

## **Sistema de incubación controlado para el crecimiento de *Aspergillus flavus* con control inteligente y monitoreo visual en Labview**

### **Controlled incubation system for the growth of *Aspergillus flavus* with intelligent control and visual monitoring in LabVIEW**

**Daniel Esteban Cobo Urrea<sup>1</sup>, Oscar Javier Suarez Sierra<sup>2</sup>, Aldo Pardo Garcia<sup>3</sup>,  
Daniel Camilo Ruiz Ayala<sup>4</sup>, Liliana Rojas Contreras<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Ing., Universidad de Pamplona, Ingeniería Mecatrónica, Pamplona, Colombia,  
<https://orcid.org/0009-0008-9726-3654>.  
[daniel.cobo21@unipamplona.edu.co](mailto:daniel.cobo21@unipamplona.edu.co)

<sup>2</sup>PhD., Universidad de Pamplona, Ingeniería Mecatrónica, Grupo Automatización & Control, Pamplona, Colombia,  
<https://orcid.org/0000-0002-6754-5713>.  
[oscar.suarez@unipamplona.edu.co](mailto:oscar.suarez@unipamplona.edu.co)

<sup>3</sup>PhD., Universidad de Pamplona, Ingeniería Mecatrónica, Grupo Automatización & Control, Pamplona, Colombia,  
<https://orcid.org/0000-0003-2040-9420>.  
[apardo13@unipamplona.edu.co](mailto:apardo13@unipamplona.edu.co)

<sup>4</sup>PhD(c.), Universidad de Pamplona, Doctorado en Automática, Grupo Automatización & Control, Pamplona,  
Colombia, <https://orcid.org/0000-0003-4852-9176>.  
[daniel.ruiz@unipamplona.edu.co](mailto:daniel.ruiz@unipamplona.edu.co)

<sup>5</sup>PhD., Universidad de Pamplona, Microbiología, Grupo de Investigación GIMBIO, Pamplona, Colombia,  
<https://orcid.org/0000-0001-9184-9031>.  
[olrojas@unipamplona.edu.co](mailto:olrojas@unipamplona.edu.co)

Cite this article as: D. Cobo Urrea, O. Suarez Sierra, A. Pardo García, D. Ruiz Ayala, L. Rojas Contreras, “*Sistema de incubación controlado para el crecimiento de *Aspergillus flavus* con control inteligente y monitoreo visual en Labview*”, Prospectiva, Vol 24, Nº 1, 2026.

**Recibido: 30/10/2025 / Aceptado: 30/12/2025**

<http://doi.org/10.15665/rp.v24i1.3901>

#### **RESUMEN**

Este artículo presenta el diseño e implementación de un sistema de incubación controlado para el crecimiento del hongo *Aspergillus flavus*, orientado a estudios experimentales bajo condiciones ambientales reguladas. El sistema incorpora sensores de temperatura (PT100) y humedad (DHT22), un módulo de acondicionamiento térmico basado en celdas Peltier y un humidificador ultrasónico; integrados mediante una arquitectura de control que combina técnicas clásicas e inteligentes. Se obtuvo un modelo dinámico del lazo térmico mediante identificación paramétrica, lo que permitió evaluar controladores PID ajustados por Ziegler–Nichols, un esquema óptimo I-PD y un control difuso tipo PD. Los resultados experimentales demuestran que el controlador I-PD ofrece el mejor desempeño, con 0% de sobreimpulso, error en estado estable de 0.005 °C y estabilidad frente a perturbaciones. El prototipo físico mantuvo condiciones de 25°C a 37°C y humedades relativas superiores al 85%, con una desviación máxima de 0.2°C durante 10 horas de operación. Adicionalmente, se integró un sistema de monitoreo visual en tiempo real que registra el desarrollo morfológico del hongo mediante la separación de canales RGB, permitiendo documentar su crecimiento sin intervención física. Los resultados validan la viabilidad del sistema para estudios controlados de proliferación fúngica.

**Palabras clave:** *Aspergillus flavus*; control clásico; control inteligente; incubación biológica; control de temperatura; monitoreo visual; LabVIEW.

## ABSTRACT

This article presents the design and implementation of a controlled incubation system for the growth of *Aspergillus flavus*, aimed at supporting experimental studies under regulated environmental conditions. The system incorporates a temperature sensor (PT1000) and humidity sensor (DHT22), a thermal conditioning module based on Peltier cells, and an ultrasonic humidifier; integrated through a control architecture that combines classical and intelligent techniques. A dynamic model of the thermal loop was obtained through parametric identification, enabling the evaluation of PID controllers tuned using the Ziegler–Nichols method, an optimal I-PD configuration, and a fuzzy PD controller. Experimental results show that the I-PD controller provides the best performance, achieving 0% overshoot, a steady-state error of 0.005 °C, and robustness against disturbances. The physical prototype maintained stable operating conditions between 25–37 °C and relative humidity above 85%, with a maximum deviation of 0.2 °C during 10 hours of continuous operation. Additionally, a real-time visual monitoring module was integrated to document fungal growth through RGB channel separation, enabling non-invasive observation of morphological development. The results confirm the feasibility of the system for controlled fungal incubation studies.

**Keywords:** *Aspergillus flavus*; classic control; intelligent control; biological incubation; temperature control; visual monitoring; LabVIEW.

## 1. INTRODUCCIÓN

*Aspergillus flavus* es un hongo filamentoso ampliamente distribuido en regiones cálidas y húmedas, donde encuentra condiciones favorables para su esporulación y colonización de productos agrícolas como maíz, arroz, trigo y diversos frutos secos [1], [2], [3]. Su crecimiento óptimo suele presentarse en rangos de temperatura entre 25°C y 37°C y humedades relativas superiores al 85% [4], [5], [6], variables que influyen directamente en su actividad metabólica y en la formación de colonias verde amarillentas características de la especie. La necesidad de comprender su dinámica de crecimiento bajo ambientes estrictamente controlados ha impulsado el desarrollo de sistemas de incubación que permitan reproducir con precisión estas condiciones y evaluar la respuesta del microorganismo ante perturbaciones o variaciones ambientales [7].

