

Implementação Didática de Controle de Temperatura: Comparação entre PID Digital e On-Off

Didactic Implementation of Temperature Control: Comparison between Digital PID and On-Off

Implementación Didáctica de Control de Temperatura: Comparación entre PID Digital y On-Off

Pedro Augusto de Oliveira Lara¹
Cristhiano da Costa Herrera²

Resumo: O ensino de sistemas de controle muitas vezes carece de exemplos práticos que facilitem a visualização da teoria. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma bancada didática para controle de temperatura, utilizando a plataforma Arduino. O sistema é composto por um corpo de prova de alumínio aquecido por resistência elétrica e monitorado por um termopar. A metodologia consistiu na implementação e comparação de duas estratégias: um controle clássico On-Off e um controlador PID digital, sintonizado pelo método de Ziegler-Nichols. Os resultados demonstraram que o controle On-Off gerou oscilações elevadas de 15°C, enquanto o PID estabilizou o sistema no setpoint de 50°C com erro estacionário desprezível, se comparado com o controle On-Off. Conclui-se que a bancada é eficaz para demonstrar conceitos de controle, embora a elevada inércia térmica da planta exija adaptações para uso em aulas experimentais de curta duração.

Palavras-chave: Controle PID. Bancada Didática. Arduino. Ziegler-Nichols. Controle de Temperatura.

Abstract: The teaching of control systems often lacks practical examples that facilitate the visualization of theoretical concepts. This work presents the development of a didactic test bench for temperature control, using the Arduino platform. The system is composed of an aluminum test body heated by an electrical resistance and monitored by a thermocouple. The methodology consisted of implementing and comparing two strategies: a classical On-Off control and a digital PID controller, tuned by the Ziegler-Nichols method. The results showed that the On-Off control generated high oscillations of 15 °C, while the PID stabilized the system at the 50 °C setpoint with negligible steady-state error when compared to the On-Off control. It is concluded that the test bench is effective for demonstrating control concepts, although the high thermal inertia of the plant requires adaptations for use in short-duration experimental classes.

Keywords: PID Control. Didactic Test Bench. Arduino. Ziegler-Nichols. Temperature Control.

Resumen: La enseñanza de sistemas de control a menudo carece de ejemplos prácticos que faciliten la visualización de la teoría. Este trabajo presenta el desarrollo de una bancada didáctica de bajo costo para el control de temperatura mediante la plataforma Arduino. El sistema consta de un cuerpo de prueba de aluminio calentado por una resistencia eléctrica y monitoreado por un termopar. La metodología incluyó la implementación y comparación de dos estrategias: un control clásico On-Off y un controlador PID digital sintonizado con el método de Ziegler-Nichols. Los resultados mostraron que el control On-Off generó oscilaciones de hasta 15 °C, mientras que el PID estabilizó el sistema en el punto de consigna de 50 °C con error estacionario despreciable. Se concluye que la bancada es eficaz para demostrar conceptos de control, aunque la alta inercia térmica de la planta requiere adaptaciones para su uso en clases experimentales breves.

Palabras-clave: Control PID. Bancada Didáctica. Arduino. Ziegler-Nichols. Control de Temperatura.

Submetido 13/03/2026

Aceito 21/07/2026

Publicado 04/08/2026

¹ Graduando. IFSP. <https://orcid.org/0009-0001-8292-560X>. E-mail: p.lara@aluno.ifsp.edu.br

² Doutor. USP. <https://orcid.org/0000-0002-9918-2988>. E-mail: cristhiano@ifsp.edu.br

Considerações Iniciais

Os sistemas de controle são fundamentais na sociedade atual. Eles aparecem em várias áreas da ciência da engenharia, desde tarefas simples em operações industriais, como controlar temperatura ou pressão, até aplicações mais complexas como veículos espaciais (Ogata, 2010; Nise, 2019).

