Diseño de módulo electrónico con interfaz gráfica para entrenamiento en sistemas de control de variable física.

Design of an electronic module with a graphical interface for training in physical variable control systems.

Ariadna Yamileth Martínez Hernández (1).
Estudiante Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense.
20240872@uthh.edu.mx.

José Alberto López Pablo (2). Estudiante Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense,
20241221@uthh.edu.mx.

Miguel Ángel Bautista Evangelista* (3). Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense,
miguel.bautista@uthh.edu.mx.

Arturo Elfego Meneses Flores (4). Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense,
arturo.meneses@uthh.edu.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 16, 2026; aceptado en noviembre 11, 2026.

Resumen.

El proyecto consiste en el diseño de una tarjeta didáctica de control con una interfaz gráfica, capaz de monitorear y ajustar los parámetros de un sistema de temperatura, buscando ofrecer una herramienta que permita experimentar con un sistema físico real y observar mediante la gráfica su comportamiento ante distintas condiciones de operación. El sistema permite operar tanto en lazo abierto, ajustando manualmente el porcentaje de potencia aplicado a la resistencia, como en lazo cerrado mediante un controlador PID, sintonizado mediante el método SIMC. Las pruebas realizadas mostraron que en lazo cerrado el sistema mantiene la temperatura de proceso de manera estable ante distintas configuraciones del setpoint y ante perturbaciones simuladas, confirmando el correcto funcionamiento del diseño electrónico y del software desarrollado.

Palabras clave: Interfaz gráfica, lazo abierto, lazo cerrado, tarjeta didáctica.

Abstract.

The project involves the design of an educational control board featuring a graphical interface capable of monitoring and adjusting the parameters of a temperature system. The aim is to provide a tool that allows for experimentation with a real physical system and enables the observation—via the graphical interface—of its behavior under various operating conditions. The system supports both open-loop operation, where the power percentage applied to the heating element is manually adjusted, and closed-loop operation using a PID controller tuned via the SIMC method. Testing demonstrated that, in closed-loop mode, the system maintains a stable process temperature across different setpoint configurations and in the presence of simulated disturbances, thereby confirming the proper functioning of both the electronic design and the developed software.

Keywords: Closed-loop, educational board, graphical interface, open-loop.

1. Introducción.

Sintonizar un controlador PID en un microcontrolador implica un ciclo repetitivo: ajustar los valores en el código, recompilarlo, cargarlo en la tarjeta y esperar para ver cómo responde el sistema, sin ninguna forma de observarlo en tiempo real mientras ocurre. Además, si la práctica se realiza en una protoboard, una conexión floja puede dar lecturas erróneas, lo que dificulta saber si la falla se debe al ajuste de parámetros o al cableado, y alarga aún más el tiempo que toma cada prueba.

Para resolver esta problemática, se propone el diseño de una tarjeta electrónica y un programa capaz de ajustar los parámetros del controlador PID desde una interfaz gráfica y en tiempo real, sin necesidad de modificar ni recompilar el código del microcontrolador.

El sistema está compuesto por una tarjeta electrónica con dos sensores de temperatura proceso y ambiente, una resistencia de potencia, un ventilador utilizado como perturbación, el módulo Bluetooth HC-05 y el microcontrolador RP2040 Zero, junto con la interfaz gráfica ejecutable desde una computadora. La tarjeta fue diseñada en Proteus y fabricada como PCB, mientras que la interfaz se desarrolló en Python.

2. Métodos.

Cálculos para el ancho de las pistas,

Para el diseño de la tarjeta electrónica se calculó el ancho mínimo de las pistas de cobre siguiendo el método recomendado por la norma IPC-2221. Cada pista de cobre de una PCB tiene una resistencia eléctrica que genera calor cuando la corriente fluye, si la pista es demasiado estrecha puede sobrecalentarse, degradarse o incluso fundirse, mientras que una pista ancha desperdicia espacio útil de la placa (Schemalyzer Team, 2025). El método recomienda mantener el aumento de temperatura de la pista dentro de un rango seguro, típicamente entre 10 °C y 20 °C sobre la temperatura ambiente. Para el cálculo se consideró una corriente máxima obtenida mediante la Ley de Ohm, con una alimentación de 5 V sobre dos resistencias de potencia de 1.2 Ω conectadas en serie, equivalente a 2.4 Ω:

$$\boldsymbol{I = \frac{V}{R}} \text{ ..... Ecuación 1.}$$

Por lo tanto.

