

Desarrollo de germinador para hongos y plantas con control PI de temperatura

Development of a Mushroom and Plant Germinator with PI Temperature Control

Anette V. Altamirano¹, David R. Torres¹, Armando P. Angulo¹, Rommel G. Grajeda¹, David E. Castro¹, Hilda K. Ramírez¹, Leonel E. Amabilis¹

Autor de correspondencia: anette.ac@culiacan.tecnm.mx

¹ Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán, División de estudios de posgrado e investigación.

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, modelado e implementación de un sistema de control térmico basado en control clásico para un germinador con aplicaciones biotecnológicas, orientado a operar en entornos con alta variabilidad climática. El comportamiento dinámico del sistema térmico se describió mediante un modelo de segundo orden con retardo de transporte, obtenido a partir de balances de energía y validado experimentalmente. Con base en este modelo, se diseñó un controlador proporcional-integral (PI) y se sintonizó mediante el método clásico de Ziegler-Nichols. El sistema de control se implementó en un microcontrolador ESP32 y utilizó un módulo termoelectrico tipo Peltier. Los resultados experimentales mostraron que el controlador PI regula la temperatura a 28.5 °C, elimina el error en estado estacionario y mantiene la estabilidad del sistema, aun ante perturbaciones externas y las limitaciones asociadas al muestreo discreto y a la resolución del sensor. El desempeño observado confirma la idoneidad del control PI en sistemas térmicos.

Palabras clave: control clásico, control PI, germinador, modelado térmico, ESP32.

Abstract

This work presents the design, modeling, and implementation of a classical thermal control system for a germinator with biotechnological applications, intended to operate under conditions of high climatic variability. The dynamic behavior of the thermal system was described using a second-order model with transport delay, derived from energy balance equations and experimentally validated. Based on this model, a proportional-integral (PI) controller was designed and tuned using the classical Ziegler-Nichols method. The control system was implemented on an ESP32 microcontroller and employed a Peltier-type thermoelectric module as the actuation element. Experimental results showed that the PI controller regulates the temperature to 28.5 °C, eliminates steady-state error, and maintains closed-loop stability, even in the presence of external disturbances and limitations associated with discrete sampling and sensor resolution. The observed performance confirms the suitability of PI control for thermal systems with high inertia.

Keywords: classical control, PI control, germinator, thermal modeling, ESP32

Recibido: 07/04/2026; Aceptado: 27/04/2026; Publicado 30/04/2026

Introducción

La biotecnología representa un campo innovador e interdisciplinario. Su importancia radica en la capacidad para enfrentar la crisis ambiental de origen antropogénico [1-2]. La aplicación de bioprocesos en agricultura, medicina e industria permite desarrollar tecnologías con organismos vegetales y fúngicos. Estas innovaciones mitigan el impacto ambiental y promueven la soberanía alimentaria. Tales iniciativas resultan esenciales para cumplir los objetivos nacionales de sostenibilidad [3]. Por ello, se requieren herramientas para la obtención rápida y controlada de especímenes de estudio.

Un desafío crítico en laboratorios con recursos limitados es la incertidumbre climática. En regiones como Culiacán, Sinaloa, imperan temperaturas extremas. El proceso de desertificación incrementó la aridez en un 70 % durante las últimas décadas [4-5]. Estas condiciones tornan indispensable la implementación de espacios controlados. Dichos sistemas de lazo cerrado aíslan los cultivos de perturbaciones externas. Así, se garantizan condiciones óptimas para el desarrollo biológico.

Existen antecedentes relevantes sobre el control de variables en la germinación. Barreto et al. [6] implementaron estrategias como el control proporcional integral derivativo, la lógica difusa y las redes neuronales. Sus resultados demostraron la robustez del control PID.

Este mantiene referencias de temperatura con errores de ± 0.2 °C. Tal precisión valida su aplicación en la agricultura controlada.

García Quevedo y Romero Cabra [7] desarrollaron un sistema automatizado para germinar lechuga. Utilizaron una tarjeta electrónica Raspberry Pi 3 y el método de sintonización de Ziegler-Nichols. Su investigación resaltó la importancia de modelar el comportamiento térmico como un sistema de primer orden con retardo. Este enfoque permitió establecer rangos de germinación entre 18 °C y 23 °C. El estudio estableció una base metodológica para caracterizar incubadoras agrícolas.

La tendencia actual hacia la miniaturización impulsa el uso de microcontroladores accesibles y actuadores de estado sólido. González Anaya y Villaseñor-Mora [8] presentaron un sistema de control térmico para muestras biológicas. Su diseño integró un microcontrolador ESP32 y módulos termoelectricos tipo Peltier. La investigación confirmó la efectividad de la modulación por ancho de pulso y un control PI sintonizado. Esta combinación alcanza estabilidad térmica y reduce los tiempos de respuesta. Además, evita sobreoscilaciones en sistemas de bajo costo.

A diferencia de los sistemas con resistencias o compresores, la incubadora propuesta emplea tecnología termoelectrica. Las placas Peltier proporcionan calefacción y refrigeración según se requiera. Un algoritmo de control PI gobierna el sistema mediante un

microcontrolador ESP32. El diseño busca el equilibrio entre precisión biológica y robustez agrícola. Así, se optimiza la gestión de la resistencia y la capacitancia térmica. Este proyecto propone el diseño de una incubadora compacta adaptada al clima de Culiacán, Sinaloa.

