

Contenedor termo-regulable para deshidratación de setas

Armando Olvera-Aguilar¹, Joshua Hyrum Ballato-Camarillo¹, Mario Oscar Ordaz-Oliver²

¹Universidad La Salle Pachuca. Escuela de Ingeniería.

²Tecnológico Nacional de México, Campus Pachuca. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

222262@lasallep.mx, 222028@lasallep.mx, mario.oo@pachuca.tecnm.mx

Resumen. En el presente proyecto se aborda el problema de la inseguridad alimentaria (ODS 2) mediante el diseño y construcción de un prototipo de contenedor termo-regulable de bajo costo que es utilizado para deshidratar setas. El prototipo propuesto para este trabajo de investigación consiste en un controlado en lazo cerrado, que se realiza por medio de un Arduino Nano, con un algoritmo PID y un filtro de Kalman programados en IDE, con el cual se mantiene la temperatura del contenedor estable (a 50°C con una fluctuación de $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$), para preservar el valor nutricional de las setas. El diseño propuesto ha sido realizado con el objetivo de priorizar su replicabilidad en comunidades de Hidalgo con recursos limitados. Los resultados obtenidos en la práctica demuestran la eficacia del control térmico, por medio de un rendimiento aproximado de 0.5kg de producto deshidratado por cada 5kg de setas. A partir de los resultados y las observaciones realizadas, se puede concluir que esta tecnología es una herramienta viable para reducir el desperdicio de alimentos, adicionalmente su diseño es adaptable para otros productos agrícolas, lo cual contribuye directamente a la seguridad alimentaria y la sostenibilidad.

Palabras Clave: Seguridad alimentaria, deshidratación de alimentos, Arduino Nano.

1 Descripción de la problemática prioritaria abordada

El hambre y la desnutrición son dos de los desafíos más urgentes a nivel global, los cuales se agudizan en regiones con limitaciones socioeconómicas, como comunidades vulnerables alrededor del estado de Hidalgo, donde el acceso a alimentos seguros y nutritivos es restringido. Dicha inseguridad alimentaria puede afectar directamente a grupos de riesgo e impactar negativamente en su salud y desarrollo de niños y personas de la tercera edad.

Esta problemática se intensifica debido a la falta de una infraestructura que sea adecuada para conservar alimentos perecederos, lo cual incrementa el desperdicio y reduce la disponibilidad de nutrientes esenciales. Un ejemplo importante que está directamente relacionado con este problema en Hidalgo son las setas, un producto con alto valor nutricional, pero de rápida descomposición, que frecuentemente no logra integrarse de manera efectiva a la cadena alimentaria local por la carencia de tecnologías de preservación accesibles [1, 3].

Frente a este panorama por alentador, el presente proyecto propone una solución tecnológica de bajo costo, que consiste en un contenedor termo-regulable para deshidratación de setas, el cual cuenta con el potencial de adaptación para otros excedentes agrícolas perecederos [4]. Esta iniciativa se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 2 (Hambre Cero), pues busca reducir el desperdicio de alimentos, mejorar la nutrición y fortalecer la autonomía alimentaria mediante el uso de energía eficiente y materiales de bajo costo. El prototipo propuesto y desarrollado en esta investigación permite conservar los excedentes locales mediante un secado térmico controlado que preserva las propiedades nutricionales de productos agrícolas locales, que facilita el almacenamiento y amplía las oportunidades de distribución, para contribuir de esta manera al cumplimiento de las metas 2.1 y 2.3 del ODS 2 [2, 5].

2 Objetivo

Desarrollar un sistema de deshidratación en lazo cerrado, mediante un contenedor termo-regulable que es controlado por un algoritmo PID y microcontrolador Arduino Nano, que tiene la capacidad de preservar las propiedades nutricionales de productos agrícolas endémicos del estado de Hidalgo las setas, extender su vida útil y favorecer el acceso a alimentos en contextos de alta vulnerabilidad, en concordancia con las metas del ODS 2: mejorar la nutrición y reducir el hambre.

3 Propuesta teórico-metodológica

3.1 Diseño y Materiales del Contenedor

La cámara de deshidratación con dimensiones de 20 x 20 x 20 cm, una capacidad útil: 0.5 kg de setas frescas por ciclo, está construida mediante una estructura de MDF de 3 mm y aislada térmicamente para minimizar las pérdidas de calor y optimizar la eficiencia energética. El sistema de calentamiento utiliza una resistencia (foco incandescente) de 60 W, un ventilador axial de 12 V / 0.25 A (100 CFM) para garantizar una circulación uniforme del aire caliente por medio de una señal PWM que es regulada por medio de un puente H L293N, y un sensor de temperatura y humedad DTH11 que detecta la temperatura de la cámara y cierra el lazo de control. La selección de estos materiales de bajo costo y fácil adquisición en entornos locales es fundamental para la replicabilidad y escalabilidad del diseño en contextos comunitarios.