Desde la ingeniería aplicada a la biología experimental, el diseño de incubadoras de precisión implica retos asociados a la estabilidad térmica, la compensación de inercia térmica de los materiales y la regulación simultánea de humedad relativa [8], [9], [10]. Los sistemas comerciales existentes presentan limitaciones relacionadas con su costo, arquitectura cerrada y escasa flexibilidad para integrar nuevos sensores, actuadores o algoritmos de control [11]. Como respuesta a estas restricciones, diversos grupos de investigación han desarrollado cámaras de incubación personalizadas que combinan electrónica embebida [12], [13], plataformas de adquisición de datos [14], [15] y estrategias avanzadas de control [16], [17], [18].

Los avances recientes en este campo han demostrado que la incorporación de técnicas de control inteligente mejora de forma significativa el desempeño de sistemas experimentales. En [19], se reportó un sistema de control de temperatura basado en un controlador PID optimizado mediante algoritmos genéticos, el cual alcanzó una precisión de  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  en el rango de 25°C a 40°C y redujo el tiempo de establecimiento a 45 segundos gracias a una arquitectura que integra sensores PT100 y resistencias calefactoras. Por su parte, el trabajo presentado en [20] desarrolló un controlador difuso tipo Mamdani con cinco funciones de membresía triangulares para la regulación simultánea de temperatura y humedad en cámaras de cultivo de hongos filamentosos; en este caso, la reducción del error cuadrático medio en un 23% frente a controles ON/OFF tradicionales evidenció el potencial de las aproximaciones difusas para entornos biológicos, manteniendo la humedad relativa en  $85 \pm 3\%$  y la temperatura en  $30 \pm 1^\circ\text{C}$  durante 168 horas de incubación.

En investigaciones centradas específicamente en *Aspergillus*, el estudio descrito en [21] analizó la influencia de parámetros ambientales controlados en cultivos del hongo utilizando una plataforma automatizada desarrollada en LabVIEW. Allí se demostró que variaciones térmicas de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  afectan significativamente el desarrollo de la especie mientras que desviaciones superiores al 5% en humedad relativa pueden inhibir totalmente la esporulación, resultados que resaltan la necesidad de sistemas capaces de mantener alta estabilidad en estas variables. Complementando estas aproximaciones, [22] propuso un enfoque híbrido basado en control difuso tipo-2 optimizado mediante algoritmos de enjambre de partículas, logrando una reducción del tiempo de establecimiento del 32% y una disminución del sobreimpulso del 18% respecto a controladores difusos tipo-1, con una estabilidad mantenida en  $37 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$  y 95±1% de humedad relativa durante períodos superiores a 700 horas. Finalmente, en el ámbito de sistemas de bajo costo, el trabajo presentado en [23] construyó una plataforma de incubación basada en Arduino que integró sensores DHT22 y módulos ultrasónicos de humidificación, alcanzando estabilidad ambiental adecuada con un costo del 60% menor que soluciones comerciales, lo cual demuestra la viabilidad de prototipos económicos para estudios con hongos y micotoxinas.

Estas evidencias muestran una tendencia creciente hacia el desarrollo de sistemas de incubación versátiles que combinen electrónica de precisión, control avanzado y capacidad de monitoreo continuo. Sin embargo, muchas de las propuestas existentes presentan limitaciones en modularidad, portabilidad, documentan únicamente técnicas de control aisladas o carecen de sistemas de observación directa del crecimiento, lo que dificulta correlacionar la estabilidad ambiental con la evolución morfológica del cultivo.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es diseñar, implementar y validar un sistema de incubación controlado para el crecimiento de *Aspergillus flavus*, que permita regular de forma precisa las condiciones ambientales, evaluar el desempeño de diferentes estrategias de control y obtener un monitoreo visual en tiempo real que facilite el registro del desarrollo morfológico del hongo. El desarrollo del prototipo busca ofrecer una herramienta experimental flexible, portable, de bajo costo y adaptable a estudios prolongados de crecimiento fúngico, aportando una alternativa accesible para laboratorios que requieren plataformas de ensayo configurables y orientadas a la investigación en ingeniería aplicada a la biología.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada integra el diseño del sistema de incubación, la arquitectura de control implementada y los procedimientos experimentales utilizados para mantener condiciones ambientales estables durante la incubación de *Aspergillus flavus*. El sistema se construyó en una cámara aislada diseñada en *Autodesk Inventor*, que aloja los sensores, los actuadores y el módulo de captura digital. La adquisición y supervisión se implementó en LabVIEW, permitiendo la lectura continua de señales, el registro de variables ambientales y la visualización en tiempo real del crecimiento fúngico mediante una cámara integrada.

Para la medición de temperatura se empleó un sensor PT1000 configurado en un puente resistivo y acoplado a un convertidor MAX31865 [24], garantizando linealidad y baja desviación dentro del rango de operación del cultivo. La humedad relativa se midió con un sensor DHT22, cuya precisión y estabilidad son adecuadas para incubaciones prolongadas [3], [25]. El control térmico se realizó mediante una celda Peltier de tipo TEC, seleccionada por su capacidad de operar como bomba de calor sólida sin partes móviles y por ofrecer un rango funcional amplio acorde con los requerimientos del sistema [26], [27]. La celda utilizada presenta una capacidad de disipación entre 60W y 120W, opera con tensiones de 12VDC a 15VDC y admite corrientes de 4A a 6A, lo que permite generar gradientes térmicos suficientes para alcanzar temperaturas entre 20°C y 40°C dentro de la cámara. Esta celda se controló mediante modulación por ancho de pulso (PWM) y se acopló a un disipador interno y un ventilador de recirculación para homogenizar el flujo térmico [28]. La humedad se reguló mediante un módulo ultrasónico que contaba con un control ON/OFF, dado el comportamiento monótono y la menor sensibilidad de esta variable frente a pequeñas oscilaciones [29].

