

Sistema híbrido con control PI para la temperatura en un deshidratador solar de coco



Colaboración

Roberto Tapia Torres; Santiago Arceo Díaz; Flabio Darío Mireles Delgado, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas; ; Elena Elsa Bricio Barrios; Ramona Evelia Chávez Valdez, Tecnológico Nacional de México, campus Colima

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2025

Fecha de aceptación: 02 de diciembre de 2025

Resumen: En la actualidad, el desperdicio de alimentos es una problemática que exige técnicas de preservación eficientes. Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema híbrido de deshidratado solar para coco, optimizado mediante un control PI basado en un microcontrolador ESP32 y un sistema de extracción de aire automatizado. El objetivo principal fue regular la temperatura de secado en 55 °C y homogeneizar la humedad interna, mitigando las limitaciones de los deshidratadores solares pasivos ante variaciones climáticas. Para la evaluación del prototipo, se realizó un estudio comparativo entre el proceso con control activo y sin él. Los resultados demostraron la efectividad del control para estabilizar las condiciones térmicas; puntualmente, se logró una humedad final promedio de 3.54 % con el sistema híbrido, frente a un 9.45 % registrado en el proceso sin control. Esto representa una mejora del 62 % en la reducción de humedad. El análisis estadístico mediante *t* de Student confirmó la significancia de estos resultados ($p < 0.05$), validando que la implementación tecnológica propuesta optimiza el tiempo de secado y asegura la calidad del producto final.

PALABRAS CLAVE: Alimentos deshidratados, Control PID, Deshidratador solar, Energía híbrida, Reducción de humedad.

Abstract: Currently, food waste is a problem that demands efficient preservation techniques. This work presents the design and implementation of a hybrid solar dehydration system for coconut, optimized via a PI control based on an ESP32 microcontroller and an automated air extraction system. The main objective was to regulate the drying temperature at 55 °C and homogenize internal humidity, mitigating the limitations of passive solar dehydrators facing climatic variations. For the prototype evaluation, a comparative study was conducted between the process with active control and the uncontrolled process. Results demonstrated the effectiveness of the control in stabilizing thermal conditions; specifically, an average final moisture content of 3.54% was achieved with the hybrid system, compared to 9.45% recorded in the process without control. This represents a 62% improvement in moisture reduction. Statistical analysis using Student's *t*-test confirmed the significance of these results ($p < 0.05$), validating that the proposed technological implementation optimizes drying time and ensures final product quality.

KEYWORDS: Dehydrated foods, Humidity reduction, Hybrid energy, PID control, Solar dehydrator.

INTRODUCCIÓN

El desperdicio de alimentos es un problema global que afecta significativamente la seguridad alimentaria. Específicamente en el sector de frutas y hortalizas, se estima que las pérdidas pueden alcanzar hasta el 45 % de la producción anual [1]. Aunque métodos convencionales como la cadena de frío ayudan a la preservación, estos incrementan los costos de producción y ofrecen un tiempo de vida útil limitado [2, 3]. En contraste, la construcción eficiente de secadores solares se plantea como una estrategia viable para reducir pérdidas postcosecha [4].

Existen distintos tipos de secadores solares, cada uno con características específicas para optimizar la calidad del producto final, tales como cuidar la conservación del color o textura, protegerlos de la contaminación por partículas de polvo o asegurar una temperatura óptima. Los secadores de exposición directa pueden deteriorar la calidad del alimento por radiación UV excesiva, mientras que el secado indirecto puede fomentar el crecimiento de microorganismos si las condiciones ambientales no son ideales. Por otro lado, los secadores híbridos alimentados por gas LP o resistencias eléctricas, aunque efectivos, representan una inversión elevada y un gasto operativo continuo [5]. Sin embargo, en términos de impacto ambiental y económico, se ha estimado que un secador solar puede ahorrar costos significativos en combustible y evitar la emisión de toneladas de CO₂ en comparación con sistemas convencionales de gas [6].