$$\boldsymbol{I = \frac{5\,V}{2.4\,\Omega} = 2.083\,A}$$

Esta corriente es la que debe soportar sin sobrecalentarse la pista principal asociada a la resistencia de potencia. A partir de la corriente máxima se calculó el área de la sección transversal de la pista mediante la ecuación, considerando un espesor de cobre de 1 oz/ft² y un incremento de temperatura permitido de 10 °C.

$$\boldsymbol{A = \left(\frac{I}{k \times \Delta T^{0.44}}\right)^{\frac{1}{0.725}}} \text{ ..... Ecuación 2.}$$

Sustituyendo los valores correspondientes a una pista sobre una capa externa (k = 0.048, b = 0.44, c = 0.725):

$$\boldsymbol{A = \left(\frac{2.083}{0.048 \times 10^{0.44}}\right)^{\frac{1}{0.725}} = 44.8386\ mils^2}$$

El coeficiente K, 0.44, 0.725 son valores que la norma IPC-2221 establece para pistas ubicadas en una capa externa de la placa.

Con esta área se obtuvo el ancho mínimo requerido mediante la ecuación 3, considerando un espesor de cobre de 1.37mils, que corresponde al grosor estándar de una capa de cobre de 1 oz/ft²:

$$\boldsymbol{W = \frac{A}{T}} \text{..... Ecuación 3.}$$

Por lo tanto.

$$W = \frac{44.8386}{1.37} = 32.72mils$$

Debido a que el software de diseño Proteus utiliza anchos de pista predefinidos, se seleccionó el tamaño superior (T35). Para las pistas de alimentación y las conexiones por las que fluye mayor corriente, se utilizó un ancho T70, garantizando un margen de seguridad en los puntos más críticos del circuito.

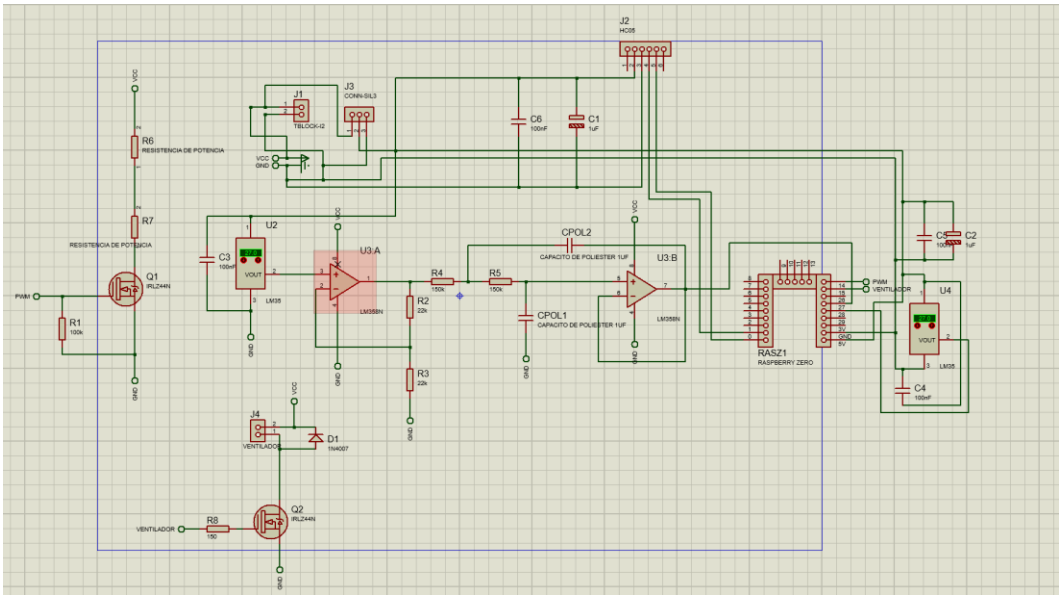


Figura 1. Diagrama esquemático del circuito electrónico, elaborado en el software Proteus, sobre el cual se aplicaron los cálculos de ancho de pista.

Modelo de la planta y sintonización del controlador PID.