Se evaluaron tres estrategias de control para la regulación térmica: un controlador PID sintonizado mediante el método de Ziegler–Nichols, un esquema óptimo I-PD y un controlador difuso tipo PD [27]. El controlador difuso se implementó bajo un esquema tipo Mamdani con dos entradas (error y derivada del error), cinco funciones de membresía triangulares por variable y un conjunto de 25 reglas de inferencia, utilizando defuzzificación por centroide. Paralelamente, el módulo de monitoreo visual adquirió imágenes bajo iluminación blanca uniforme, las cuales se procesaron mediante separación de canales RGB para registrar la evolución morfológica del hongo y correlacionarla con las variaciones ambientales.

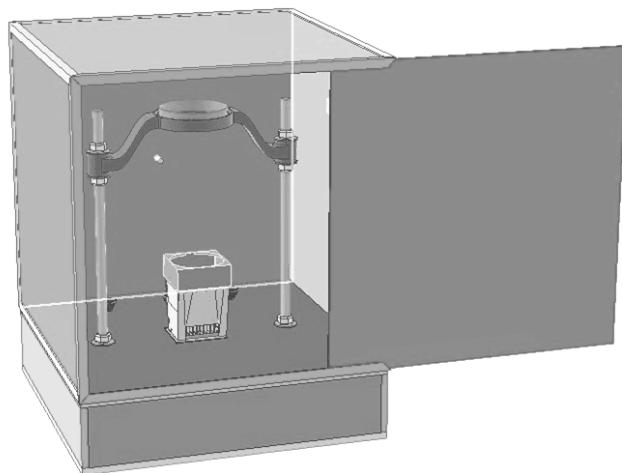
El procedimiento experimental consistió en incubaciones prolongadas manteniendo la temperatura entre 25°C y 37°C y la humedad relativa por encima del 85 %. Las señales se adquirieron a 1Hz y se aplicaron perturbaciones controladas con el fin de evaluar estabilidad y robustez de los controladores. Los resultados cuantitativos, la caracterización del sistema y el modelo obtenido a partir de los ensayos de identificación se presentan en la sección de Resultados.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Diseño CAD del sistema de incubación

La Figura 1 muestra el diseño del sistema de incubación propuesto, donde se observan las diversas partes de este, tanto sus sensores, actuadores y elementos de soporte para ubicar las muestras experimentales del hongo *Aspergillus flavus*.

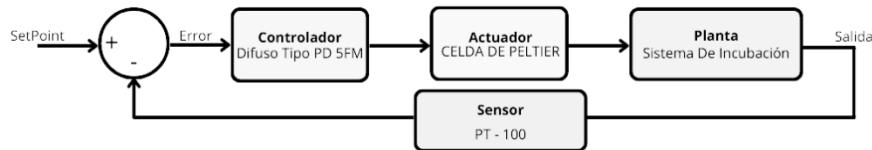
**Figura 1.** Diseño CAD del sistema de incubación.  
**Figure 1.** CAD design of the incubation system.



#### 3.2. Diagrama de Control

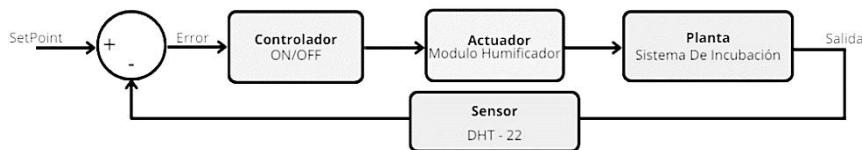
**Control de temperatura:** Esta variable de control presenta un lazo cerrado con un controlador difuso tipo PD como se visualiza en la Figura 2.

**Figura 2.** Lazo de control de temperatura.  
**Figure 2.** Temperature control loop.



**Control de humedad relativa:** Esta variable de control presenta un lazo cerrado con un control ON/OFF como se visualiza en la Figura 3.

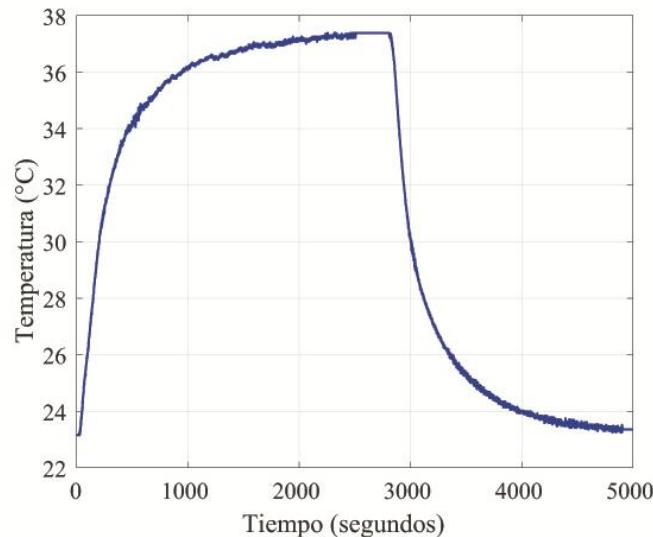
**Figura 3.** Lazo de control de humedad.  
**Figure 3.** Humidity control loop.



### 3.3. Caracterización del sistema de Temperatura

La caracterización del sistema se llevó a cabo considerando la potencia máxima de los actuadores teniendo como resultado la Figura 4 donde se observa como la temperatura tiene un valor máximo de 37°C y un mínimo de 22.5°C, además dicha grafica proporciona el comportamiento del incremento y disminución de la variable a controlar.