A pesar de estas ventajas, el control preciso de la temperatura y la humedad sigue siendo el factor crítico para optimizar el secado [7]. La implementación de tecnología para este fin puede ser de bajo costo; por ejemplo, existen diseños que permiten modular el flujo de aire de forma remota, mejorando la eficiencia [8]. Asimismo, la tendencia actual se orienta hacia sistemas inteligentes que emplean microcontroladores (como ESP32) y sensores (DHT22) para automatizar el monitoreo y registro de datos [9].

La literatura indica que para asegurar la inocuidad alimentaria es necesario inhibir la actividad microbiana mediante una regulación térmica adecuada. La implementación de controles básicos tipo on-off ha demostrado mejorar la homogeneidad del proceso [10]. No obstante, sistemas híbridos que integran algoritmos de control PI o PID logran una estabilización superior de las variables de temperatura y humedad, resultando en productos con menor humedad final y mejor calidad [11, 12]. Además, la integración de la energía solar no solo para el calefamiento, sino para alimentar los sistemas de control, favorece la autosuficiencia energética del equipo [13].

Considerando lo anterior, este trabajo propone el diseño e implementación de un sistema de control PI que transforma un deshidratador solar pasivo en un sistema híbrido. Esta propuesta busca reducir los costos operativos disminuyendo el uso de la red eléctrica, al tiempo que compensa las deficiencias de la variabilidad climática mediante calefacción auxiliar controlada. El objetivo es optimizar el proceso de secado específicamente para el coco, disminuyendo los tiempos de deshidratado y reduciendo el riesgo de contaminación o fermentación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caso de estudio y justificación

El presente estudio se realizó en colaboración con la empresa "Camparte S.A. de C.V.", ubicada en Cuyutlán, Colima, dedicada a la producción de deshidratados [15]. Aunque la empresa procesa diversos productos como

yaca, jamaica y mango, se seleccionó el coco (Cocos nucifera) como objeto de estudio debido a su relevancia económica y cultural en la región. México se posiciona como el cuarto productor mundial de este fruto y Colima destaca como el segundo productor a nivel nacional, aportando más de 300,000 toneladas anuales [14].

La abundancia de coco fresco y su alto contenido de humedad hacen de este fruto un candidato ideal para probar la eficiencia de remoción de agua del sistema, ya que es particularmente sensible al deterioro oxidativo si no se procesa adecuadamente. Optimizar las técnicas de secado no solo reduce el desperdicio, sino que permite aprovechar al máximo su valor comercial y propiedades nutricionales.

Descripción del sistema experimental

Se empleó un deshidratador solar de modo mixto con dimensiones de 81 x 81 x 146 cm. El equipo está acoplado a un colector solar de 81 x 30 x 120 cm que precalienta el aire, mientras que la estructura de la cámara permite también la incidencia de radiación solar sobre las charolas de producto. El flujo de aire se gestiona mediante convección natural asistida.