El comportamiento térmico del sistema se aproximó mediante un modelo de primer orden con tiempo muerto (FOPDT), representado por la ecuación 4.

$$\boldsymbol{G(s) = K \times e^{\frac{-Ls}{Ts+1}}} \text{..... Ecuación 4.}$$

Los parámetros del modelo se obtuvieron a partir de una prueba en lazo abierto, aplicando un PWM de 100% sobre la resistencia de potencia y registrando la temperatura de proceso a través de la interfaz.

$$\boldsymbol{K = \frac{Cambio\ total\ de\ temperatura}{PWM\ aplicado}} \text{..... Ecuación 5.}$$

La ganancia estática K se calculó considerando una temperatura inicial de 32.63 °C y una temperatura final de 80.18 °C, alcanzada al aplicar un PWM de 100% durante una prueba en lazo abierto:

$$\boldsymbol{K = \frac{80.18 - 32.63}{100} = 0.4755}$$

L
a constante de tiempo T se determinó como el tiempo requerido para alcanzar el 63.2% del cambio total de temperatura, menos el tiempo muerto L, el cual se identificó como el retardo inicial observado antes de que la temperatura comenzara a ascender (L = 6.37 s):

$$T = T_{63.2\%} - L \text{..... Ecuación 6.}$$
$$T = 199.64 - 6.37 = 193.15s$$

Con estos parámetros se aplicó el método SIMC (Skogestad, 2003), el cual permite calcular las ganancias del controlador mediante las ecuaciones (7) a (11), donde τc es un parámetro de diseño libre que determina la velocidad de respuesta deseada del sistema en lazo cerrado:

$$\boldsymbol{Kp = \frac{1}{k} \times \frac{T}{\tau c + L}} \text{ ..... Ecuación 7.}$$
$$\boldsymbol{Ti = mín(T, 4(\tau c + L))} \text{..... Ecuación 8.}$$
$$\boldsymbol{Ki = \frac{Kp}{Ti}} \text{..... Ecuación 9.}$$
$$\boldsymbol{\tau D = \frac{L}{2}} \text{..... Ecuación 10.}$$
$$\boldsymbol{Kd = Kp \times \tau D} \text{..... Ecuación 11.}$$

Se eligió τc = L/2 = 3.185 s como criterio de diseño, un valor que otorga una respuesta rápida sin sacrificar la estabilidad del sistema. Sustituyendo los valores obtenidos:

$$\boldsymbol{\tau c + L = 3.185 + 6.37 = 9.555s}$$
$$\boldsymbol{Kp = \frac{1}{0.4755} \times \frac{193.15}{9.555} = 42.52}$$
$$\boldsymbol{Ti = mín(193.15, 4 \times 9.555) = mín(193.15, 38.22) = 38.22s}$$
$$\boldsymbol{Ki = \frac{42.52}{38.22} = 1.1124}$$
$$\boldsymbol{Kd = 42.52 \times 3.185 = 135.41}$$

Estos fueron los valores de Kp, Ki y Kd implementados en la tarjeta electrónica final.

3. Desarrollo.

El diagrama esquemático se elaboró en el software Proteus, y a partir de él se fabricaron distintas versiones de la placa mediante el método de planchado, corrigiendo en cada iteración los problemas detectados: pistas de cobre cortadas, alimentación insuficiente del módulo Bluetooth HC-05 y de los sensores LM35, ruido eléctrico en las lecturas de temperatura, y una caída de voltaje ocasionada por la corriente demandada por las dos resistencias de potencia de 1.2 Ω conectadas en serie, la cual se corrigió sustituyendo ambas por resistencias de 4.7 Ω.

Durante el desarrollo se sustituyó el microcontrolador Raspberry Pi Pico RP2040 por la variante RP2040 Zero, de menor tamaño, con el fin de aprovechar mejor el espacio de la tarjeta y reducir la cantidad de pines sin utilizar. Al conservar el mismo microcontrolador, este cambio no requirió modificaciones en el código de la interfaz, ya que el sistema siguió funcionando de la misma forma.

