inicio y al final simplifica el protocolo y permite comparar pérdida global de masa, pero impone una limitación explícita: la plataforma no determina la cinética de humedad de manera continua. Los registros obtenidos deben interpretarse como perfiles de condiciones del proceso.

Para fortalecer el valor científico de la plataforma, las campañas futuras deberían comparar una misma especie bajo diferentes umbrales térmicos y, posteriormente, diferentes especies con protocolos equivalentes. Los registros de temperatura, humedad relativa, iluminancia y presión permitirían contextualizar las diferencias de tiempo y pérdida global de masa. Este enfoque responde a la necesidad señalada por la literatura de contrastar cuantitativamente el desempeño de sistemas de secado y evita depender únicamente de rangos generales [8], [11], [12], [28]. Cuando se requiera relacionar directamente la respuesta con irradiancia solar en W/m^2 , deberá incorporarse un piranómetro de referencia o una calibración específica del canal óptico.

La principal limitación del presente trabajo es que todavía no se reporta una campaña experimental sistemática con series temporales obtenidas bajo un protocolo comparativo. El prototipo mecánico proporciona la base física y la arquitectura de instrumentación define el procedimiento de adquisición, pero la validación funcional deberá incluir, como mínimo, verificación de los canales de medida frente a instrumentos de referencia, estabilidad del registro, comprobación de la consigna obtenida mediante el potenciómetro, respuesta ON/OFF del conjunto relé-ventilador, posibles sobreoscilaciones térmicas, determinación de masa inicial y final y repetibilidad entre ensayos. Una vez completada esta etapa, podrán incorporarse comparaciones cuantitativas con sistemas experimentales publicados y, cuando corresponda, análisis independiente de humedad o compuestos bioactivos.

4.1. Sostenibilidad y Pertinencia de la Plataforma

Durante la operación térmica pasiva, el aporte de calor proviene de energía solar y no requiere combustión ni resistencias eléctricas. Por ello, el sistema evita emisiones directas asociadas a la generación de calor durante el ensayo. Esta afirmación se limita a la fase de operación y no constituye un análisis de ciclo de vida de materiales, fabricación o electrónica.

Como escenario comparativo, un secador eléctrico resistivo que suministrara una energía térmica equivalente a la requerida por el caso base consumiría energía de red en cada lote. En la plataforma propuesta, el calor se obtiene de la radiación solar; la energía eléctrica del ventilador se utiliza exclusivamente para impulsar aire ambiente a través del colector y favorecer su transporte hacia la cámara, además del consumo reducido del sistema de adquisición. Estos consumos auxiliares deberán cuantificarse en la campaña experimental para determinar la demanda eléctrica real por ensayo.

Desde la perspectiva ambiental, la sustitución de fuentes térmicas basadas en combustibles puede reducir emisiones directas durante el secado. El beneficio efectivo dependerá del sistema sustituido, del número de ciclos de operación y de la energía auxiliar utilizada, por lo que las estimaciones anuales deben interpretarse como escenarios y no como resultados medidos del presente estudio.

Para hierbas medicinales, la selección de intervalos moderados de temperatura busca reducir el riesgo de degradación térmica de compuestos sensibles. En el caso de la manzanilla, el rango de 35–45 °C se adopta con apoyo en la literatura [6]–[8]. Sin embargo, el presente trabajo no mide la concentración de principios activos y, por tanto, no afirma que una temperatura determinada garantice por sí sola la calidad medicinal del producto.

La ausencia de humo y residuos de combustión favorece la compatibilidad del equipo con procesos de producción limpia. La eventual certificación orgánica de un producto depende, no obstante, del conjunto de prácticas de cultivo, manejo, procesamiento y trazabilidad, y no exclusivamente del tipo de secador utilizado.