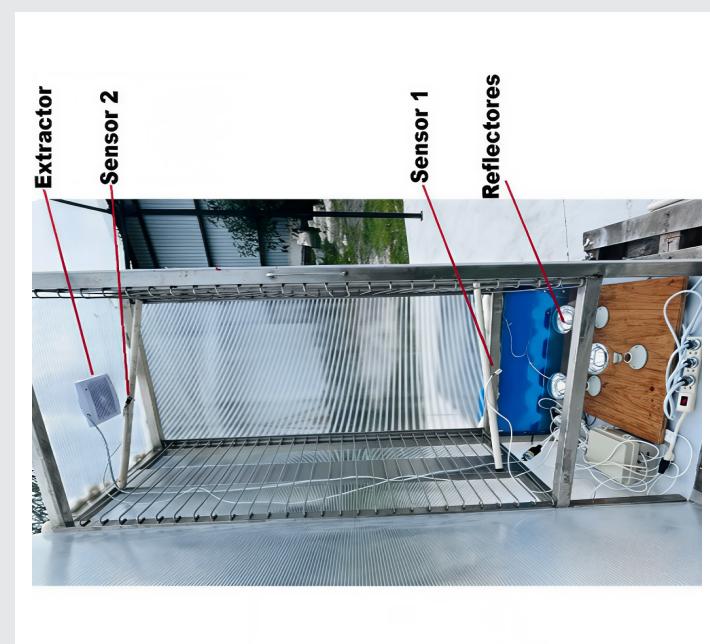


Figura 1. Secador solar analizado en este estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Para transformar el equipo en un sistema híbrido, se diseñó e implementó un módulo de control basado en un microcontrolador ESP32. El sistema de actuación térmica consta de tres reflectores incandescentes de 250 W ubicados en la base, regulados por un dimmer MY-9892 de 2000 W. Este actuador es controlado mecánicamente por un servomotor que modula el voltaje de alimentación según la señal de control. Todo el circuito de potencia, control y adquisición de datos fue ensamblado en una placa de circuito impreso (PCB) fabricada con

componentes estándar de electrónica comercial [16], protegida por una carcasa de PLA impresa en 3D.



Figura 2. PCB del controlador.

Fuente: Elaboración propia.

Para el monitoreo y control de la temperatura y humedad se instalaron sensores DHT22 (precisión $\pm 0.5^\circ\text{C}$ y $\pm 2\%$ HR) distribuidos estratégicamente:

Sensor 1 (Zona baja): Ubicado sobre los reflectores. Su lectura es la variable de retroalimentación principal para el control PI de temperatura.

Sensor 2 (Zona alta): Monitorea la humedad relativa en la salida de aire; este valor determina la activación del extractor para la renovación del aire saturado.

Sensor 3 (Colector/Exterior): Registra las condiciones de entrada como referencia comparativa.

Adicionalmente, se automatizó un extractor de aire en la chimenea, configurado para activarse cuando la temperatura inferior supera los 65°C o la humedad relativa superior excede el 35 %, favoreciendo así la homogeneidad térmica.

Diseño del control

La caracterización térmica se realizó mediante la respuesta al escalón en una cámara de prueba aislada, aplicando 120 V a la carga resistiva. A partir de la curva de reacción, se obtuvo un modelo de primer orden con retardo (Ec. 1), determinando una constante de tiempo = 54s. Los parámetros del controlador PI ($K_p=2.06$, $K_i=0.062$) se sintonizaron utilizando la herramienta PID Tuner de MATLAB/Simulink [17], priorizando la estabilidad sobre la velocidad de respuesta para evitar oscilaciones térmicas.

$$G(s) = \frac{d}{s + b} \quad \text{Ec. (1)}$$

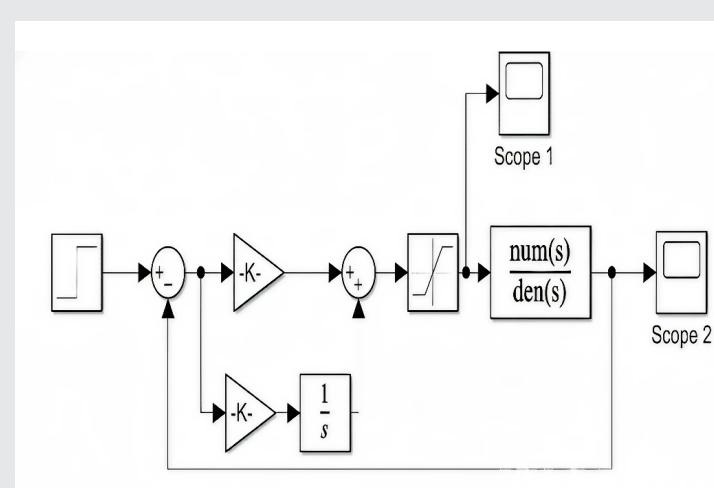


Figura 3. Simulación Simulink para obtener las ganancias del controlador.

Fuente: Elaboración propia.