A história dos sistemas de controle começou no século XVIII, com o regulador centrífugo de James Watt. Nas décadas de 1940 e 1950 a teoria de controle clássico foi desenvolvida. Na década de 1960, o apoio dos computadores digitais, permitiu o estabelecimento da teoria de controle moderno. Por fim, mais recentemente teve lugar a teoria de controle robusto (Ogata, 2010).

No cenário contemporâneo, especialmente nos últimos 15 anos, a evolução dos sistemas de controle foi impulsionada pelo aumento exponencial da capacidade computacional e pela disponibilidade massiva de dados. Novas fronteiras foram estabelecidas além do controle robusto, com destaque para a consolidação e expansão do Controle Preditivo (MPC) e do Controle Adaptativo em sistemas complexos e não lineares (Rawlings; Mayne; Diehl, 2017; Raković; Levine, 2018). Mais recentemente, a integração com a inteligência artificial deu origem a paradigmas inovadores, como o Controle Baseado em Dados (Data-Driven Control) e o Controle Baseado em Aprendizagem (Learning-Based Control). Essas abordagens modernas utilizam algoritmos de aprendizado de máquina para modelar dinâmicas desconhecidas e otimizar o desempenho em tempo real, garantindo segurança e eficiência em ambientes incertos (Hou; Wang, 2017; Brunton; Kutz, 2022; Hewing; Wabersich; Menner; Zeilinger, 2020).

Mesmo após décadas de desenvolvimento das teorias de sistemas de controle, ainda existem debates sobre como ensinar melhor esse conteúdo e preparar engenheiros para os desafios práticos do controle de processos. Para muitos estudantes, a ligação entre as teorias matemáticas e a prática com plantas reais ainda é bastante abstrata (Rossiter; Serbezov; Visioli; Záková; Huba, 2020).

Por isso, estudar métodos práticos para o ensino de sistemas de controle se tornou essencial. A criação de bancadas didáticas ajuda a aproximar teoria e prática, sendo uma ferramenta importante no ensino de engenharia. Neste trabalho, o objetivo foi desenvolver um

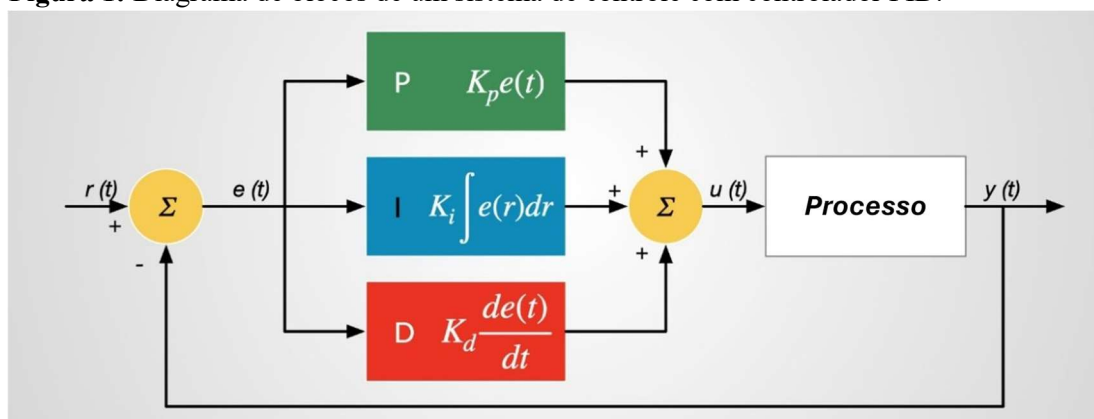
sistema de controle de temperatura, usando um microcontrolador como controlador Proporcional-Integral-Derivativa (PID), para que os alunos de Engenharia do Instituto Federal de São Paulo, campus Itapetininga, possam entender de forma visual e prática os efeitos de cada ação de controle.

