

“IMPLEMENTACION Y EVALUACION DE UN CIRCUITO DE CONTROL DE TEMPERATURA EN UNA SECADORA DE FLUJO TRANSVERSAL”

SEBASTIÁN ROJAS-BARRANTES¹, GUILLERMO A. VARGAS-ELÍAS², ANTHONY MONTERO-VILLALOBOS,³ BRYAN J. BADILLA-MENA⁴, DANIEL A. MURILLO-JIMÉNEZ⁵

¹ Estudiante de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas. Universidad de Costa Rica, sebastian.rojasbarrantes@ucr.ac.cr

² D. Sc., Profesor Ing. Agrícola. CIGRAS. Universidad de Costa Rica.

³ Estudiante de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas. Universidad de Costa Rica.

⁴ Bach. Ing. Agrónomo. Universidad de Costa Rica.

⁵ Lic. Ing. Agrícola y de Biosistemas. Universidad de Costa Rica.

Apresentado no
LI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2022
27 a 29 de outubro de 2022 - Pelotas - RS, Brasil

RESUMO: La época lluviosa predomina entre mayo y octubre en Costa Rica, por esa razón se requiere secar artificialmente con aire caliente impulsado por un ventilador para el secado de granos. El objetivo fue implementar un controlador de bajo costo para la eficacia del secado de granos con aire caliente. Se utilizó un sensor de temperatura y humedad relativa de bajo costo pero alta resolución, instalado a un microcontrolador para mantener la temperatura del aire constante en 40 °C (*set point*). Se instaló un relé de estado sólido así como un algoritmo PID para el encendido y apagado de las resistencias en forma amortiguada. Los componentes instalados permitieron la estabilidad del sistema con una operación continua de cuatro días para el secado de los granos de cacao hasta su humedad segura de almacenamiento.

PALAVRAS-CHAVE: ALGORITMO PID, ARDUINO, MICROCONTROLADOR

IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF A TEMPERATURE CONTROL CIRCUIT IN A CROSS-FLOW DRYER

ABSTRACT: In Costa Rica, the rainy season predominates between May to October, for that reason artificial drying with hot air driven by a fan is required to dry grains. The objective was to implement a low-cost controller for the efficiency of grain drying with hot air. A low cost but high resolution temperature and relative humidity sensor was used, installed on a microcontroller to keep the air temperature constant at 40 °C (set point). A solid-state relay was installed, as well as a PID algorithm for turning the resistors on and off in a buffered manner. The installed components allowed the stability of the system with a continuous operation of four days for the drying of the cocoa beans to their safe storage humidity.

KEYWORDS: PID ALGORITHM, ARDUINO, MICROCONTROLLER

INTRODUÇÃO: El secado hasta el contenido de humedad de almacenamiento es uno de los procesos post cosecha más importantes en el manejo de granos. Este proceso es necesario para asegurar al producto una vida útil larga y segura. De lo contrario, un ejemplo de los problemas que se pueden manifestar es la presencia de micotoxinas, las cuales pueden causar efectos toxicológicos peligrosos en los consumidores (AYENI et al., 2021).

Las ecuaciones para predecir las tasas de transferencia de masa de los granos durante el secado se desarrollan por lo general bajo condiciones específicas. Ejemplo de esto son, la capa delgada y las condiciones de frontera constantes, como la temperatura. Se ha observado que, bajo condiciones de frontera variables, los modelos de solución analítica y numérica tienden a diferir (GINER, 2019). Por esta razón, para el estudio de este proceso, es recomendable que la secadora mantenga una temperatura de salida constante.

Los algoritmos PID, por sus constantes proporcional (P), integral (I) y derivativa (D), mantienen la salida de un sistema constante. Esta clase de algoritmo de control es resiliente ante perturbaciones externas. Las constantes del algoritmo se pueden obtener mediante iteraciones, hasta obtener una salida constante (ALI et al., 2021).

El sistema de control de las resistencias eléctricas fue integrado por un microcontrolador de bajo costo y un relé de estado sólido; el objetivo de este trabajo fue implementar un circuito de control de la temperatura durante el proceso de secado.

MATERIAL E MÉTODOS: La metodología se dividió en la selección del hardware, la configuración del código fuente y la evaluación del sistema, como se muestra a continuación.

Hardware: La secadora de flujo transversal contó con un abanico centrífugo de velocidad constante con motor de 0,1 hp y resistencias eléctricas encargadas de calentar el aire a 40 °C. El flujo de aire de la secadora fue de 0,765 m³/s, este flujo se logró usando una velocidad de 3,9 m/s aplicada a un área de 0,1926 m². Las propiedades del aire de entrada están sujetas a los cambios en el ambiente del laboratorio.