5. Conclusiones

El trabajo plantea el deshidratador solar como una plataforma experimental cuyo propósito principal es documentar de manera reproducible las condiciones del proceso de secado y facilitar ensayos comparativos con hierbas medicinales. De la arquitectura propuesta y del caso base de dimensionamiento se obtienen las siguientes conclusiones:

1. La plataforma integra un subsistema térmico solar, adquisición Arduino Nano-Python, visualización en tiempo real, registro XLSX y regulación térmica ON/OFF mediante una consigna T_{set} ajustable con potenciómetro, un relé de 5 V y un ventilador axial de 220–240 V CA instalado en la entrada inferior frontal del colector. En modo experimental, la instrumentación y la lógica de control son componentes esenciales y no accesorios.
2. Las variables registradas continuamente son $T_{col}(t)$ mediante el DS18B20 situado dentro del colector; $T_c(t)$ y $H_{Rc}(t)$ mediante el SHT31 instalado dentro de la cámara; $T_a(t)$ y $H_{Ra}(t)$ mediante el SHT31 exterior; $E_v(t)$ mediante el BH1750 ubicado sobre el vidrio del colector; y $P_a(t)$ mediante el BMP085. La masa se determina únicamente al inicio y al final con una balanza externa; por ello, la plataforma caracteriza perfiles del proceso y pérdida global de masa, pero no mide directamente $m(t)$, $X(t)$ o $MR(t)$. La irradiancia solar en W/m^2 empleada en el dimensionamiento constituye una variable climática de diseño independiente del canal BH1750.
3. El caso base de manzanilla a 2 740 m s.n.m. conduce a un colector de 0.812 m^2 y 284.5 W de calor útil calculado, con una eficiencia térmica de diseño del 50 % y una duración estimada de 13.7 h efectivas, aproximadamente dos jornadas solares.
4. El caudal requerido por la cámara es $3.55 \times 10^{-3} m^3/s$. La capacidad teórica calculada de una chimenea es $4.97 \times 10^{-3} m^3/s$ y la de dos chimeneas en paralelo $9.94 \times 10^{-3} m^3/s$. La distribución real del flujo y el margen efectivo deben verificarse experimentalmente.
5. El intervalo térmico adoptado para el caso de manzanilla se selecciona para reducir el riesgo de degradación de compuestos termolábiles; la conservación efectiva de principios activos deberá comprobarse mediante análisis químico independiente y no puede inferirse únicamente de la temperatura de operación.
6. El uso de tecnología apropiada permite construir y mantener la plataforma con materiales y recursos disponibles localmente. La posibilidad de modificar T_{set} mediante un potenciómetro permite adaptar el protocolo a diferentes hierbas medicinales sin alterar la arquitectura básica de control, mientras la adquisición digital conserva la trazabilidad de cada ensayo.

7. La siguiente etapa necesaria es una campaña experimental sistemática que evalúe repetibilidad, calibración, correspondencia entre la consigna Tset y la temperatura real de la cámara, respuesta ON/OFF del ventilador, posibles sobreoscilaciones y comportamiento de diferentes hierbas. Estos datos permitirán evaluar si la plataforma diseñada puede constituirse en una fuente de evidencia comparativa sobre procesos de deshidratación en condiciones andinas.

Contribuciones de Autores: Conceptualización, P.M.L.; metodología, P.M.L.; software, P.M.L.; verificación del modelo analítico, P.M.L. y M.M.N.; análisis formal, P.M.L.; investigación, P.M.L. y M.M.N.; recursos, P.M.L.; redacción (borrador original), P.M.L.; redacción (revisión y edición), P.M.L. y M.M.N.; supervisión, P.M.L. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación recibió financiamiento externo de Metal Soluciones, empresa dedicada al diseño y fabricación de soluciones energéticas con tecnología apropiada.

Declaración de Disponibilidad de Datos: El presente artículo reporta un diseño analítico y una arquitectura de instrumentación, pero no una campaña experimental multi-especie. Los cálculos, hojas de trabajo y estructura de registro pueden solicitarse a los autores correspondientes. Los conjuntos de datos experimentales se generarán en la fase de validación de la plataforma.

Agradecimientos: A los productores de hierbas medicinales de los Valles de Cochabamba que inspiraron y justificaron el problema de investigación.

Conflictos de Interés: Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Referencias