Fundamentação Teórica

A Estratégia de Controle PID

O controlador PID é muito usado na automação industrial e na pesquisa acadêmica porque é simples de implementar e atende a vários requisitos de desempenho (Nise, 2019). Em um sistema típico, o controlador age sobre o erro, que é a diferença entre o valor de referência (*setpoint*) e a variável medida do processo. A Figura 1 ilustra o controle PID.

Figura 1: Diagrama de blocos de um sistema de controle com controlador PID.



Fonte: Adaptado (Mcaleer, 2023).

O controle PID reúne três ações principais, e cada uma tem um papel diferente no comportamento do sistema (Ogata, 2010):

Ação Proporcional (P): Multiplica o erro por uma constante denominada ganho proporcional com o objetivo de ajustar a velocidade de resposta do sistema. Um ganho proporcional elevado reduz o tempo de acomodação, mas pode introduzir sobressinal e, isoladamente, não é capaz de eliminar o erro em regime permanente.

Ação Integral (I): acumula o erro ao longo do tempo, atuando para eliminá-lo em regime permanente e garantindo precisão na saída controlada. A intensidade dessa correção é definida pelo ganho integral, contudo, se ajustado em excesso, esse ganho tende a desestabilizar o sistema, provocando oscilações crescentes e aumentando o tempo de assentamento.

Ação Derivativa (D): Atua sobre a taxa de variação do erro, antecipando tendências e contribuindo para a estabilidade, reduzindo oscilações e o sobressinal. No entanto, um ganho derivativo excessivo amplifica ruídos de alta frequência presentes no sinal de medição, o que pode levar à instabilidade e a uma atuação errática.

O equilíbrio entre essas três ações garante que o sistema controlado responda de forma adequada. No ensino, o controle PID é especialmente útil porque o ganho de cada ação pode ser ajustado separadamente, permitindo que os estudantes vejam diretamente como cada ação afeta o comportamento da planta (Daga; Lenzi; Quadros, 2019).

Implementação Digital do Controlador PID

Em conjuntos de desenvolvimento baseados em microcontroladores como o Arduino, o processamento dos sinais é realizado em tempo discreto. O sinal digital opera em intervalos fixos de amostragem, ou seja, o controlador lê o sensor, calcula a saída e atua no processo em intervalos regulares (Ogata, 2010).

A estrutura fundamental de controle em malha fechada continua sendo a mesma apresentada no diagrama de blocos da Figura 1.

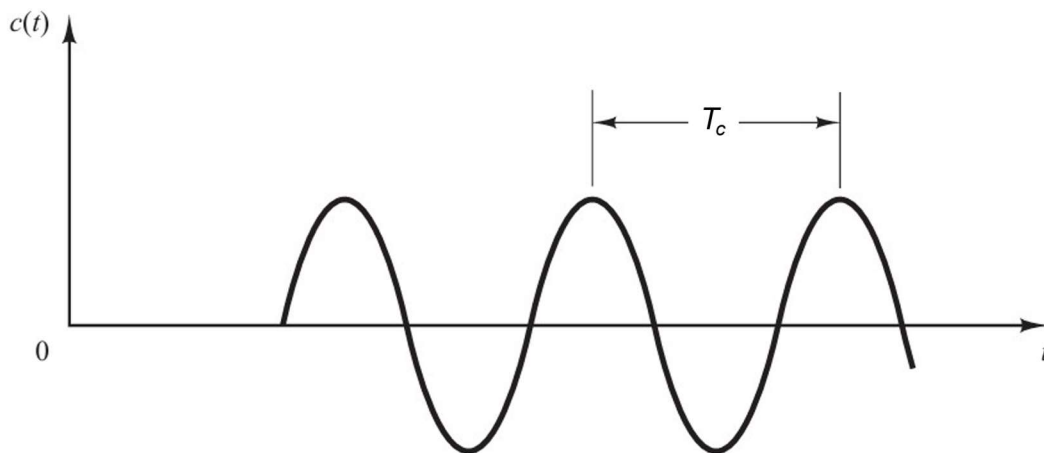
Método de Sintonia Prática: Ziegler-Nichols

No método de sintonia de Ziegler-Nichols por ganho e período críticos em malha fechada, o controlador deve ser ajustado inicialmente apenas com a ação proporcional ativada, enquanto as ações integral e derivativa permanecem desligadas. O ganho proporcional é aumentado aos poucos até que o sistema apresente oscilações sustentadas, ou seja, oscilações periódicas com amplitude constante (Nise, 2019; Daga; Lenzi; Quadros, 2019).