Protocolo experimental y análisis estadístico

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en enero de 2025, utilizando coco rallado fresco distribuido en cuatro charolas con una carga inicial aproximada de 750 g cada una. Se estableció un diseño comparativo con dos tratamientos:

Secado híbrido controlado: Se configuró un set-point de 55°C , temperatura seleccionada para maximizar la evaporación sin degradar las propiedades organolépticas del coco. Asimismo, se habilitó la extracción automática, sistema que fuerza la salida del aire mediante un ventilador cuando los sensores detectan que la humedad relativa interior supera el 35 %, evitando así la saturación de la cámara.

Secado solar pasivo: Sin control activo de temperatura ni renovación forzada de aire, dependiendo exclusivamente de las condiciones ambientales.

Ambos tratamientos se evaluaron en el mismo horario (10:00 h a 15:30 h). Para validar la significancia de los resultados, se aplicó una prueba t-Student para muestras independientes con un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0.05$), utilizando el software estadístico Python (biblioteca SciPy). Este análisis permite determinar si la diferencia en la humedad final entre ambos métodos es significativa. La determinación del contenido de humedad final se realizó mediante el método gravimétrico, registrando la diferencia de peso de las muestras en cada charola al inicio y al final de los ciclos de secado.

RESULTADOS

Discusión

Comportamiento térmico y estabilidad

El desempeño del controlador PI se evaluó comparando los perfiles de temperatura y humedad inter-

na durante los ciclos de operación. En la configuración con el sistema de control activo, se observó una estabilización de la temperatura cercana al set-point de 55 °C, mitigando las fluctuaciones drásticas provocadas por la variabilidad de la radiación solar.

Análisis de humedad del producto

La efectividad del sistema híbrido se refleja cuantitativamente en el contenido de humedad final del coco. Las Tablas 1 y 2 resumen los valores de humedad final promedio (%) alcanzados en cada charola al término de cada jornada diaria de pruebas.

Debido a que las tablas presentan directamente los porcentajes finales, es necesario detallar que estos se obtuvieron mediante el método gravimétrico. Este método se basa en la relación directa entre la pérdida de masa y la evaporación de agua. Dado que la materia seca del coco permanece constante, cualquier disminución de peso durante el proceso corresponde al agua eliminada. Por lo tanto, se registró el peso inicial de la muestra fresca y el peso final al concluir el ciclo diario; la diferencia entre ambos valores se utilizó para calcular el porcentaje de humedad remanente en el producto reportado en las tablas.

Tabla 1. Humedad en producto final con control. Porcentaje de humedad (%). Enero 2025.

Fecha	Charola 1	Charola 2	Charola 3	Charola 4
Enero 13	2.7	2.8	13.3	7.7
Enero 14	1.1	2.3	3.2	4.8
Enero 15	2.4	1.5	3.7	2.2
Enero 16	2.2	1.3	2.9	2.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Humedad en producto final sin control. Porcentaje de humedad (%). Enero 2025

Fecha	Charola 1	Charola 2	Charola 3	Charola 4
Enero 21	11.1	11.5	15.1	9.8
Enero 22	12	11.9	14.3	10.5
Enero 23	5	4.7	10.3	10.5
Enero 24	5.5	5	6.9	7.1

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Cambio de humedad y temperatura respecto al tiempo en el interior del interior del deshidratador. 13 de enero de 2025.

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 4, la intervención de los reflectores (línea morada de potencia) compensa las caídas térmicas, manteniendo condiciones constantes. Por el contrario, en las pruebas sin control Figura 5, la temperatura interna mostró una dependencia directa de las condiciones ambientales, con tiempos de calentamiento más lentos y oscilaciones que dificultan la deshidratación homogénea.