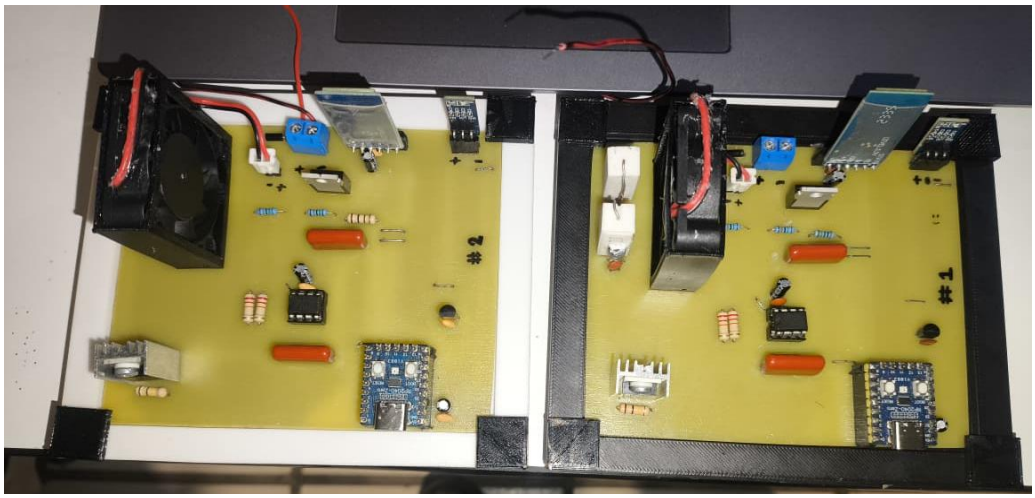


Figura 2. Versiones finales de la tarjeta electrónica.

Al mismo tiempo se desarrolló una interfaz gráfica ejecutable en Python, que se comunica con la tarjeta electrónica a través del módulo Bluetooth HC-05. La interfaz permite seleccionar el modo de operación del sistema, en lazo abierto o en lazo cerrado, visualizar en tiempo real la temperatura de proceso mediante una gráfica, ajustar manualmente el porcentaje de PWM aplicado a la resistencia, configurar los parámetros del controlador PID (Kp, Ki y Kd) sin modificar el código cargado en la tarjeta, y exportar los datos registrados durante cada prueba a un archivo de Excel.

Al iniciar el programa, el usuario accede primero a una pantalla de configuración, que se muestra en la Figura 3, en la que se ajustan los límites de la gráfica que se mostrará durante la prueba: el rango de tiempo, en segundos, y el rango de temperatura, en grados Celsius. Esta configuración previa es necesaria porque el comportamiento del sistema difiere entre los dos modos de operación; en lazo abierto la temperatura tarda más en estabilizarse y alcanza valores cercanos a los 80 °C, mientras que en lazo cerrado se estabiliza alrededor del setpoint definido. En esta misma pantalla se indica el estado de la conexión Bluetooth con el módulo HC-05, y solo cuando la tarjeta está conectada es posible continuar con la ejecución del programa. Desde aquí, el usuario elige el modo de operación deseado mediante los botones «LAZO CERRADO» y «LAZO ABIERTO», sin necesidad de reiniciar el sistema, lo que permite comparar directamente el comportamiento del proceso con y sin realimentación.



Figura 3. Pantalla de configuración e inicio del programa, en la que se ajustan los límites de la gráfica, se verifica la conexión Bluetooth con la tarjeta y se selecciona el modo de operación.

Al seleccionar el modo lazo abierto, la interfaz despliega el panel correspondiente, desde el cual el usuario ajusta manualmente el porcentaje de PWM aplicado a la resistencia y observa en tiempo real la temperatura de proceso y la temperatura ambiente en la gráfica. El panel solo permite aplicar PWM a la resistencia después de presionar "ENCENDER". Mientras el sistema permanece apagado, los controles no tienen efecto sobre la tarjeta. El muestreo de temperatura es independiente y por esa razón los datos se siguen mostrando, al apagar y volver a encender, el programa reinicia el registro de la prueba, por lo que la gráfica comienza de nuevo en ese momento.



Figura 4. Interfaz gráfica en modo lazo abierto.

Una vez integrado el sistema completo, se realizaron pruebas de funcionamiento en las dos tarjetas electrónicas finales, verificando la comunicación con la interfaz y el monitoreo de la temperatura en tiempo real, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado. En lazo cerrado, la interfaz añade al panel los controles del setpoint y de los parámetros Kp, Ki y Kd, permitiendo modificarlos sin necesidad de recargar el código en la tarjeta. Con los parámetros del controlador configurados, la temperatura de proceso se mantuvo estable alrededor del setpoint establecido.