Fundamentación Teórica

Este artículo presenta la fundamentación teórica mediante el estudio de sistemas dinámicos y modelado matemático. Asimismo, se justifica la selección de sensores DHT22 y actuadores tipo Peltier. La metodología de desarrollo describe el diseño de piezas en tercera dimensión (3D), el ensamblaje de componentes electrónicos y la programación del firmware. El documento concluye con el análisis del sistema en tiempo continuo y discreto. Los resultados experimentales y de simulación validan la eficiencia de la incubadora propuesta.

A. Ecuaciones dinámicas

El modelo matemático se fundamenta en el principio de conservación de la energía, donde la energía almacenada equivale a la diferencia entre el flujo entrante y el saliente [9-12]. Debido a la complejidad del sistema, este se segmenta en dos subsistemas conectados en serie con un retardo físico asociado.

Subsistema de alta inercia: Cámara de incubación

Este componente representa la acumulación de calor en la vitrina. Presenta una respuesta lenta debido a la inercia térmica del volumen de aire y las paredes. Físicamente, el cambio de temperatura depende del flujo térmico de entrada y las pérdidas hacia el ambiente a través de las superficies.

La dinámica se describe mediante:

$$\tau_2 \frac{dT_{caja}(t)}{dt} + T_{caja}(t) = K \cdot T_{aire_{tubo}}(t). \quad (1)$$

Donde τ_2 representa la constante de tiempo de la cámara, determinada por su resistencia y capacitancia térmica.

Subsistema de baja inercia: Módulo termoeléctrico y disipador

Describe la velocidad de transferencia de calor en el disipador metálico antes de su entrega al flujo de aire. La reducida masa del metal en comparación con el volumen de la cámara permite una respuesta dinámica acelerada. La potencia de la placa Peltier incrementa la temperatura del disipador para su posterior transferencia al aire circulante.

La dinámica se establece como:

$$\tau_1 \frac{dT_{aire_{tubo}}(t)}{dt} + T_{aire_{tubo}}(t) = K_{peltier} \cdot u(t) \quad (2)$$

Donde $u(t)$ es el porcentaje de potencia aplicado a la placa Peltier.

Retardo de transporte

El flujo de aire requiere un tiempo de tránsito desde el elemento calefactor hasta la cámara a través de un conducto de 15 cm. El cálculo, basado en la velocidad del fluido y la distancia recorrida, determina un tiempo de transporte de 1.4 segundos.

Esta característica se modela como:

$$T_{entrada_{caja}}(t) = T_{aire_{tubo}}(t - 1.4). \quad (3)$$

B. Función de transferencia

Las ecuaciones diferenciales de la sección anterior se transforman al dominio de Laplace (s) para obtener expresiones algebraicas [13-14]. Este procedimiento requiere considerar la siguiente equivalencia para la derivada de la temperatura:

$$\frac{d}{dt} \rightarrow s. \quad (4)$$

Subsistema de baja inercia (disipador)

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (2) se tiene la dinámica:

$$\tau_1 s T_{aire_{tubo}}(s) + T_{aire_{tubo}}(s) = K_1 U(s). \quad (5)$$

Factorizando:

$$T_{aire_{tubo}}(s) (\tau_1 s + 1) = K_1 U(s). \quad (6)$$

Despejando la función de transferencia de (6) se tiene:

$$T_{aire_{tubo}}(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} U(s). \quad (7)$$

Subsistema de alta inercia (cámara) con retardo

El retardo temporal se modela mediante el término exponencial $e^{-t a s}$. Aplicando Laplace a (5):

$$\tau_2 s T_{caja}(s) + T_{caja}(s) = K_2 T_{aire_{tubo}}(s) e^{-1.4 s}. \quad (8)$$

Factorizando:

$$T_{caja}(s)(\tau_2 s + 1) = K_2 e^{-1.4s} T_{aire_tubo}(s) \quad (9)$$

Despejando obtenes la formulación (3):

$$T_{caja}(s) = \frac{K_2 e^{-1.4s}}{\tau_2 s + 1} T_{aire_tubo}(s). \quad (10)$$

Modelo completo del sistema

Sustituyendo la salida del primer subsistema en el segundo:

$$T_{caja}(s) = \left(\frac{K_2 e^{-1.4s}}{\tau_2 s + 1} \right) \left(\frac{K_1}{\tau_1 s + 1} U(s) \right). \quad (11)$$

Agrupando término como en (3):

$$T_{caja}(s) = \frac{K_1 K_2 e^{-1.4s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} U(s). \quad (12)$$

Definiendo $K = K_1 K_2$, se obtiene la función de transferencia final para (6) como:

$$\frac{T_{caja}(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-1.4s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (13)$$

donde:

- $K = K_1 K_2$: ganancia total del sistema
- K_1 : ganancia del módulo Peltier
- K_2 : ganancia térmica de la cámara
- τ_1 : constante de tiempo del subsistema rápido (disipador)
- τ_2 : constante de tiempo del subsistema lento (cámara)
- $e^{-1.4s}$: retardo de transporte del aire

Metodología

A. Selección de Sensores y Actuadores

La medición de variables ambientales integra el sensor DHT22. Este dispositivo permite registrar temperatura y humedad de forma simultánea. Su selección responde a la precisión requerida en aplicaciones de control ambiental y a la facilidad de integración en sistemas embebidos.

Como actuadores térmicos se implementaron módulos Peltier [15]. Estos componentes regulan la temperatura mediante la modulación de la potencia aplicada. Su respuesta dinámica acelerada y dimensiones compactas facilitan la incorporación en el sistema de germinación.

Tras la selección de los dispositivos, se realizó el diseño en tercera dimensión (3D) de las piezas mecánicas. Estos elementos aseguran la instalación correcta de los componentes. Asimismo, el diseño garantiza la circulación de aire y la transferencia térmica eficiente dentro del prototipo.