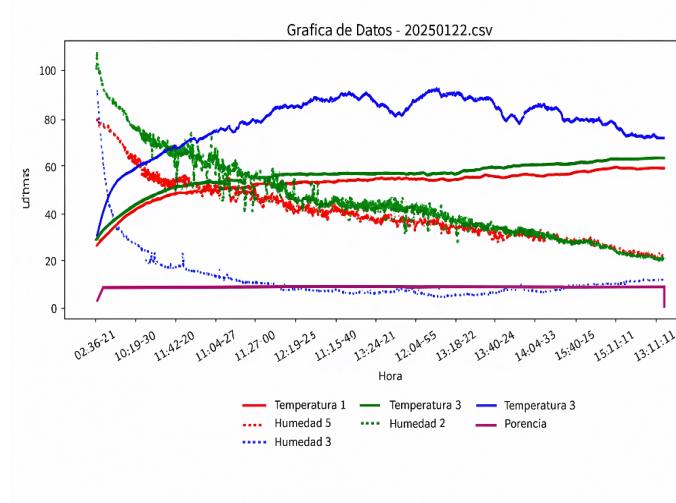


Figura 5. Cambio de humedad y temperatura respecto al tiempo en el interior del interior del deshidratador 22 de enero del 2025.

Fuente: Elaboración propia.

El promedio de humedad registrado con el sistema de control fue de 3.54 %, mientras que el proceso pasivo (sin control) alcanzó un promedio de 9.45 %. Esta diferencia representa una reducción del 62.5 % en la humedad retenida a favor del sistema híbrido.

El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el software Python (versión 3.11) mediante la biblioteca científica SciPy. Se seleccionó la prueba t-Student para muestras independientes debido a que el diseño experimental compara las medias aritméticas de dos grupos distintos (sistema híbrido vs. testigo pasivo) que no presentan relación de dependencia entre sí. Los resultados de dicha prueba arrojaron un valor $t = -5.23$ y un valor $p = 1.24 \times 10^{-5}$. Dado que $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula, confirmando que la diferencia en la humedad final es estadísticamente significativa y atribuible al desempeño del controlador. Esto concuerda con lo reportado por Purnomo y Dewi [11], quienes demostraron que la estabilidad térmica impacta directamente en la eficiencia de la eliminación de agua.

Evaluación cualitativa del producto

Además de los parámetros fisicoquímicos, se observaron diferencias notables en la calidad sensorial del producto. El coco procesado sin control presentó una coloración parda heterogénea, mostrado en la Figura 7. Esta pigmentación es indicativa de reacciones de pardeamiento no enzimático (reacción de Maillard) y caramelización, fenómenos químicos que se aceleran exponencialmente ante picos de temperatura no regulados y que degradan la calidad visual y nutricional del alimento [18].



Figura 7. Producto terminado, prueba con control. Enero 13.
Fuente: Elaboración propia.

La implementación del microcontrolador ESP32 y los sensores DHT22 permitió no solo la actuación precisa, sino también la recolección de datos que valida la superioridad del secado activo frente al pasivo, superando las limitaciones de los sistemas tradicionales mencionadas en la literatura [5].

CONCLUSIONES

El diseño e implementación de un sistema híbrido con control PI permitió optimizar significativamente el proceso de deshidratado solar de coco. La regulación automática de la temperatura en 55 °C, asistida por calefacción eléctrica y extracción de aire, logró una reducción del 62 % en la humedad final del producto en comparación con el método pasivo tradicional.

El análisis estadístico validó que el sistema propuesto garantiza una menor variabilidad en el proceso, obteniendo una humedad promedio de 3.54 %, nivel óptimo para la conservación del alimento. Adicionalmente, la evaluación cualitativa evidenció que el control activo previene el deterioro por sobrecalentamiento, conservando mejor las propiedades organolépticas (color y textura) del coco.

Finalmente, la validación del prototipo confirma que es posible modernizar los métodos tradicionales de secado mediante el uso de electrónica de bajo costo. Al reducir la dependencia de las condiciones meteorológicas, esta propuesta ofrece a los productores una herramienta accesible para estandarizar su producción y disminuir mermas, sin incurrir en los altos costos de inversión que requieren los sistemas industriales convencionales.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Camparte S.A. de C.V. por su disposición y colaboración durante la realización de las pruebas experimentales. En particular, se reconoce la vinculación y el apoyo técnico brindado por las ingenieras Cyndi Guardado y Xiomara García. Asimis-



Figura 6. Producto terminado, prueba sin control. Enero 22
Fuente: Elaboración propia.