- [1] A. Fudholi, K. Sopian, M. H. Ruslan, M. A. Alghoul, and M. Y. Sulaiman, "Review of solar dryers for agricultural and marine products," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 1–30, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.032.
- [2] V. Belessiotis and E. Delyannis, "Solar drying," *Solar Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 1665–1691, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2009.10.001.
- [3] World Bank Group and Solargis, "Global Solar Atlas." [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info>. [Accessed: Oct. 12, 2026].
- [4] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE Handbook—Fundamentals*, SI ed., ch. 1, "Psychrometrics." Atlanta, GA, USA: ASHRAE, 2017.
- [5] M. J. Lucano and I. E. Fuentes M., "Evaluation of the global solar radiation potential in the department of Cochabamba (Bolivia) using models of geographic information systems and satellite images," *Revista Boliviana de Física*, vol. 16, pp. 13–21, 2010.
- [6] A. M. Abbas, M. A. Seddik, A.-A. Gahory, S. Salaheldin, and W. S. Soliman, "Differences in the aroma profile of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) after different drying conditions," *Sustainability*, vol. 13, no. 9, Art. no. 5083, 2021, doi: 10.3390/su13095083.
- [7] S. Y. Lee, V. Ferdinand, and L. F. Siow, "Effect of drying methods on yield, physicochemical properties, and total polyphenol content of chamomile extract powder," *Frontiers in Pharmacology*, vol. 13, Art. no. 1003209, 2022, doi: 10.3389/fphar.2022.1003209.
- [8] P. Guillén-Velázquez, O. García-Valladares, I. Santos-González, M. G. Peña-Juárez, and A. Domínguez-Niño, "Impact of Solar Drying Techniques on Bioactive Composition and Antibacterial Activity of Chamomile (*Chamaemelum nobile* L.)," *Journal of Food Science*, vol. 90, no. 11, Art. no. e70670, 2025, doi: 10.1111/1750-3841.70670.
- [9] A. Sharma, C. R. Chen, and N. Vu Lan, "Solar-energy drying systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1185–1210, 2009.
- [10] İ. Doymaz, "Drying of green bean and okra under solar energy," *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, vol. 17, no. 2, pp. 199–205, 2011.
- [11] J. Peralta-Jaramillo, E. Delgado-Plaza, A. Rivera, D. Rivera, C. Polanco, J. Reinoso, I. Sosa-Tinoco, and X. Álvarez-Montero, "Design of a hybrid dryer for hemp flowers for the inter-Andean region of Ecuador," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 20, 2022, doi: 10.24084/repqj20.408.
- [12] J. R. Ayala Gonzáles, D. Marcelo-Aldana, and R. La Madrid Olivares, "Performance evaluation of a solar greenhouse dryer for coffee drying in the Peruvian high Andes: An energy, exergy, economic, and environmental approach," *International Journal of Exergy*, vol. 49, no. 4, pp. 318–333, 2026, doi: 10.1504/IJEX.2026.152943.

- [13] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- [14] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013.
- [15] O. A. Alduchov and R. E. Eskridge, "Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 35, no. 4, pp. 601–609, 1996, doi: 10.1175/1520-0450(1996)035<0601:IMFAOS>2.0.CO;2.
- [16] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.
- [17] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010.
- [18] World Health Organization, *WHO Monographs on Selected Medicinal Plants*, vol. 1. Geneva, Switzerland: WHO, 1999. ISBN 92-4-154517-8.
- [19] L. B. López-Sosa, J. Núñez-González, A. Beltrán, M. Morales-Máximo, M. Morales-Sánchez, M. Serrano-Medrano, and C. A. García, "A new methodology for the development of appropriate technology: A case study for the development of a wood solar dryer," *Sustainability*, vol. 11, no. 20, Art. no. 5620, 2019, doi: 10.3390/su11205620.
- [20] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [21] Arduino, "User Manual for the Arduino Nano," SKU A000005, Rev. 4, 2025. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>.
- [22] Sensirion AG, "Datasheet SHT3x-DIS: Humidity and Temperature Sensor," Version 7, Dec. 2022.
- [23] Analog Devices, "DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer," Rev. 6, 2019.
- [24] Bosch Sensortec, "BMP085 Digital Pressure Sensor Data Sheet," Rev. 1.0, doc. BST-BMP085-DS000-03, Jul. 2008.
- [25] ROHM Co., Ltd., "BH1750FVI Digital 16-bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC (Technical Note)," No. 11046EDT01, Rev. D, Nov. 2011.
- [26] C. J. Geankoplis, *Transport Processes and Separation Process Principles*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2003.
- [27] International Organization for Standardization, *Solar Energy—Solar Thermal Collectors—Test Methods*, ISO 9806:2023, Geneva, Switzerland, 2023.
- [28] E. K. Akpınar, "Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 12, pp. 2407–2418, 2010, doi: 10.1016/j.enconman.2010.05.005.

Nota del Editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente responsabilidad de los autores y colaboradores individuales, y no de Andean Journals ni de los editores. Andean Journals y/o los editores no se responsabilizan por daños a personas o bienes derivados de ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.