3.2 Sistema de Control

El módulo principal del sistema de control en lazo cerrado es un algoritmo de control de temperatura preciso, implementado mediante un controlador PID digital programado en un microcontrolador Arduino Nano, este controlador calcula el error térmico entre la temperatura medida y el setpoint deseado (ej. 50°C), ajustando la potencia entregada a la resistencia (foco incandescente) y la velocidad del ventilador mediante modulación por ancho de pulso (PWM) para mantener las condiciones ideales de deshidratación [6].

$$u(t) = k_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

El algoritmo PID se programó utilizando la regla del trapecio para la integral:

$$\int_0^t e(\tau) d\tau = \sum_{k=0}^n \frac{h(e(k) + e(k-1))}{2} \quad (2)$$

y Euler hacia atrás para la derivada:

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e(k) - e(k-h)}{h} \quad (3)$$

Para aumentar la confiabilidad de las mediciones, se programó un filtro de Kalman, el cual está encargado de estimar el estado térmico verdadero del sistema en tiempo real (libre de ruido), considerando la incertidumbre tanto de la medición del sensor como del modelo del proceso. Se eligió este filtro sobre otras alternativas (como filtros de media móvil o pasa-bajos) por su superior desempeño en lazos de control en tiempo real, su eficiencia computacional (ideal para el Arduino Nano) y porque introduce un retardo de fase mínimo, lo que evita inestabilizar el sistema. La temperatura filtrada mediante el filtro de Kalman alimenta directamente al controlador PID, mejorando la estabilidad y evitando ciclos de encendido/apagados bruscos que reducirían la eficiencia energética y la vida útil de los actuadores.

3.3 Operación del Sistema

La operación del sistema de control está diseñada para ser sencilla y accesible: el usuario solo debe cargar las setas, encender el sistema mediante un interruptor y seleccionar la temperatura

deseada mediante un potenciómetro. El tiempo de secado se determina de forma empírica según la carga y humedad inicial, y el usuario finaliza el proceso manualmente una vez completado. La eficiencia energética se logra mediante el aislamiento térmico y la estrategia de control, que regula suavemente la potencia en lugar de usar los ciclos de encendido/apagado (termociclado) de los termostatos convencionales, los cuales son menos eficientes y generan mayores fluctuaciones de temperatura.

Este enfoque mecatrónico (que integra el diseño de hardware accesible con un esquema de control inteligente) garantiza un proceso de deshidratación uniforme y reproducible, crucial para preservar la calidad nutricional de las setas y, potencialmente, de otros productos agrícolas perecederos.

4 Discusión de resultados

Para enmarcar el desempeño del sistema termo-regulado, es relevante una comparativa teórica: una configuración sin control llevaría inevitablemente a un sobrecalentamiento, degradando los nutrientes, lo cual representa un riesgo, mientras que un esquema de lazo abierto (aplicar potencia por tiempo fijo) es incapaz de compensar perturbaciones ambientales, resultando en una deshidratación inconsistente (subsecado con riesgo de moho o sobre secado que quema el producto y sus nutrientes). En contraste, los resultados que fueron obtenidos del sistema en lazo cerrado con el controlador PID demostraron su capacidad para alcanzar rápidamente la temperatura deseada de 50 °C y mantenerla con fluctuaciones mínimas (± 0.7 °C), lo cual permite validar la efectividad del control PID en acción conjunta con el filtro de Kalman, para garantizar un entorno térmico estable y seguro.

El Arduino Nano, en conjunto con el sensor y el algoritmo de control, logró estabilizar la temperatura interna sin provocar sobrecalentamientos, mientras que el sistema de ventilación respondió eficazmente modulando su velocidad para reducir progresivamente la humedad. Esta precisión es la base técnica para preservar la calidad del alimento, ya que evita tanto la degradación térmica de nutrientes termolábiles como la deshidratación incompleta que promueve el crecimiento microbiano [1, 3].