O valor do ganho que causa esse comportamento é chamado de ganho crítico (K_{cr}), e o período das oscilações é chamado de período crítico (T_{cr}). Com esses dois parâmetros, Ziegler e Nichols criaram fórmulas empíricas para definir os ganhos de cada ação de controle, buscando

uma resposta rápida e com bom amortecimento (Ogata, 2010). A Figura 2 mostra as oscilações sustentadas.

Figura 2: Resposta típica do sistema em malha fechada para determinação de K_{cr} e T_{cr} , destacando a forma de onda das oscilações sustentadas.



Fonte: Adaptado (Ogata, 2010).

A Tabela 1 apresenta as relações clássicas entre os parâmetros K_{cr} e T_{cr} e os ganhos correspondentes do controlador PID.

Tabela 1 – Parâmetro clássicos do método de Ziegler-Nichols (malha fechada).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 * K_{cr}$	–	–
PI	$0,45 * K_{cr}$	$\frac{T_{cr}}{1,2}$	–
PID	$0,6 * K_{cr}$	$\frac{T_{cr}}{2}$	$0,125 * T_{cr}$

Fonte: Adaptado (Ogata, 2010).

Como esse método permite que o controlador possa ser sintonizado sem que seja necessário um modelo prévio da planta controlada, ele desponta como um bom recurso para o ensino da técnica de controle PID. Observar as oscilações sustentadas e o comportamento dinâmico durante o ajuste do ganho proporcional ajuda a entender de forma visual e imediata os efeitos de estabilidade e amortecimento, o que aumenta o valor pedagógico do experimento (Daga; Lenzi; Quadros, 2019; Nascimento, 2025).

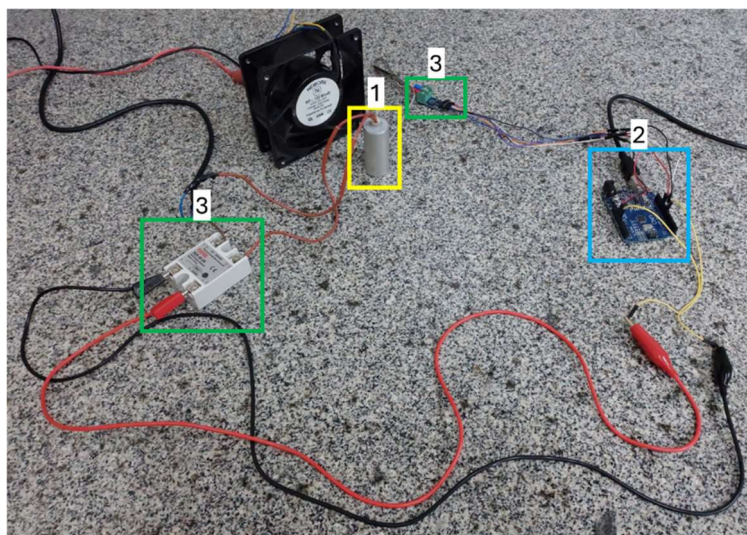
Metodologia

Esta seção descreve os procedimentos de construção, instrumentação, programação e testes da bancada didática para controle de temperatura. O sistema proposto consiste em uma malha de controle em tempo discreto, gerenciada por um microcontrolador, voltada para o estudo experimental de controladores digitais do tipo PID.