En contraste, el producto obtenido con el sistema de control mantuvo una apariencia blanca y textura uniforme (Figura 8), características deseables en el mercado de snacks deshidratados. La regulación precisa de temperatura, combinada con la extracción de aire automatizada, evitó la saturación de humedad en la cámara, factor que Elmehri [8] identifica como crítico para prevenir el crecimiento microbiano y el deterioro visual.

mo, se extiende un agradecimiento a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SE-CIHTI) por el apoyo brindado mediante la beca otorgada para la realización de estudios de posgrado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] FAO. (2022). *Hacer frente a la pérdida y el desperdicio de alimentos: Una oportunidad de ganar por partida triple*. Newsroom. <https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-UNEP-agriculture-environment-food-loss-waste-day-2022/es>.

[2] EY Global. (2021). *Panorama de la cadena de frío en México*. https://www.ey.com/es_mx/insights/consumer-products/cadena-de-frio-en-mexico.

[3] Foodsafety. (2019, abril 12). *Cold Food Storage Chart* [Page]. <https://espanol.foodsafety.gov/tabcas-de-seguridad-alimentaria-mfu8/Tabla-de-conservaci%C3%B3n-de-alimentos-fr%C3%ADos>.

[4] Yao, y. et al. (2022). *A review study on recent advances in solar drying*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111979>.

[5] Kimaro, D. et al. (2024). *Uncovering socio-economic insights of solar dryers for sustainable agricultural product preservation: A systematic review* DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40726.

[6] Elavarasan, R. M., & Pugazhendhi, R. (2025). *Drying characteristics, environmental and economic analysis of a solar dryer*. *Scientific Reports, Nature*.<https://doi.org/10.1038/s41598-025-94194-9>.

[7] Tiwari, G. N., et al. (2012). *Variation of drying temperature, relative humidity and solar radiation in a solar cabinet dryer*. *Renewable Energy and Sustainable Development*. DOI:10.1080/07373930802466872

[8] Elmehri, M., Ferreira, J. P., & Cunha, J. B. (2020). *Design of a control system for an indirect solar dryer*. Instituto Politécnico de Bragança.

[9] Badruddin, I. A., et al. (2021). *Solar dryer with electronic PID controller for dry potato production*. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*. <https://doi.org/10.12912/27197050/143784>.

[10] Solanki, S. K., et al. (2023). *Automation of Solar Dryer*. *International Journal of Applied Research and Innovation in Information Technology (IJARIIT)*, 11(1), 1244. ISSN: 2454-132X.

[11] Prabowo, B. S., Prasetyo, A. R., & Wicaksono, F. A. (2023). *Development of drying system by using internet of things for food*. *Procedia Computer Science*. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100219>.

[12] Purnomo, M. H., & Dewi, N. A. (2022). *Controlling temperature using proportional integral and derivative control algorithm for hybrid forced convection solar dryer*. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12. DOI: 10.11591/ijece.v14i1.pp239-247.

[13] Patil, A., et al. (2024). *DEVELOPMENT OF AN IOT-BASED SOLAR BANANA DRYER*. *Kalahari Journal of Engineering and Technology*, 7(1), 449-456. ISSN: 0974-5823.

[14] SIAP, “Anuario estadístico de la producción agrícola - Coco,” Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.mx/siap/>.

[15] Camparte S.A. de C.V., “*Inicio - Snacks*,” s.f. [En línea]. Disponible: <https://www.campartemx.com/> [Accedido: 02-jul-2025].

[16] Steren. (s.f.). Steren México. <https://www.steren.com.mx>.

[17] MathWorks. (s.f.). *PID Tuner App*. <https://es.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html>.

[18] S. Badui Dergal, *Química de los alimentos*, 6.^a ed. Ciudad de México: Pearson Educación, 2016.