El algoritmo del circuito de control se ejecutó en la plataforma de hardware y software libre de Arduino. El microcontrolador utilizado fue la versión genérica de la placa Arduino UNO. En la figura 1 se muestra un diagrama general del circuito de control y potencia.

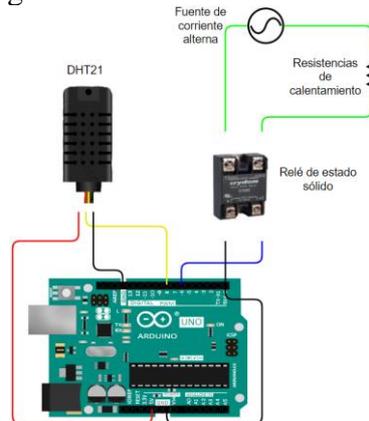


FIGURA 1: Circuito de control y potencia conectado al microcontrolador Arduino UNO.

El actuador encargado del control de las resistencias, de manera aislada, es un relé de estado sólido (FERNÁNDEZ et al., 2019). El algoritmo se encarga de computar el estado lógico y el tiempo que este se mantendrá activo mediante el relé (NATIVIDAD; 2019). El microcontrolador envía la señal correspondiente al relé a través del pín seis de la figura 1.

Los datos de entrada para el algoritmo (temperatura de secado), fueron adquiridos por la placa mediante un sensor de temperatura ($\pm 0,5$ °C) y humedad relativa ($\pm 2,5$ %) conocido como DHT21. Su empaque de plástico es más robusto comparado a los sensores DHT22 (JIMÉNEZ, 2020), esto hace del DHT21 un sensor ideal para aplicaciones en exteriores. El sensor se colocó a 70 cm de las resistencias y a 30 cm del plenum de la secadora.

Software: Se utilizó la librería "PID", de Brett Beauregard (versión 1.2.0). La interpretación de la señal del sensor DHT21 se usó la librería "*DHT sensor library*" de Adafruit (versión 1.4.1). Estas librerías se obtuvieron del repositorio del software de Arduino.

Las resistencias eléctricas sólo pueden estar encendidas o apagadas, por esto la salida del algoritmo PID para que el actuador la ejecute debe ser de tipo binaria. El algoritmo calcula, con

base en el dato de temperatura medido, el tiempo que se debe mantener los estados del actuador (encendido o apagado). Este ciclo cerrado de causa y efecto permite que se mantenga una salida constante y se compense por cualquier desviación.

Evaluación: Se utilizó el software SigmaPlot14 para establecer la ecuación de mejor ajuste para los datos de la etapa de estabilización del algoritmo PID. Se evaluaron distintas ecuaciones hasta encontrar la que tuviera mayor coeficiente de determinación (R^2), menor error estándar de estimación y menores coeficientes de variación en los parámetros. Los coeficientes de la ecuación se determinaron mediante regresión no lineal a partir de los datos medidos por el sensor de temperatura y humedad relativa DHT21.

La secadora usó una masa de 2500 g de granos de cacao. Se colocó un registrador marca HOBO, en la zona de medición del sensor DHT21 para durante todo el proceso (40 horas).

RESULTADOS E DISCUSSÃO: La figura 2 muestra la temperatura medida por el sensor DHT21 durante la etapa de estabilización de la salida, producida por acción del algoritmo PID. Los datos oscilan entre un valor máximo de 41,5 °C y un mínimo de 37,9 °C a partir del momento en que se alcanza la temperatura de 40 °C por primera vez. El máximo error fue de 2,1 °C cuando se estabilizó la salida del PID.

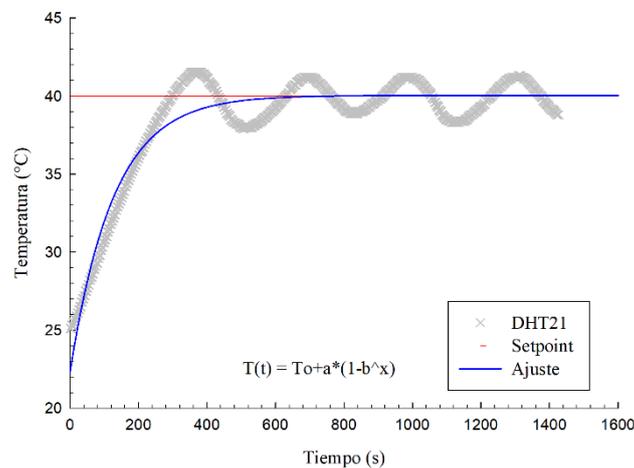


FIGURA 2. Curva de la temperatura de salida en la etapa de estabilización del algoritmo PID.