B. Modelo mecánico en 3D

El desarrollo del modelo en tercera dimensión (3D) empleó la herramienta de diseño asistido por computadora SolidWorks. En esta etapa se diseñaron las piezas para alojar sensores, módulos Peltier, disipadores y elementos de ventilación. La configuración espacial de estos componentes se ilustra en la Figura 1.

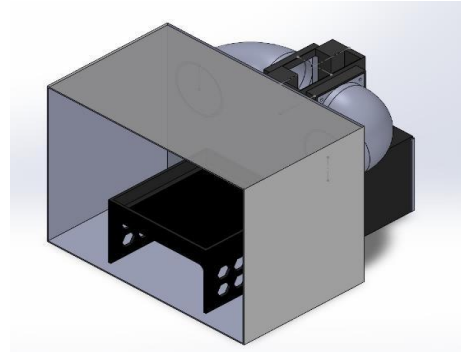


Figura 1. Representación del germinador en 3D.

El diseño mecánico precede al análisis dinámico de la incubadora. El estudio del sistema inicia en tiempo continuo mediante un modelo matemático del comportamiento térmico. Posteriormente, la representación se transforma al dominio discreto. Esta conversión permite la implementación en un sistema de control digital y asegura la coherencia entre la estructura física y la respuesta dinámica.

C. Análisis del Sistema en Tiempo Continuo

El modelado térmico consta de dos subsistemas de primer orden en cascada y un retardo de transporte. La función de transferencia se obtiene mediante el balance de energía y la aplicación de la transformada de Laplace, como se indica en la ecuación (11).

Para el análisis en espacio de estados, sin considerar el retardo inicial, la función de transferencia (7) se expresa como:

$$G(s) = \frac{0.08}{2400s^2 + 140s + 1}. \quad (14)$$

Esta relación conduce a la ecuación diferencial de segundo orden:

$$\ddot{y} = -0.05833\dot{y} - 0.0004167y + 0.00003333u. \quad (15)$$

Definiendo los estados:

$$x_1 = y, x_2 = \dot{y} \quad (16)$$

El modelo en espacio de estados se representa mediante:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.0004167 & -0.05833 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.00003333 \end{bmatrix} u. \quad (17)$$

La ecuación de salida es:

$$y = [1 \ 0]x. \quad (18)$$

Finalmente, el retardo de transporte se incorpora como un desplazamiento temporal en la señal de entrada:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - 1.4). \quad (19)$$

D. Sintonización e implementación del controlador PI

El control de temperatura emplea un algoritmo de tipo proporcional-integral (PI). Esta selección responde a la dinámica térmica lenta del proceso y a la existencia de retardo físico. El sistema prescinde de acción derivativa para evitar la amplificación de ruido. La sintonización utiliza el método de Ziegler-Nichols [16], mediante la técnica de curva de reacción. Este enfoque resulta idóneo para plantas aproximadas por modelos de primer orden con retardo.

E. Método de Ziegler-Nichols (Curva de reacción)

Este procedimiento analiza la respuesta temporal ante una entrada tipo escalón. El trazo de la línea tangente en el punto de máxima pendiente permite identificar los parámetros del modelo.

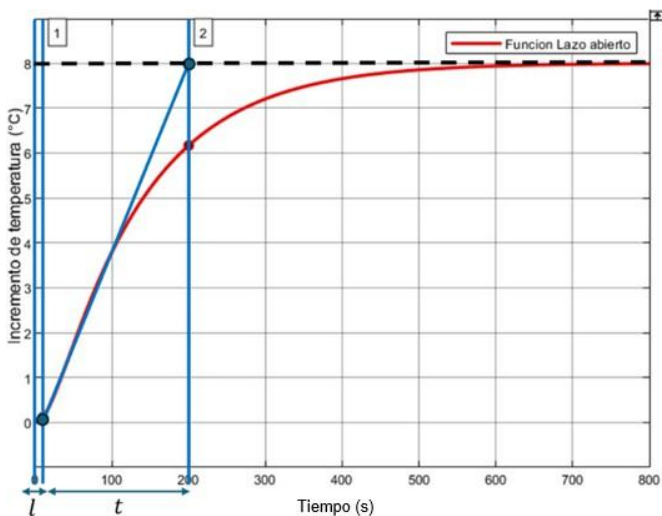


Figura 2. Gráfica experimental del método de Ziegler-Nichols.

La planta se describe mediante la función de transferencia:

$$G_p(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (20)$$

donde K representa la ganancia del sistema, L el tiempo muerto o retardo, y τ la constante de tiempo del proceso.

A partir del análisis de la gráfica experimental, se identificaron los valores:

$$K = 8, L = 10s, \tau = 190s$$

F. Selección del controlador

La dinámica del sistema y las recomendaciones técnicas de Ziegler-Nichols sustentan la elección del controlador PI. Las expresiones de sintonización son:

$$K_p = 0.9 \frac{\tau}{KL} \quad (21)$$

$$\tau_i = \frac{L}{0.3}. \quad (22)$$

La acción derivativa no se considera, ya que su contribución no es necesaria para este tipo de sistema térmico y podría amplificar el ruido de medición.

G. Cálculo de las ganancias

Sustituyendo los valores identificados:

$$K_p = 0.9 \left(\frac{190}{8 \cdot 10} \right) = 2.1375$$

$$\tau_i = \frac{10}{0.3} = 33.33s$$

De esta manera, el controlador PI en su forma ideal queda definido como:

$$G_c(s) = 2.1375 \left(1 + \frac{1}{33.33s} \right)$$

Una vez definidos los parámetros del controlador, se procedió a validar el comportamiento del sistema en lazo cerrado mediante simulación. La Figura 3 ilustra el diagrama de bloques implementado, donde el controlador $G_c(s)$ interactúa con la función de transferencia de la planta, permitiendo verificar la estabilidad del sistema antes de su implementación física.