En términos de rendimiento, el proceso convierte un producto altamente perecedero en uno estable y almacenable. Considerando que las setas son un producto agrícola que tiene un contenido de humedad entre el 90% y 95% [4], el sistema de control permite obtener aproximadamente 0.5 kg de producto deshidratado por cada 5 kg de setas frescas que se ingresan en la cámara, lo que representa una reducción drástica de volumen y peso para su almacenamiento y transporte en comunidades con limitaciones de infraestructura.

Finalmente, es posible afirmar que tanto la simplicidad constructiva, el bajo costo de los materiales y la eficiencia energética lograda por el control preciso permiten visualizar la implementación de esta tecnología en contextos rurales o con recursos limitados del estado de Hidalgo. Así, el sistema propuesto en esta investigación se erige como una herramienta que es viable para combatir el desperdicio de alimentos, mejorar el acceso a nutrientes y fortalecer la autosuficiencia comunitaria, contribuyendo directamente a las metas del ODS 2 [2, 5].

5. Conclusiones y perspectivas futuras

El sistema propuesto y desarrollado en este trabajo de investigación está basado en un microcontrolador Arduino Nano, un algoritmo PID y un filtro de Kalman, el cual a. partir de resultados prácticos demostró ser una solución técnicamente efectiva y de bajo costo para la deshidratación de setas y productos agrícolas endémicos del estado de Hidalgo. La integración del filtro de Kalman permitió reducir el ruido en las lecturas del sensor de temperatura y a partir de esto mejorar la respuesta del controlador y asegurando una regulación térmica precisa (± 0.7 °C).

Es importante mencionar que la estabilidad en el proceso es fundamental para conservar el valor nutricional de las setas, reducir su desperdicio y extender su vida útil sin necesidad de refrigeración que incluye mayor tecnología y consumo de energía.

A partir de esto es posible concluir que tanto diseño, como la construcción del contenedor termo-regulable presentado en este documento cumplen con el objetivo propuesto, validando su viabilidad como una herramienta tecnológica de alto potencial para contribuir y subsanar a la seguridad alimentaria. Su operación que es sencilla (encendido, selección de temperatura) y mantenimiento básico (limpieza periódica) facilitan su apropiación social en contextos comunitarios. Además, la plataforma desarrollada es de tecnología versátil y adaptable para la deshidratación de otros productos agrícolas perecederos (hierbas, chiles, frutas) mediante el ajuste del setpoint de temperatura, lo que amplía significativamente su potencial impacto.

Desde la perspectiva del ODS 2 de la OMS el proyecto aporta a las metas 2.1 (acceso universal a alimentos seguros), 2.2 (mejora de la nutrición) y 2.3 (valor agregado a la producción local), lo cual fortalece la autosuficiencia comunitaria frente a la inseguridad alimentaria.

Como líneas futuras de implementación e investigación se propone lo siguiente:

1. Incorporar una o varias fuentes de energía renovable (paneles solares) para mejorar la sostenibilidad y autonomía del sistema en comunidades rurales y difícil acceso.
2. Realizar una serie de estudios relacionados con el impacto nutricional y microbiológico en entornos reales, con el fin de cuantificar de manera más precisa la retención de nutrientes y la seguridad del producto agrícola deshidratado.
3. Adaptar el diseño para mejorar su capacidad y eficiencia en el procesamiento de distintos productos agrícolas locales de alto valor comercial y nutricional.
4. Desarrollar e implementar distintos protocolos uso y de capacitación para comunidades, evaluando tanto la adopción técnica, como social de esta tecnología.

Estas perspectivas buscan consolidar el prototipo propuesto dentro del marco de una tecnología de apropiación social con alta aplicabilidad científica y comunitaria en regiones marginadas y de bajos recursos en el estado de Hidalgo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la universidad La Salle Pachuca y a la Escuela de Ingeniería por los espacios brindados para la realización de este proyecto, así como a los alumnos del grupo 01 de séptimo semestre de ingeniería mecatrónica que conformaron parte del equipo para llevar a cabo este proyecto.