Visão geral do sistema

O projeto consiste em uma bancada didática, operando em malha fechada. Diferente de sistemas puramente analógicos, a lógica de controle é processada via *software*. O sistema é composto por três blocos principais ilustrados na Figura 3.

Figura 3: Vista geral da bancada didática montada, destacando a planta térmica, o circuito de acionamento e o microcontrolador.



Fonte: Próprio Autor (2025).

1. A planta térmica: O processo físico a ser controlado, constituído por um bloco de alumínio aquecido;
2. O controlador digital: Implementado em uma placa de desenvolvimento Arduino UNO, responsável pela aquisição de dados, execução do algoritmo PID e sinal de atuação;
3. Interface e Atuação: Composta pelo módulo de leitura de temperatura e pelo Relé De Estado Sólido (SSR) para modulação de potência.

O fluxo de controle segue a lógica de realimentação negativa: o sensor lê a temperatura do processo (*PV*), o microcontrolador calcula o erro em relação ao *setpoint* (*SP*) e gera um sinal de controle. Esse sinal aciona o relé de estado sólido, que modula a entrega de energia ao cartucho aquecedor.

Construção da planta

A planta térmica consiste em um corpo de prova cilíndrico usinado em alumínio maciço, material escolhido por sua facilidade de usinagem e disponibilidade no campus. O corpo de prova possui dimensões de 26 mm de diâmetro e 61 mm de comprimento, medidas definidas visando a economia de recursos materiais do campus, mas ainda suficientes para comportar o cartucho aquecedor disponível.

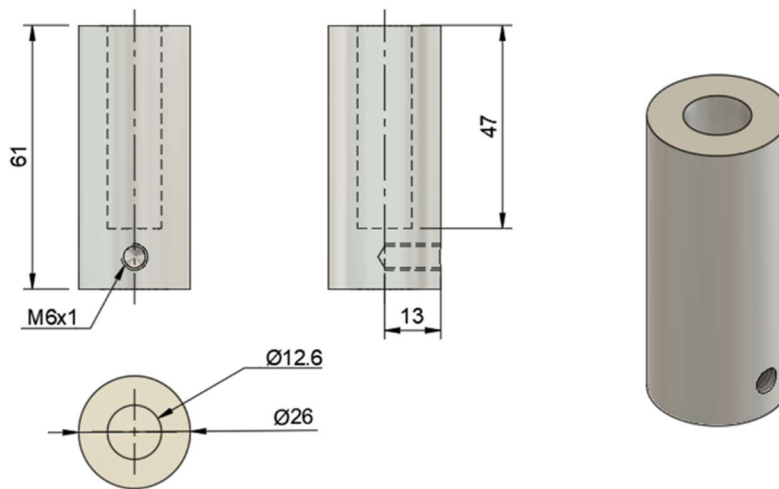
Para a integração dos elementos de aquecimento e sensoriamento, foram realizadas operações de usinagem detalhadas conforme o projeto modelado em *software* CAD (Fusion 360):

Alojamento do Aquecedor: Foi usinado um furo central cego com 12,6 mm de diâmetro e 47 mm de profundidade. Esta medida foi definida para acomodar o cartucho aquecedor (12,5 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento) com uma folga de aproximadamente 0,1 mm, a qual foi preenchida com pasta térmica para garantir o acoplamento térmico ideal.

Alojamento do Sensor: Foi realizado um furo roscado M6 com 13 mm de profundidade. A rosca permitiu a fixação firme do termopar tipo K (com ponta blindada em aço inox e rosca M6), reduzindo possíveis interferências na leitura de temperatura.

Os detalhes dimensionais dos alojamentos e os componentes de aquecimento e sensoriamento são apresentados, respectivamente, nas Figuras 4 e 5.

Figura 4: Detalhamento do corpo de prova modelado em *software* CAD (Fusion 360).