**Figura 4.** Caracterización del sistema de temperatura.  
**Figure 4.** Temperature system characterization.



A partir de los datos tomados de la caracterización del sistema se obtuvo la función de transferencia por medio de la función *ident* de Matlab la cual representa al lazo de temperatura como se visualiza en la ecuación (1). Esta ecuación cuenta con cero ceros y dos polos, su ganancia en lazo abierto es de  $0.7949 \times 10^{-3}$ , lo que permite inferir que la velocidad con la que el sistema tiende a estabilizar va a ser muy lenta.

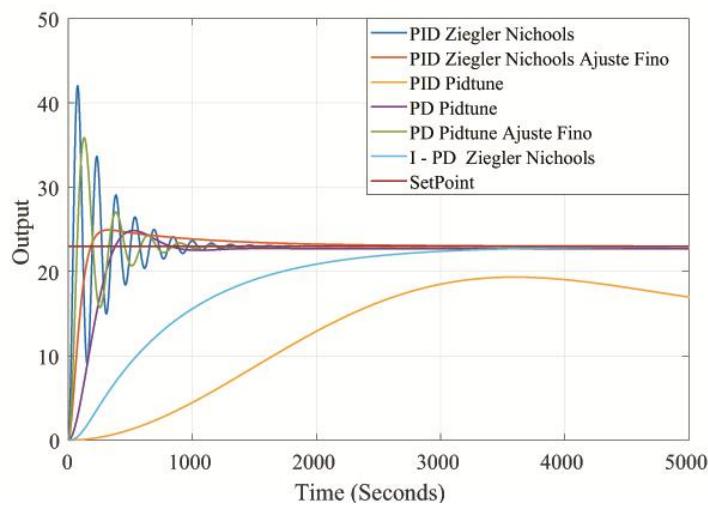
$$G(s) = \frac{6.736 \times 10^{-9}}{s^2 + 0.0003199s + 6.877 \times 10^{-7}} \quad (1)$$

### 3.4. Control Clásico

Por medio de la Figura 5, se observó el comportamiento de los controladores clásicos diseñados para el sistema de incubación, donde el controlador PID calculado mediante el método de Ziegler-Nichols y ajustado sus constantes mediante sintonización fina presentó uno de los mejores comportamientos junto con el controlador óptimo I-PD. Las características que resaltaron en el diseño de estos controladores fueron un menor sobreimpulso con respecto a los demás controladores, parámetro óptimo para definir la robustez que tendrá la planta con el sistema de control implementado.

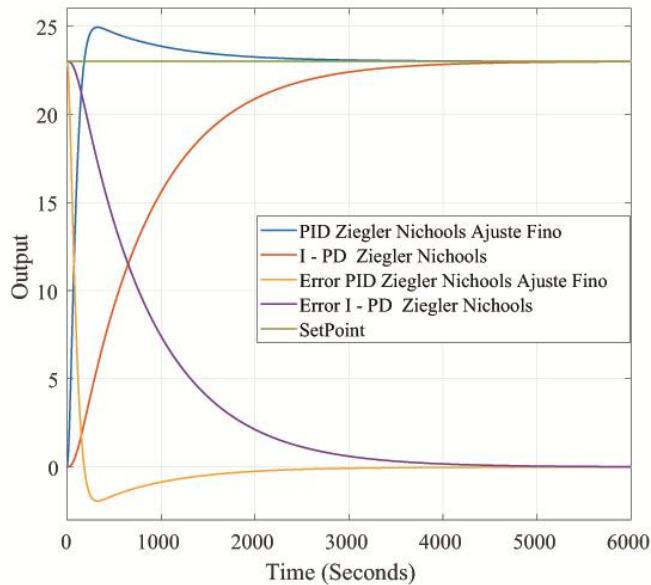
**Figura 5.** Respuesta del comportamiento de la planta frente a controladores clásicos.

**Figure 5.** Response of the plant's behavior under classical controllers.



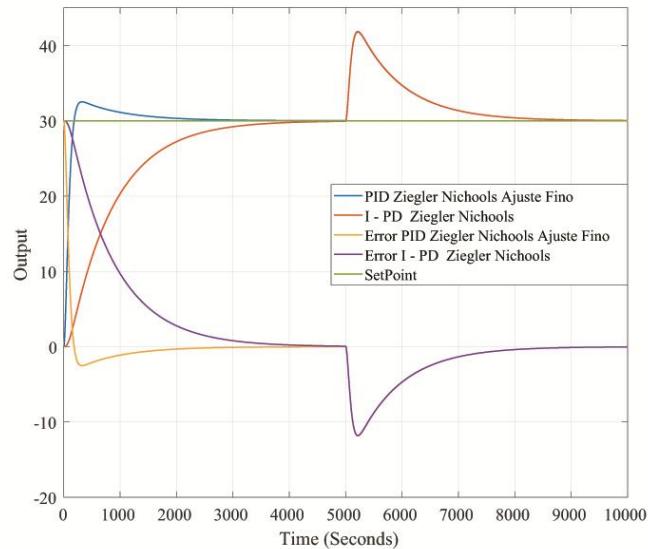
En función de la Figura 6 se pudo comparar el comportamiento de los mejores controladores diseñados y relacionar la salida del controlador con el error de los dos mejores controladores clásicos implementados.