Se encontró que para los datos de la figura 2, la curva de mejor ajuste fue una de aumento potencial con tendencia a un máximo, como la ecuación 1.

$$T(t) = T_0 + a \cdot (1 - b^t) \quad (1)$$

donde,

T_0 - Temperatura inicial, °C;

a y b - Coeficientes de ajuste;

t - Tiempo, s.

Se observa en la tabla 1, el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0,8980. La ecuación converge a un valor máximo constante a partir de los 700 s, mientras que los datos presentan oscilaciones para ese mismo intervalo de tiempo.

TABLA 1. Coeficientes y parámetros estadísticos del ajuste del algoritmo PID.

Ecuación	Parámetro	Coeficientes	R^2 (dec)	SEE* (°C)
(1)	T_0 (°C)	22,2970	0,8980	1,1405
	a (°C)	17,7425		
	b	0,9922		

*SEE: error estándar de estimación.

Se calculó el límite cuando el tiempo tiende a infinito para calcular de manera analítica la temperatura de estabilización por efecto del trabajo del PID, según la ecuación 2.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T(t) = T_o + a * (1 - b^t) = 40,04 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

El resultado anterior es consistente con la temperatura objetivo (*set point*) programada en el PID. El cálculo del límite a partir de la ecuación ajustada permite concluir que los datos medidos convergen en el valor esperado ($\approx 40 \text{ } ^\circ\text{C}$). La operación del PID fue efectiva, con base en la temperatura de entrada medida por el sensor DHT21.

La figura 5 muestra la temperatura de una parte del proceso de secado de granos de cacao. El intervalo de datos se seleccionó como el periodo más largo del secado que no incluyera interrupciones operativas, donde se estableció para el proceso $40 \text{ } ^\circ\text{C}$ (*set point*).

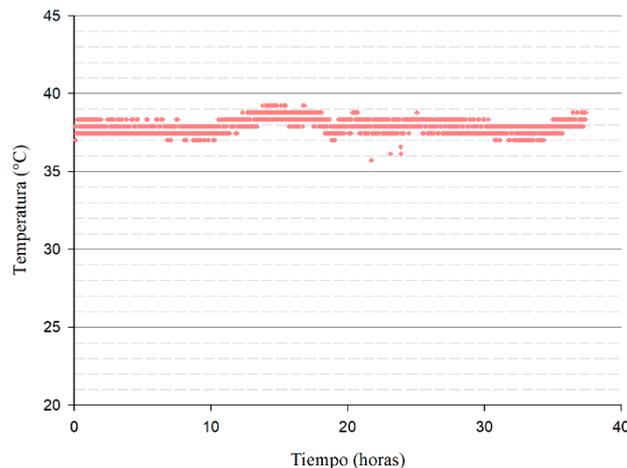


FIGURA 3. Registro de la temperatura para el secado de granos de cacao.

Se observa en la figura 3, que la mayoría de los datos se encuentran entre 37 y $39 \text{ } ^\circ\text{C}$, con promedio de $37,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ y una desviación estándar de $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Esto muestra como el circuito de control mantuvo una salida estable durante un periodo de 40 horas.

CONCLUSÕES: El circuito de control implementado fue eficaz para mantener una salida de temperatura constante durante el proceso de secado.

AGRADECIMENTOS: El proyecto *Efecto del secado de cacao en la calidad sensorial*.

REFERÊNCIAS:

ALI, M. N. et al. Resilient design of robust multi-objectives PID controllers for automatic voltage regulators: D-decomposition approach. **IEEE access: practical innovations, open solutions**, v. 9, p. 106589–106605, 2021.

AYENI, K. I. et al. Present status and future perspectives of grain drying and storage practices as a means to reduce mycotoxin exposure in Nigeria. **Food control**, v. 126, n. 108074, p. 108074, 2021.

FERNANDEZ, M. et al. Solid-state relay solutions for induction cooking applications based on advanced power semiconductor devices. **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 66, n. 3, p. 1832–1841, 2019.

GINER, S. A. Estimation of the influence of variable boundary conditions when using thin layer equations for grain dryer simulation. **Biosystems engineering**, v. 186, p. 228–233, 2019.

JIMENEZ, D. M. **Cinética de la desgasificación del café tostado**. 2020. Tese (Graduacao em Engenharia Agrícola e de Biosistemas) - Faculdade de Engenharia, Universidade da Costa Rica – UCR, San Jose, 2020. Disponível em: < <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2020/12/TFG-DanielMurilloJimenez.pdf>>. Acesso em: 6 julho. 2022.

NATIVIDAD, J. G.; PALAOAG, T. D. IoT based model for monitoring and controlling water distribution. **IOP conference series. Materials science and engineering**, v. 482, p. 012045, 2019.