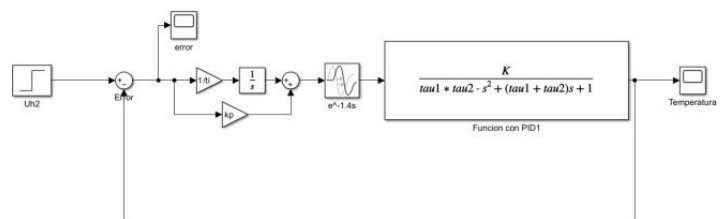


Figura 3. Control PI aplicado a la planta.

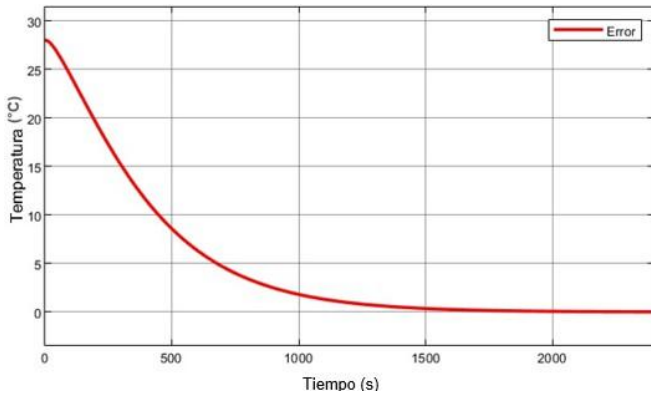


Figura 4. Gráfica del error.

El desempeño del controlador se evaluó mediante el análisis de la señal de error. Esta variable representa la diferencia entre la referencia y la temperatura actual. Como indica la Figura 4, la magnitud del error disminuye de forma constante hasta converger a cero cerca de los 1500 s. La acción integral elimina el error en estado estacionario. Este comportamiento asegura la coincidencia de la temperatura final con el punto de ajuste establecido.

H. Implementación del PI en el microcontrolador

La implementación en el dispositivo electrónico emplea una estructura discreta equivalente al controlador PI ideal [19]. El algoritmo requiere la ganancia proporcional y la tasa integral, definida como la inversa del tiempo integral:

$$\frac{1}{\tau_i} = 0.03 \text{ s}^{-1}. \quad (23)$$

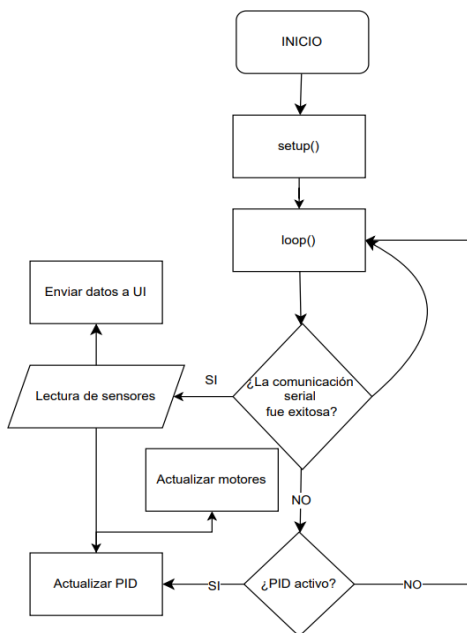


Figura 5. Diagrama de flujo del controlador.

Este valor representa la frecuencia de acción integral. Dicho parámetro se ingresa en el algoritmo de control del microcontrolador.

El controlador se ejecuta de forma periódica en el bucle principal del programa. El sistema utiliza la temperatura del sensor como realimentación. Posteriormente, ajusta la potencia en los módulos Peltier para regular la variable térmica. La Figura 5 ilustra el flujo de operación.

La sintonización e implementación adecuadas permiten alcanzar la temperatura de referencia con estabilidad. Estos resultados validan el método de Ziegler–Nichols como base para el control térmico del prototipo.

I. Análisis del Sistema en Tiempo Discreto

La selección del intervalo de muestreo se fundamenta en el Teorema de Nyquist–Shannon [20]. Este principio establece la condición necesaria para reconstruir una señal continua mediante muestras discretas. El proceso evita la pérdida de información y la aparición de aliasing. El teorema determina una frecuencia de muestreo equivalente al menos al doble de la frecuencia máxima de la señal:

$$f_s \geq 2f_{max}. \quad (24)$$

La dinámica térmica del germinador posee una constante de tiempo τ , determinada de forma experimental. El sistema actúa como un filtro paso bajo natural con una frecuencia de corte aproximada de:

$$f_{max} \approx \frac{1}{2\pi\tau} \approx 0.0008 \text{ H}. \quad (25)$$

Bajo este criterio, la tasa de actualización de los sensores se fijó en 1 Hz (una muestra por segundo). Este valor satisface la condición de Nyquist ($f_s > 2f_c$) y asegura la adquisición correcta de la temperatura. Para el diseño del algoritmo en tiempo discreto se adoptó un periodo de muestreo menor: $T_s = 0.1 \text{ s}$.