**Figura 6.** Mejores controladores clásicos.  
**Figure 6.** Best classical controllers.



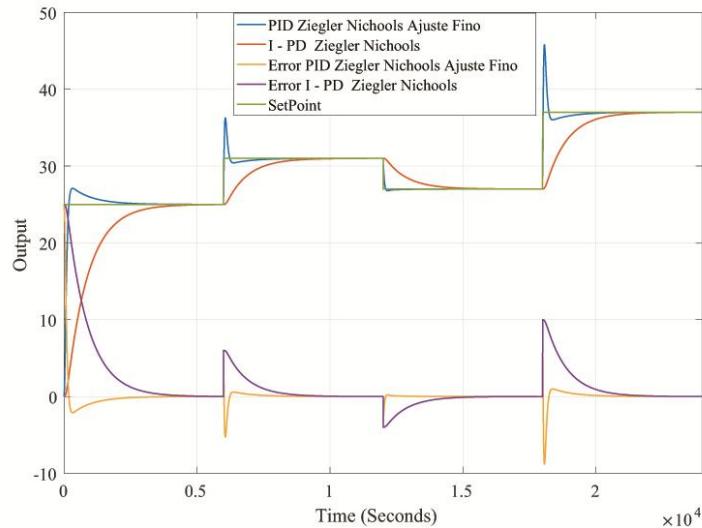
En la Figura 7, se puede analizar cómo los mejores dos controladores están en la capacidad de soportar perturbaciones de grandes magnitudes positivas tipo escalón, resaltando la robustez de las constantes estimadas para la operación del sistema.

**Figura 7.** Controladores clásicos sometidos a una perturbación tipo escalón.  
**Figure 7.** Classical controllers subjected to a step-type disturbance.



De la Figura 8 se observó un seguimiento de trayectoria robusto de los controladores PID Ziegler-Nichols y método óptimo I-PD, donde estos al someterlos tanto a cambios mínimos como extremos, dichos controladores responden de manera suave y consiguen estabilizarse en el setpoint que se indica según el seguimiento de trayectoria establecido.

**Figura 8.** Controladores clásicos en seguimiento de trayectoria dentro de los rangos de operación del sistema.  
**Figure 8.** Classical controllers in trajectory tracking within the system's operating ranges.



Con base en la Tabla 1, el controlador I-PD presenta el mejor balance de desempeño con un tiempo de subida de 3700 segundos, un sobreimpulso del 0%, un error en estado estable muy pequeño y un tiempo transitorio de 4385 segundos. Los controladores PD ofrecen respuestas más rápidas entre 100 a 400 segundos, pero con mayor sobreimpulso y un error en estado estable superior si se compara con los demás controladores diseñados. El PID de Ziegler Nichols (ZN) sin ajuste presenta un sobreimpulso excesivo, mientras que el controlador PID de Ziegler Nichols con ajuste minimiza ese criterio, pero su tiempo de establecimiento aumenta en proporción.

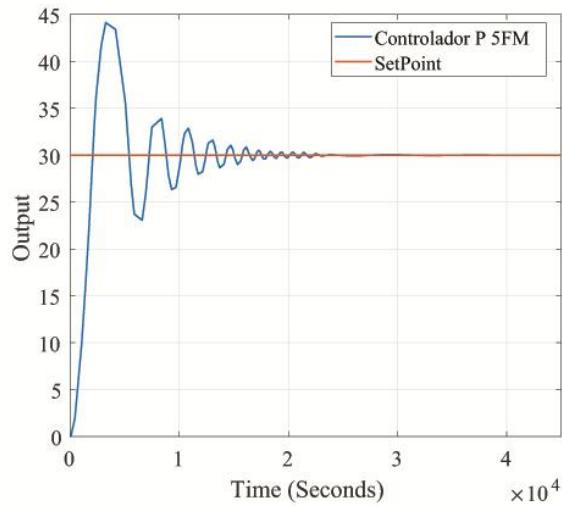
**Tabla 1.** Criterios de selección de controladores clásicos.  
**Table 1.** Selection criteria for classical controllers.

Tipo de Controlador	Tiempo de Subida	Overshoot	Error en Estado Estable	Tiempo Transitorio
PID – ZN	80.67 Seg.	80.33%	0.0037 °C	1232.3 Seg.
PID - ZN Ajuste Fino	205.12 Seg.	6%	0.0041	2228.5 Seg.
PID - PIDTUNE	N.A	N.A	N.A	N.A
PD - PIDTUNE	400.3 Seg.	4%	0.003 °C	2100.8 Seg.
PD - PIDTUNE Ajuste Fino	140.3 Seg.	30%	0.0032 °C	1021.8 Seg.
I-PD – ZN	3700.8 Seg.	0%	0.005 °C	4385 Seg.

### 3.5. Control Difuso

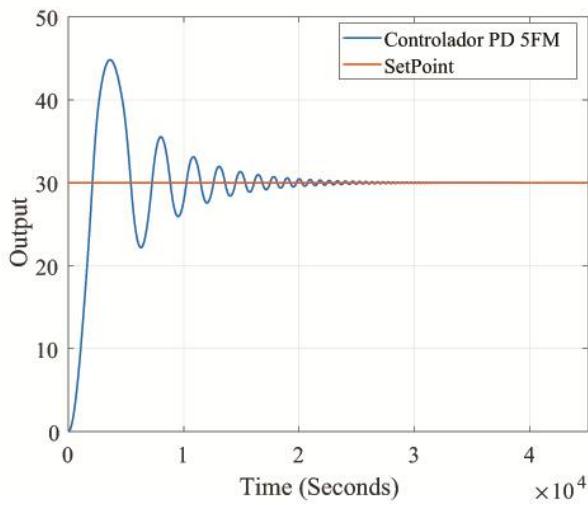
La Figura 9 representa la respuesta del controlador difuso tipo Proporcional (P) de 5 funciones de membresía, donde este regula en el valor medio de temperatura del sistema. Como características principales, este controlador tiene un alto porcentaje de sobreimpulso y un alto tiempo de establecimiento; estos criterios se ven influenciados por la naturaleza propia del sistema y la sinergia de los actuadores para lograr el control de la variable en un punto deseado.