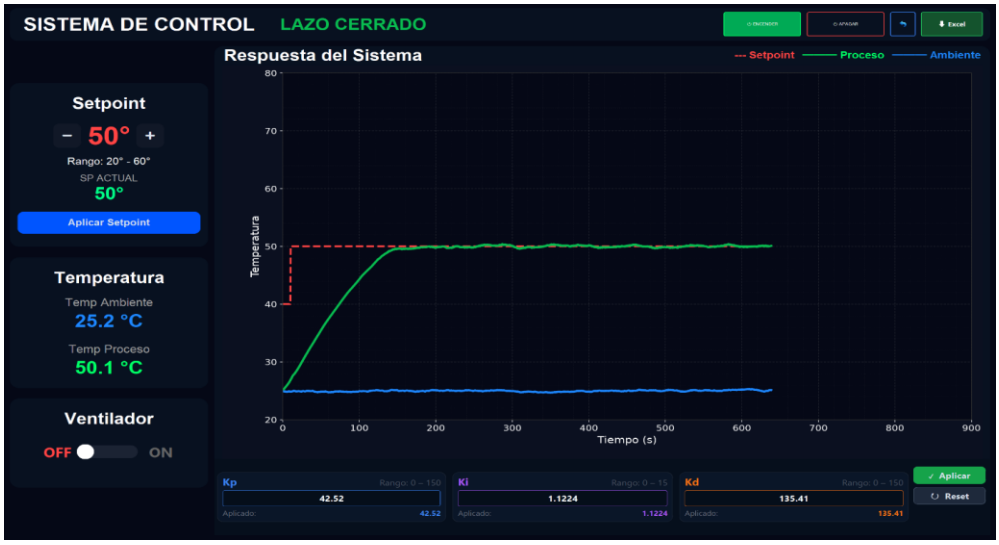


Figura 5. Respuesta del sistema en lazo cerrado: la temperatura de proceso alcanza el setpoint de 50 °C y se mantiene estable alrededor de este valor.

Adicionalmente, se realizó una prueba de perturbación activando el ventilador incorporado en la tarjeta, y como resultado el controlador logró mantener la temperatura cerca del setpoint mientras la perturbación permanecía activa, y corrigió el sobreimpulso generado al apagar el ventilador hasta estabilizar nuevamente el sistema.



Figura 6. Respuesta del sistema en lazo cerrado ante la perturbación simulada con el ventilador, mostrando la recuperación del setpoint tras la desviación inducida.

Conclusiones.

Mediante el desarrollo de este proyecto se obtuvo una tarjeta didáctica de control funcional, compuesta por una tarjeta electrónica diseñada y fabricada específicamente para este fin, junto con una interfaz gráfica que permite operar el sistema en lazo abierto y en lazo cerrado sin necesidad de modificar el código del microcontrolador. La sustitución del uso de protoboard por una placa fabricada redujo las fallas de conexión que suelen presentarse durante las prácticas, mientras que la interfaz desarrollada permitió observar el comportamiento del sistema en tiempo real y ajustar los parámetros del controlador de manera inmediata.

La aplicación del método SIMC para la sintonización del controlador PID resultó adecuada para el modelo de planta identificado, logrando que el sistema mantuviera la temperatura de proceso estable ante distintas configuraciones del setpoint y ante la perturbación simulada mediante el ventilador. Con base en los resultados obtenidos, se concluye que el sistema desarrollado cumple con el objetivo planteado y puede utilizarse como herramienta de apoyo en las prácticas de control de la carrera de Automatización de la UTHH.

Créditos.

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense por las facilidades otorgadas para el desarrollo del proyecto.

Referencias bibliográficas.

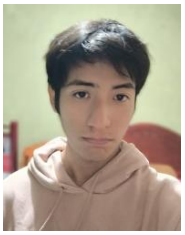
Schemalyzer Team. (2 de Diciembre de 2025). *Guía de Ancho de Pista PCB: Calculadora, Tablas IPC-2221 y Reglas de Diseño (2025)*. Obtenido de https://www.schemalyzer.com/es/blog/pcb-design/basics/pcb-trace-width-guide.

Skogestad, S. (2003). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*.

Información de los autores.



Ariadna Yamileth Martínez Hernández es estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense.



José Alberto López Pablo es estudiante de la licenciatura en ingeniería Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense.



Miguel Ángel Bautista Evangelista es profesor de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense (UTHH). Cuenta con experiencia docente en electrónica, robótica, automatización y desarrollo de proyectos tecnológicos. Entre sus logros destaca la asesoría de un proyecto que obtuvo el tercer lugar estatal en el Concurso de Creatividad e Ingenio de 2020. En 2023 Participó como asesor el concurso "Jóvenes Innovadores" obteniendo un excelente resultado. Su trayectoria refleja un compromiso con la investigación aplicada, la innovación y el desarrollo sostenible.



Arturo Elfego Meneses Flores es profesor investigador de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense (UTHH). Destaca por desarrollar proyectos de innovación tecnológica con impacto social y ambiental. En 2024 diseñó un sistema de software para combatir plaga en cítricos de la región Huasteca. En 2025 obtuvo el Premio Fondo Hidalgo para investigar ecosistemas acuáticos mediante inteligencia artificial y drones. Su trayectoria refleja un compromiso con la investigación aplicada, la innovación y el desarrollo sostenible.