Esta estrategia de sobremuestreo permite representar el retardo de transporte con mayor precisión. El retardo físico del aire en el conducto es cercano a 1.4 s. Por ello, la selección de T_s permite modelar dicho tiempo muerto como un número entero de periodos:

$$1.4 = 7T_s$$

El modelo en espacio de estados se aproxima mediante el método de Euler:

$$x[k + 1] = A_d x[k] + B_d u[k - 7]. \quad (26)$$

Donde las matrices de transición se definen por:

$$A_d \approx I + AT_s \quad (27)$$

$$B_d \approx \begin{bmatrix} T_s^2 \\ 2 \\ T_s \end{bmatrix} \cdot 0.00003333. \quad (28)$$

La ecuación de salida se expresa como:

$$y[k] = Cx[k]. \quad (29)$$

Esta representación discreta conserva la dinámica del sistema continuo. Asimismo, facilita la implementación directa en el microcontrolador. El sistema integra dos módulos de software coordinados. El firmware embebido en el microcontrolador gestiona el control en tiempo real. Por su parte, una interfaz gráfica de usuario (GUI) permite el monitoreo y la sintonización de parámetros desde un ordenador. El desarrollo del firmware para el microcontrolador ESP32 empleó el lenguaje C++ bajo el entorno PlatformIO IDE. La arquitectura híbrida combina el Framework de Arduino con la Capa de Abstracción de Hardware (HAL) de Espressif. Esta estructura optimiza la gestión de recursos y reduce la latencia en el bucle de control. La lógica del programa se organiza en tareas no bloqueantes para tres procesos críticos:

1. **Adquisición de datos:** Lectura de los sensores DHT22 y LDR mediante un algoritmo de promedio para validar la integridad de la información.
2. **Lazo de control:** Ejecución del algoritmo PID discreto. La salida se mapea a señales de modulación por ancho de pulso (PWM) de 8 bits a 1 kHz para regular las placas Peltier y ventiladores.
3. **Comunicación serial:** Interpretación de tramas ASCII a 115200 baudios para modificar el punto de ajuste (setpoint) y las ganancias en tiempo real.

Arquitectura de Comunicación

El intercambio de información entre la PC y el germinador emplea un protocolo asíncrono. El sistema opera con dos hilos concurrentes. El primero consiste en un ciclo impulsado por eventos para el envío de comandos. El segundo es un ciclo de telemetría con reportes de estado cada 1000 ms. Esta configuración garantiza la sincronización entre el control digital y la planta física. La Figura 6 ilustra el esquema de comunicación implementado.

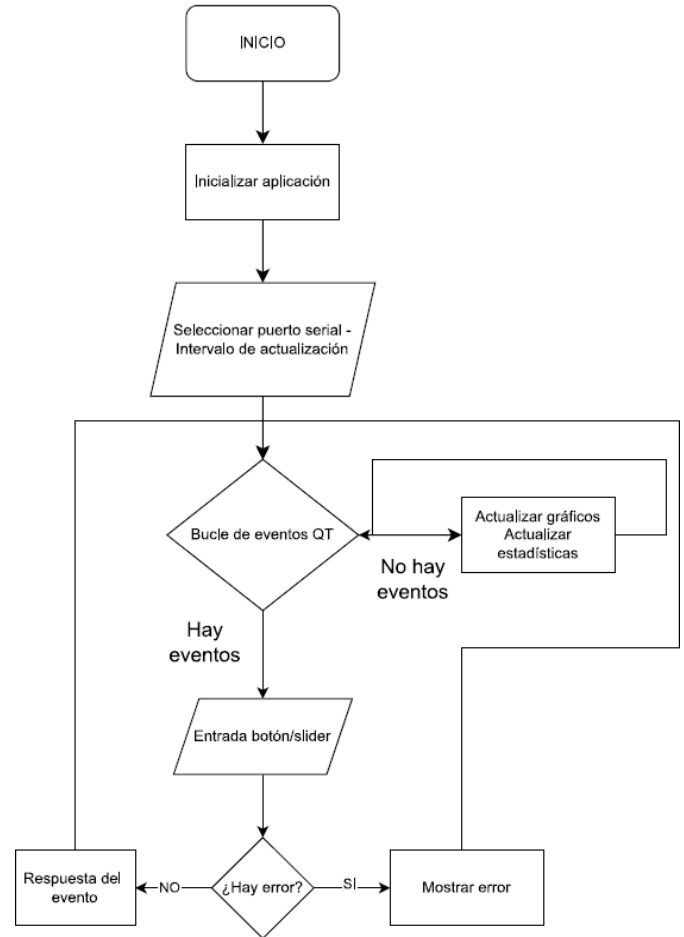


Figura 6. Diagrama de flujo de la comunicación serial bidireccional, detallando la interacción entre los eventos de usuario en la interfaz y el ciclo de control en el firmware.

Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)

La supervisión del germinador utiliza una aplicación de escritorio desarrollada con el framework Qt 6 (C++). La interfaz presenta un enfoque modular para separar las funciones de configuración del monitoreo visual.

Panel de configuración y sintonización

Este módulo funge como centro de mando del sistema. El panel establece la conexión serial y configura los parámetros operativos. Incluye controles numéricos para ajustar el setpoint y las ganancias del controlador (K_p, K_i, K_d). Asimismo, permite conmutar entre los modos automático y manual. La Figura 7 muestra el panel de configuración.