**Figura 9.** Regulación en un punto - Controlador difuso tipo proporcional (P).  
**Figure 9.** Setpoint Regulation - Proportional Fuzzy Controller.



Por otro lado, la Figura 10 representa el controlador difuso tipo Proporcional Derivativo (PD) de 5 funciones de membresía implementado en el sistema real. Su comportamiento ante la regulación es similar al controlador P mostrado en la Figura 9; sin embargo, su superioridad se evidencia en la susceptibilidad de responder de manera óptima ante cambios de entrada y en su mayor adaptabilidad con el sistema de procesamiento. Esta mejora en el desempeño del controlador PD se debe a la incorporación de la acción derivativa, que permite anticipar las tendencias del error y proporcionar una respuesta más rápida y estable ante las perturbaciones del sistema.

**Figura 10.** Regulación en un punto - Controlador difuso tipo proporcional derivativo (PD).  
**Figure 10.** Setpoint Regulation – Proportional derivate Fuzzy Controller.



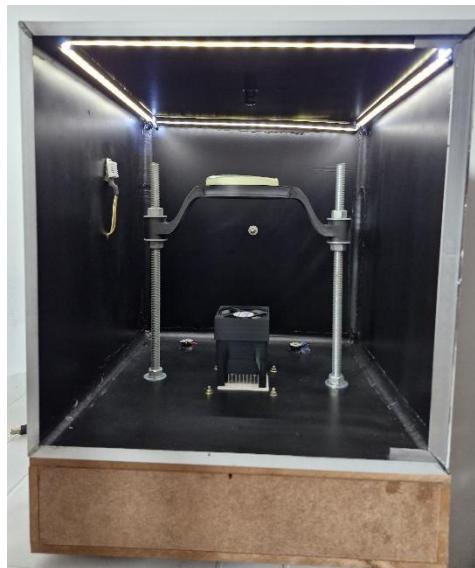
### 3.5. Prototipo del sistema de incubación

En la Figura 11 se presenta el prototipo implementado físicamente. Se integró un sistema de monitoreo visual para el seguimiento continuo del crecimiento fúngico durante las dos fases de incubación. El sistema exhibió un desempeño óptimo con una desviación máxima de 0.2°C en la variable de temperatura durante un período de operación de 10 horas. La respuesta del sistema demostró robustez ante perturbaciones

externas, mientras que la arquitectura modular del diseño optimizó la utilización del espacio de muestreo y facilitó el control de los parámetros ambientales críticos para el desarrollo del cultivo fúngico.

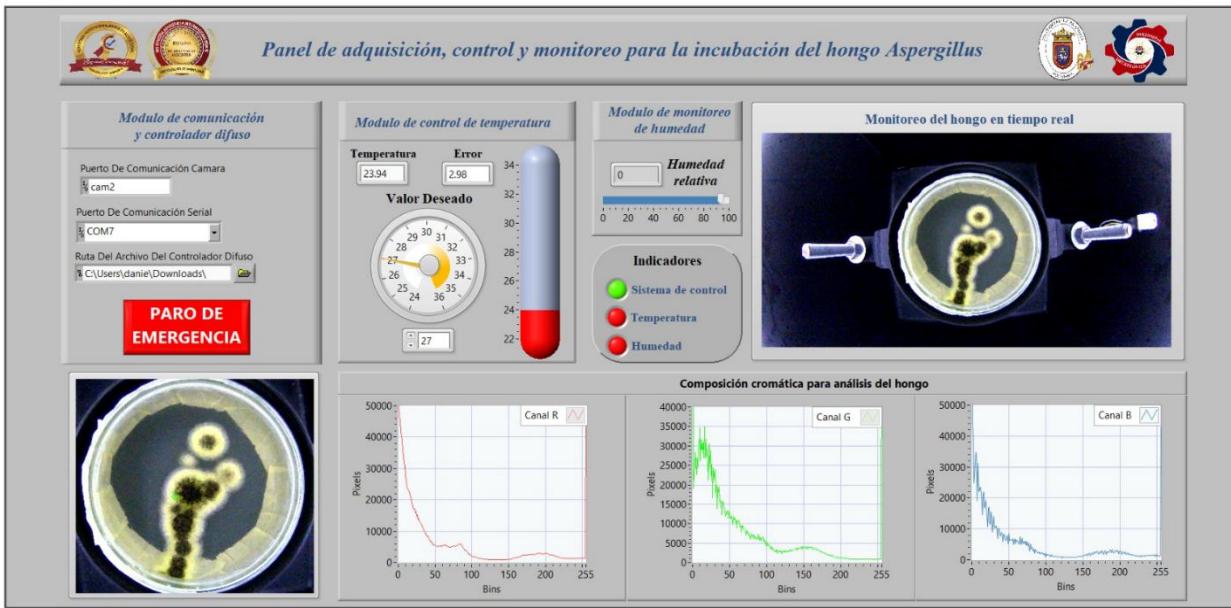
*Figura 11. Sistema de incubación implementado físicamente con seguimiento visual del crecimiento fúngico.*

*Figure 11. Physically implemented incubation system with visual monitoring of fungal growth.*



La Figura 12 presenta la interfaz de monitoreo desarrollada en LabVIEW, que integra adquisición de datos, control de actuadores y captura de imágenes en tiempo real. Las imágenes fueron procesadas mediante separación de canales RGB con el fin de resaltar cambios morfológicos en la superficie de las colonias fúngicas durante la incubación. Este método permitió observar de manera no invasiva la progresión del crecimiento en el tiempo, facilitando el registro y correlación temporal entre la evolución de la colonia y las condiciones ambientales controladas. Cabe resaltar que, debido al uso de iluminación blanca y a la ausencia de espectros específicos de excitación, el análisis cromático se interpreta únicamente como una medida morfológica y no como un indicador de producción de aflatoxinas.