6 Referencias

1. Moutia, I., Lakatos, E., & Kovács, A. J. (2024). Impact of dehydration techniques on the nutritional and microbial profiles of dried mushrooms. *Foods*, 13(20), 3245.
2. Gamez, M. J. (2022, 24 mayo). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
3. Pérez-Ovando, C. (2017). Traditional processing and preservation of wild edible mushrooms in Mexico. *Annals of Food Processing and Preservation*, 2(1), 1013.
4. Más de 600 variedades de hongos se cultivan en Hidalgo. (2024, 11 diciembre). *El Sol de Tulancingo / Noticias Locales, Policiacas, Sobre México, Hidalgo y el Mundo*. <https://oem.com.mx/elsoldetulancingo/local/mas-de-600-variedades-de-hongos-se-cultivan-en-hidalgo-19101345>

5. Moran, M. (2024, 30 enero). *Hambre y seguridad alimentaria - Desarrollo Sostenible*. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>
6. Calderon-Lopez, J. V., Gutiérrez-Moreno, E., Ordaz-Oliver, J. P., Ordaz-Oliver, M. O., & Montiel-Hernández, J. F. (2023). The Implementation of Optimal Control for Thermal Regulation in Finite Volume Spaces Described by Second-Order Dynamics. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, 14(3), 147–156. <https://doi.org/10.61467/2007.1558.2024.v15i1.391>

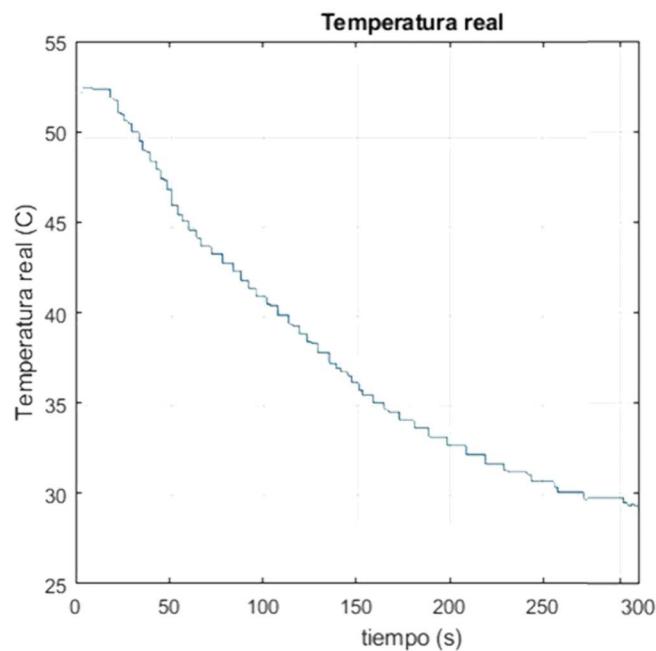


Figura 1. Respuesta del Sistema

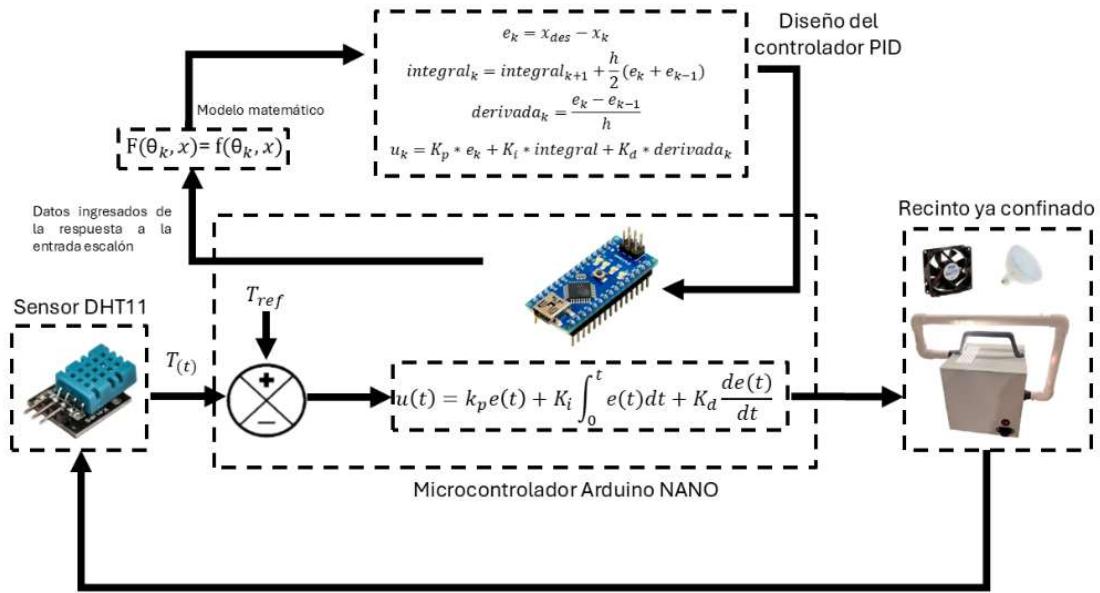


Figura 2. Esquema del sistema