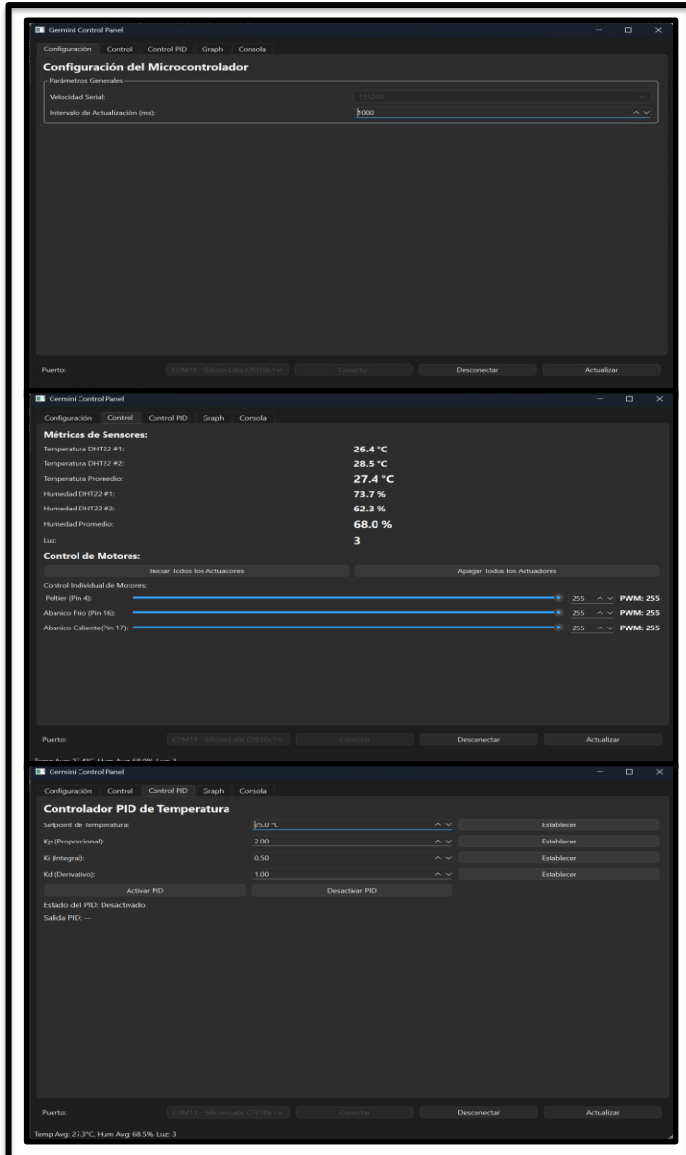


Figura 7. Panel de configuración de la GUI. Se observan los controles para la selección del puerto COM, ajuste de ganancias PID y establecimiento de la temperatura deseada (setpoint).

Sistema de visualización de datos

El segundo módulo, ilustrado en la Figura 8, se enfoca en la telemetría y el monitoreo de variables ambientales. La implementación emplea la librería QtCharts para generar gráficas dinámicas. Estas herramientas visualizan en tiempo real las señales de los sensores de humedad, temperatura y luminosidad. El módulo facilita la supervisión de la homogeneidad en la cámara. Asimismo, permite verificar la integridad de las lecturas durante el proceso de control.

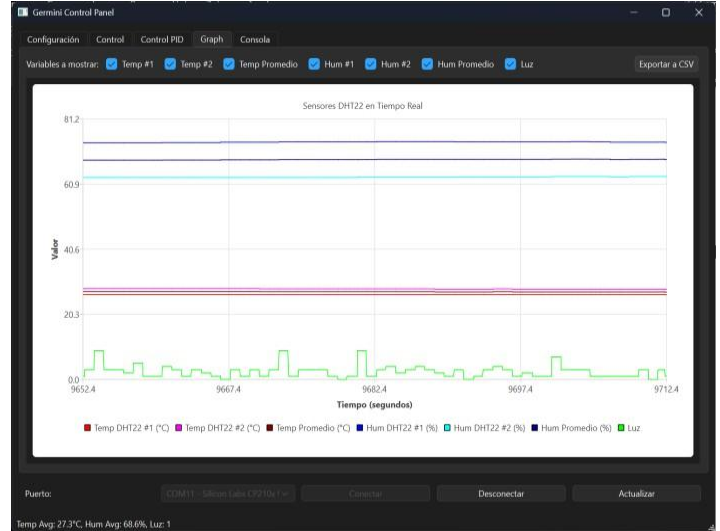


Figura 8. Módulo de visualización de telemetría. Las curvas representan el comportamiento en tiempo real de la temperatura y humedad registradas por los sensores DHT22, así como el nivel de luminosidad registrado por una fotorresistencia.

La integración entre el firmware y la interfaz gráfica consolida una herramienta robusta. Dicha sinergia permite la supervisión constante sin comprometer el lazo de control. Esta arquitectura facilita el ajuste de parámetros y asegura la estabilidad de las condiciones térmicas.

Resultados

La validación del modelo matemático y del diseño del controlador requirió una comparación técnica. Se contrastó la respuesta del prototipo físico frente a los resultados del controlador PI diseñado. La Figura 9 ilustra la relación entre la temperatura real medida y la respuesta teórica del modelo. El punto de ajuste se estableció en 28.5 °C, con una condición inicial de 26.5 °C.

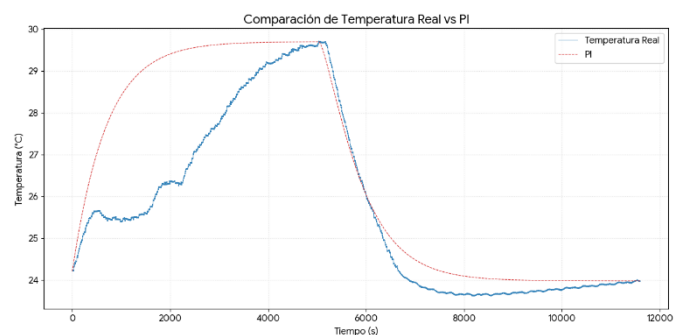


Figura 9. Respuesta de la implementación real vs controlador PI.