**Figura 12. Interfaz de monitoreo y control con análisis cromático para cuantificación fúngica.**  
**Figure 12. Monitoring and control interface with chromatic analysis for fungal quantification.**



#### 4. CONCLUSIONES

La caracterización experimental del sistema térmico mostró que la cámara presenta una dinámica de primer orden con fuerte inercia, dos polos reales y una ganancia estática de  $0.7949 \times 10^{-3}$ , lo que se refleja en tiempos de establecimiento superiores a 3000 segundos cuando se aplica regulación pasiva. Con base en el modelo obtenido, la evaluación comparativa de estrategias de control evidenció que el controlador I-PD obtuvo el mejor desempeño global, registrando sobreimpulso nulo (0 %), error en estado estable de  $0.005^{\circ}\text{C}$  y un tiempo transitorio de 4385 segundos, parámetros que lo posicionan como la opción más robusta para incubaciones prolongadas. El controlador PID ajustado mediante Ziegler–Nichols redujo el sobreimpulso inicial del 80.33% a solo 6%, aunque con un incremento proporcional en el tiempo de establecimiento. Los controladores PD implementados con pidtune alcanzaron tiempos de subida entre 140 segundos y 400 segundos, pero mostraron sobreimpulso entre 4% y 30%, reflejando un mayor compromiso entre rapidez y estabilidad. El controlador difuso tipo PD, compuesto por 25 reglas y cinco funciones de membresía por entrada, mostró un comportamiento adaptable y estable ante perturbaciones, aunque con tiempos de establecimiento mayores debido a la no linealidad del sistema térmico y la granularidad del conjunto de reglas.

En la validación física del prototipo, el sistema mantuvo una desviación máxima de  $0.2^{\circ}\text{C}$  en la regulación térmica durante 10 horas de operación continua, demostrando que la arquitectura mecánica y la estrategia de control difuso tipo PD es adecuadas para mantener condiciones ambientales dentro del rango crítico requerido para el crecimiento de *Aspergillus flavus* ( $25\text{--}37^{\circ}\text{C}$ ). El control de humedad mediante humidificación ultrasónica permitió mantener valores superiores al 85%, confirmando la estabilidad de la variable pese a perturbaciones ambientales externas. El módulo de monitoreo visual en tiempo real, basado en la separación de canales RGB, permitió cuantificar de manera no invasiva la evolución morfológica del cultivo mediante variaciones en la distribución de intensidad de píxeles, lo cual constituye un recurso analítico útil para estudios longitudinales del desarrollo fúngico.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema es capaz de mantener condiciones termohigrométricas con precisión sub-décimal, responder de forma estable a perturbaciones y registrar información visual

relevante para análisis morfológicos. Como trabajo futuro se propone optimizar la capacidad térmica mediante celdas Peltier de mayor eficiencia ( $>120$  W), implementar control predictivo basado en modelos (MPC) para reducir tiempos transitorios por debajo de 2000 segundos, incorporar iluminación espectral controlada para análisis ópticos avanzados y desarrollar algoritmos de segmentación radiométrica que permitan cuantificar parámetros estructurales del hongo con mayor resolución temporal.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Q. Nji, O. Babalola, y M. Mwanza, «The effects of climatic variability on the occurrence of *Aspergillus* species in commercial maize from different agro-climatic regions in South Africa», *Fungal Biology*, vol. 129, n.º 6, p. 101639, 2025, doi: 10.1016/j.funbio.2025.101639.
- [2] H. Shi, J. Li, Y. Zhao, J. Mao, H. Wang, y J. Zhu, «Effect of *Aspergillus flavus* contamination on the fungal community succession, mycotoxin production and storage quality of maize kernels at various temperatures», *Food Research International*, vol. 174, p. 113662, 2023, doi: 10.1016/j.foodres.2023.113662.
- [3] J. Arengas Acosta, M. Lopez Ramirez, y R. Guzman Cabrera, «Impacto del preprocesamiento en la clasificación automática de textos usando aprendizaje supervisado y reuters 21578», *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 1, n.º 43, pp. 110-118, 2024, doi: 10.24054/rcta.v1i43.2506.
- [4] Z. Zhou, J. Feng, S. Ye, Q. Xiong, H. Hu, y C. Chen, «Modeling *Aspergillus flavus* growth on *Polygonati Rhizoma* as the function of temperature and water activity», *LWT - Food Science and Technology*, vol. 215, p. 117187, 2025, doi: 10.1016/j.lwt.2024.117187.
- [5] A. Lahouar, S. Marin, A. Crespo-Sempere, S. Saïd, y V. Sanchis, «Effects of temperature, water activity and incubation time on fungal growth and aflatoxin B1 production by toxinogenic *Aspergillus flavus* isolates on sorghum seeds», *Revista Argentina de Microbiología*, vol. 48, n.º 1, pp. 78-85, 2016, doi: 10.1016/j.ram.2015.10.001.
- [6] M. Manna y K. Kim, «Influence of Temperature and Water Activity on Deleterious Fungi and Mycotoxin Production during Grain Storage», *Mycobiology*, vol. 45, n.º 4, pp. 240-254, 2017, doi: 10.5941/MYCO.2017.45.4.240.
- [7] J. Kos, M. Anić, B. Radić, M. Zadravec, E. Janić Hajnal, y J. Pleadin, «Climate Change—A Global Threat Resulting in Increasing Mycotoxin Occurrence», *Foods*, vol. 12, n.º 14, p. 2704, 2023, doi: 10.3390/foods12142704.
- [8] E. Enríquez Rosero y G. Obando Obando, «Diseño de un sistema automatizado para el control de temperatura y humedad en una celda de cultivo de hongos *Pleurotus Ostreatus*», *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, n.º 46, pp. 141-149, 2025, doi: 10.24054/rcta.v2i46.4092.
- [9] R. Wang, «The Design of Temperature and Humidity Control System in Multi Incubators Based on Fuzzy Control», *AMM*, vol. 130-134, pp. 2400-2403, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.2400.
- [10] R. Wang, «The Design of Temperature and Humidity Control System Based on Fuzzy Control in Multi Incubators», en *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management Vol. I*, vol. 139, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 15-18. doi: 10.1007/978-3-642-27287-5\_3.
- [11] Md. Mizanur Rahman y Md. Saiful Islam, «Design of a Fuzzy Based Pid Algorithm for Temperature Control of An Incubator», *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1969, n.º 1, p. 012055, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1969/1/012055.
- [12] L. Wu *et al.*, «Edge Computing-Based Computer Vision and Deep Transfer Learning for High-Throughput Assessment of *Aspergillus Flavus* Infection in Crop Seeds», *Plant Phenomics*, p. 100110, 2025, doi: 10.1016/j.plaphe.2025.100110.
- [13] A. Bawaskar y D. Riyaz, «Automatic Control Incubator using a Sensor and Monitoring Software», *IJARSCT*, pp. 492-497, 2024, doi: 10.48175/IJARSCT-18674.