La respuesta del sistema real presenta un incremento gradual y escalonado. Este fenómeno resulta consistente con la naturaleza térmica del proceso y la implementación discreta en el microcontrolador. El comportamiento refleja el tiempo de muestreo y la inercia térmica de la cámara. La curva del controlador ideal presenta

una trayectoria suave y continua. Ambas señales muestran tendencias similares hacia el punto de operación. Esta coincidencia indica que el modelo matemático representa la dinámica real del sistema. La Figura 10 identifica los componentes externos del prototipo físico. Asimismo, la Figura 11 representa la disposición de la circuitería en el encapsulado.



Figura 10. Identificación de componentes del prototipo.

En la Figura 11 se muestra la circuitería contenida en el componente de encapsulado.

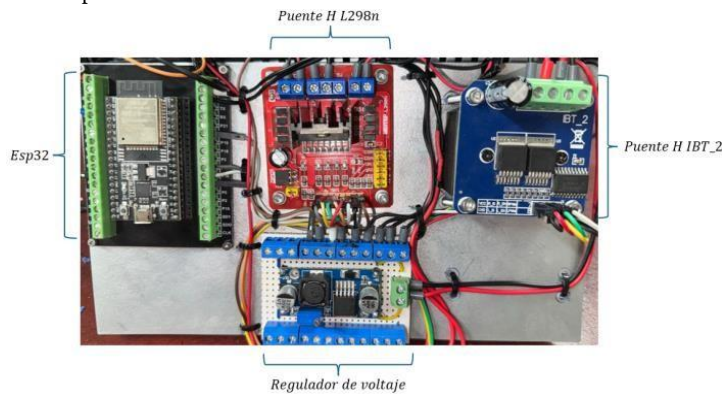


Figura 11. Encapsulado.

El núcleo del sistema es un microcontrolador ESP32, encargado de la adquisición y procesamiento de las señales de los sensores para su visualización gráfica. Basado en estos datos, el algoritmo de control ejerce su acción directamente sobre el actuador lineal, regulando su posición para cumplir con los parámetros deseados. La gestión del flujo de aire emplea modulación por ancho de pulso (PWM). El diseño integra un puente H L298N para los ventiladores secundarios y un controlador IBT-2 para el ventilador principal. Un regulador LM2596 reduce el voltaje a 5 V para alimentar la electrónica

de control y el actuador lineal. El sistema integral se observa en la Figura 12.



Figura 12. Sistema completo.

El prototipo físico final se presenta en la Figura 13. Este integra sensores, módulos Peltier, disipadores y la estructura mecánica diseñada en tercera dimensión (3D). El funcionamiento correcto del prototipo valida la transición del modelo teórico al entorno real. Los análisis en tiempo continuo y discreto permiten una implementación efectiva del control en el sistema físico.

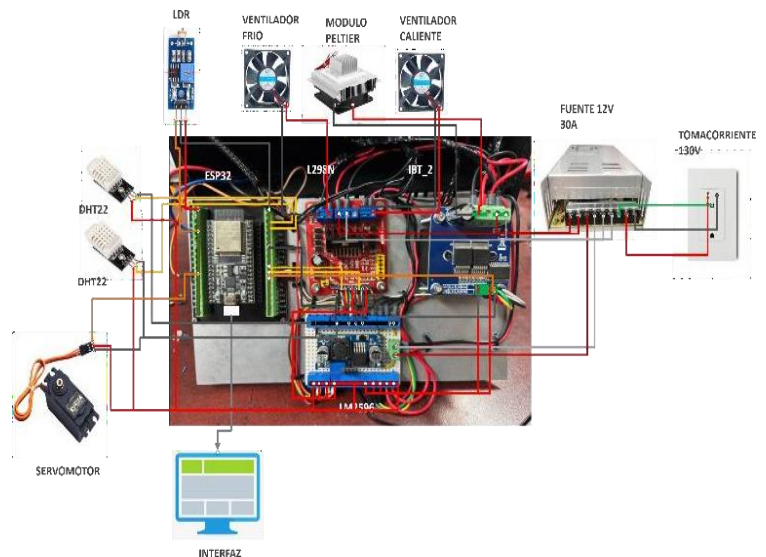


Figura 13. Prototipo físico.

Discusión

Los resultados experimentales validan la efectividad del controlador PI para estabilizar la temperatura en el punto de operación de 28.5 °C. La respuesta del sistema presenta un comportamiento escalonado, como se observa en la Figura 9. Este fenómeno deriva de la resolución digital del sensor DHT22 y de la arquitectura multitask implementada. El algoritmo de control opera a una frecuencia de 5 Hz para gestionar el

retardo del proceso. En contraste, el sensor actualiza la medición a 1 Hz. Esta diferencia genera incrementos discretos en la retroalimentación sin afectar la estabilidad global.

Se confirmó la innecesidad de la acción derivativa en este sistema. La dinámica térmica posee una inercia considerable con una constante de tiempo de 250 s. Esta característica implica una respuesta lenta con capacidad de atenuar perturbaciones de alta frecuencia. La acción derivativa no aportaría mejoras en la velocidad de respuesta. Por el contrario, este término amplificaría el ruido de medición debido a la resolución limitada del sensor. Tal escenario justifica la elección de un controlador PI como solución robusta.

Comparación

Este desarrollo evidencia ventajas en costo y viabilidad técnica frente a otros trabajos. Barreto et al. [7] emplearon estrategias basadas en redes neuronales con errores de ± 0.2 °C. Sin embargo, dichas técnicas requieren una carga computacional elevada. El presente trabajo demuestra la suficiencia de un microcontrolador ESP32 y un esquema PI clásico. El sistema mantiene la estabilidad térmica para procesos biológicos sin recurrir a inteligencia artificial.

A diferencia de la propuesta de García Quevedo [8], basada en Raspberry Pi 3, esta implementación prescinde de ordenadores de placa única costosos. Se reduce la barrera económica sin comprometer la efectividad del control en rangos de 18 a 23 °C. La relevancia práctica del prototipo radica en su operación en entornos de alta incertidumbre climática. La tecnología Peltier permite desacoplar las condiciones internas de las perturbaciones externas de Culiacán, Sinaloa. El diseño prioriza componentes de fácil acceso para democratizar la tecnología en laboratorios con recursos limitados.

Conclusión

El germinador de control térmico constituye una solución de bajo costo y técnica para condiciones climáticas adversas como las de Culiacán, Sinaloa. La validación experimental confirmó la idoneidad del modelo térmico propuesto. Este esquema, basado en subsistemas en cascada con retardo de transporte, representa la dinámica real del sistema.

El controlador PI se sintonizó mediante el método de Ziegler–Nichols e implementó en un microcontrolador ESP32. El algoritmo permitió estabilizar la temperatura en 28.5 °C y eliminó el error en estado estacionario. Asimismo, mantuvo la estabilidad del sistema ante las limitaciones del muestreo discreto y la resolución del sensor. Estos resultados confirman la exclusión de la acción derivativa en sistemas térmicos con alta inercia.

Como trabajos futuros, se propone la incorporación del control de humedad y la evaluación del consumo energético. Se busca optimizar la eficiencia del sistema termoeléctrico mediante estas medidas. Finalmente, la integración de comunicación remota (IoT) permitirá el monitoreo en tiempo real. Estas mejoras ampliarán la funcionalidad del prototipo en entornos de investigación biotecnológica y agrícola.

Referencias

- [1] Martin, D. K., & Savova, O. V. (2021). A brief overview of global biotechnology. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 35(1), 5–14. <https://doi.org/10.1080/13102818.2020.1849704>
- [2] Saavedra, F. E. (2021). Crisis ambiental global: ¿una crisis antropogénica o capitalogénica? *Revista Divergencia*.
- [3] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). *Mexico's Nationally Determined Contribution (NDC)*. Climate Watch.
- [4] Hernández, C. E. (2025, junio 29). La aridez avanza en Sinaloa sin análisis ni estrategia para combatirlo. *Revista Espejo*.
- [5] Meteored. (2025, noviembre 27). Históricos climáticos del estado de Sinaloa.
- [6] Barreto, J. A., Pérez, R., & Gómez, L. (2018). Comparative analysis of PID, fuzzy logic and neural networks for greenhouse temperature control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.012>
- [7] García Quevedo, J., & Romero Cabra, A. (2018). Sistema automatizado para la germinación de lechuga usando Raspberry Pi. *Revista Ingeniería*, 23(2), 45–56.
- [8] González Anaya, M., Villaseñor-Mora, C., Hernández, J., & López, R. (2020). Temperature control system for biological samples using Peltier modules and PID control. *Sensors*, 20(12), 1–15. <https://doi.org/10.3390/s20123345>
- [9] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- [10] Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- [11] Castro, R. D., & Cellier, F. E. (2013). Eco-bond graphs: An energy-based modeling framework. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 36, 125–148. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.04.005>
- [12] Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2002). *Modeling and analysis of dynamic systems* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [13] Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2011). *Process dynamics and control* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [14] Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna* (3.ª ed.). Pearson Educación.
- [15] Rowe, D. M. (2006). *Thermoelectrics handbook: Macro to nano*. CRC Press.
- [16] Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, 64, 759–768.

- [17] Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- [18] Åström, K. J., & Murray, R. M. (2010). *Feedback systems: An introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press.
- [19] Franklin, G. F., Powell, J. D., & Workman, M. L. (1998). *Digital control of dynamic systems* (3rd ed.). Addison-Wesley.
- [20] Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). *Signals and systems* (2nd ed.). Prentice Hall.

Semblanza Autores



Anette Valeria Altamirano Cabrera, Ingeniera Mecatrónica por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2025), estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, realizada en las instalaciones del **Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CIIDETEC)**.



David Ríos Torres, Ingeniero Electrónico, estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, realizada en las instalaciones del **Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CIIDETEC)**.



Armando Payán Angulo, Ingeniero Mecatrónico del TecNM Campus Culiacán recibido en 2023 y estudiante de la Maestría en Ciencias de la ingeniería



Rommel Gutiérrez Grajeda, egresado de Ingeniería Ambiental en el Instituto Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán en el año 2025



David Enrique Castro Palazuelos Ingeniero Electrónico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2000). Maestro en Ciencias en Telemática por la Universidad de Colima (2004) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialización en Telecomunicaciones por el CINVESTAV del IPN, Unidad Guadalajara (2015).



Hilda Karina Ramírez Medina Química Farmacéutica Bióloga o por La Universidad Autónoma de Sinaloa (1998). Maestría en Ciencias (2001) y Doctor en Ciencias con especialidad de Biología celular (2005) por el CINVESTAV del IPN



Leonel Ernesto Amabilis Sosa Doctor en Ingeniería Ambiental-Especialidad Aguas. Sus líneas de investigación incluyen: Optimización de procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales con compuestos recalcitrantes, Movilidad y transporte de contaminantes y Evaluación de procesos para la recuperación de nutrientes