- [14] H. Yao, F. Zhu, R. Kincaid, Z. Hruska, y K. Rajasekaran, «A Low-Cost, Portable Device for Detecting and Sorting Aflatoxin-Contaminated Maize Kernels», *Toxins*, vol. 15, n.º 3, p. 197, 2023, doi: 10.3390/toxins15030197.
- [15] M. Rojas Puentes, C. Parada, y J. Leal Pabón, «Estructuras desglosadas de trabajo (EDT) en la gestión de alcance de proyectos de desarrollo de software», *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 1, n.º 39, pp. 51-58, 2023, doi: 10.24054/rcta.v1i39.1375.
- [16] C. Ariza Ariza, J. Martínez Baquero, O. Agudelo Varela, L. Rodríguez Umaña, y O. Beltrán Gutierrez, «Sistema de control y supervisión de temperatura y humedad relativa en cámara de fermentación», *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, n.º 40, 2023, doi: 10.24054/rcta.v2i40.2362.
- [17] R. Cueto Morelo, J. Atencio Flórez, y J. Gómez Gómez, «Sistema de identificación enfermedades y plagas en el cultivo de sandía», *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, n.º 42, pp. 96-107, 2023, doi: 10.24054/rcta.v2i42.2674.
- [18] A. Timarán Buchely y R. Timarán Pereira, «Minería de datos educativa para descubrir patrones asociados al desempeño académico en competencias genéricas», *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, n.º 38, pp. 87-95, 2023, doi: 10.24054/rcta.v2i38.1282.
- [19] S. Zhao, X. Qian, y J. Gong, «PID algorithm-based temperature control system for biological incubators», en *35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Yichang, China: IEEE, 2023, pp. 1079-1083. doi: 10.1109/CCDC58219.2023.10326603.
- [20] P. Laksono *et al.*, «A system based on fuzzy logic approach to control humidity and temperature in fungus cultivation», en *Proceedings of the Joint International Conference on Electric Vehicular Technology and Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (ICEVT & IMECE)*, Surakarta, Indonesia: IEEE, 2015, pp. 344-347. doi: 10.1109/ICEVTIMECE.2015.7496716.
- [21] Ö. Özluöymak, «Development of an UV-Based Imaging System for Real-Time Aflatoxin Contaminated Dried Fig Detection and Separation», *Tarım Bilimleri Dergisi*, vol. 20, n.º 3, p. 302, 2014, doi: 10.15832/tbd.87873.
- [22] M. Dirik, «Type-2 fuzzy logic controller design optimization using the PSO approach for ECG prediction», *Journal of Fuzzy Extension and Applications*, 2022, doi: 10.22105/jfea.2022.333786.1207.
- [23] S. Gubsky, «Development of Low-Cost Arduino-Based Equipment for Analytical and Educational Applications», en *CSAC 2023*, MDPI, 2023, p. 8. doi: 10.3390/CSAC2023-14893.
- [24] R. Anjali y Y. Deepak, «Evaluating wiring configurations for RTD sensorin temperature measurement», *JELE*, vol. 10, n.º 1, p. 1, 2019, doi: 10.26634/jele.10.1.16422.
- [25] Azhari *et al.*, «Design of Monitoring System Temperature And Humidity Using DHT22 Sensor and NRF24L01 Based on Arduino», *Journal of Physics Conference Series*, vol. 2421, n.º 1, p. 012018, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2421/1/012018.
- [26] H. Hernández, D. Novoa, y D. Mendoza, «Energías renovables y medidas de eficiencia energética aplicables a las instituciones prestadoras de salud en Colombia», *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 1, n.º 41, 2023, doi: 10.24054/rcta.v1i41.2557.
- [27] R. Jiménez, J. Martínez, y O. Agudelo, «Control difuso para pinza robótica blanda orientada a objetos no rígidos», *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, n.º 42, pp. 1-6, 2023, doi: 10.24054/rcta.v2i42.2647.
- [28] A. Yusop, F. Tarmizi, N. Sulaiman, *et al.*, «Cooling the future: Peltier thermoelectric solutions for photovoltaic panels», *International Journal of Ambient Energy*, vol. 45, n.º 1, p. 2372361, 2024, doi: 10.1080/01430750.2024.2372361.
- [29] F. Ben Othman, A. Maurel, S. Delattaignant, M. Roque, A. Louis Alexandre, y C. Roque, «Study of a new humidifier configuration designed for climatic chambers», *Building and Environment*, vol. 242, p. 110463, 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110463.