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 5: Cartucho elétrico e ponta do termopar com rosca M6



Fonte: Próprio Autor (2025)

Como mecanismo de resfriamento forçado, foi posicionado um *cooler* de 120 mm direcionado ao corpo de prova, permitindo alterar a dinâmica do sistema e reduzir a inércia térmica para resfriamentos durante os ensaios.

Hardware e Instrumentação Eletrônica

A instrumentação eletrônica é responsável pela interface entre o mundo físico e o controlador digital. A Figura 6 ilustra os componentes do *Hardware*.

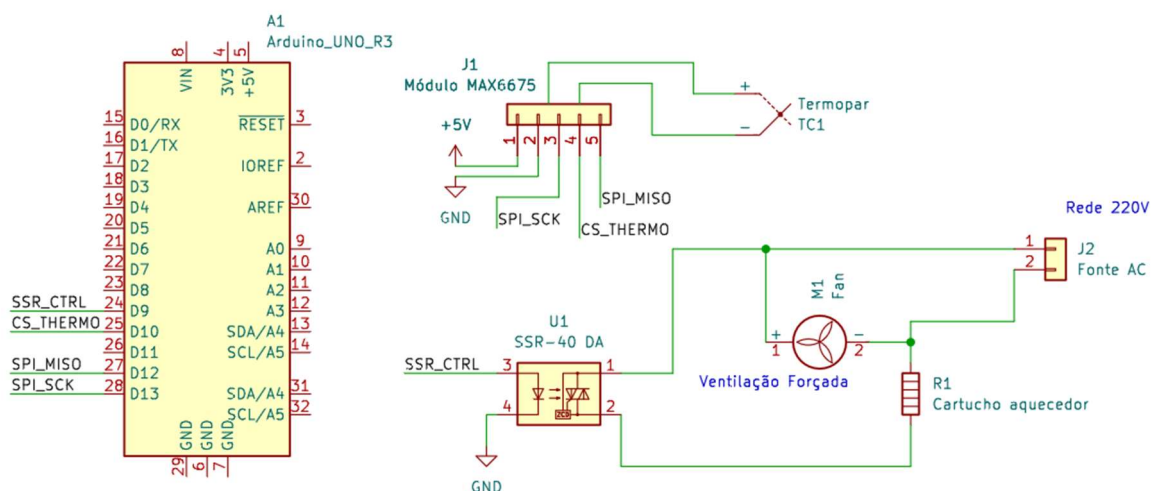
Atuador: A potência entregue ao sistema é controlada por um Relé de Estado Sólido (SSR-40DA Fotek). O SSR recebe um sinal de controle de 5V do microcontrolador e chaveia a tensão alternada da rede para a resistência. A escolha do SSR justifica-se pela implementação

de uma estratégia de controle proporcional ao tempo (*Time-Proportional Control*). Nesta técnica, a potência média entregue à carga é modulada variando-se o tempo de condução dentro de uma janela fixa (neste trabalho, 8 s), eliminando os desgastes mecânicos e ruídos acústicos que seriam críticos em relés eletromecânicos submetidos a este regime de chaveamento.

Sensor e Condicionamento: A medição é realizada por um Termopar Tipo K, operando na faixa de interesse do projeto. O sinal analógico do termopar (na ordem de milivolts) é processado pelo módulo MAX6675, que realiza a compensação de junta fria e converte o sinal para um formato digital (protocolo SPI) com resolução de 0,25°C.

Unidade de Processamento: Um Arduino UNO atua como a unidade central, comunicando-se com o MAX6675 via barramento SPI e executando o algoritmo de controle.

Figura 6: Diagrama esquemático das conexões: Arduino ligado ao MAX6675 (pinos SPI: SCK, CS, SO) e ao SSR (pino digital).



Fonte: Próprio Autor (2025).

Implementação do *Firmware* e Controlador Digital

O controle e aquisição de dados foram implementados em linguagem C++ utilizando o Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) do Arduino. O *firmware* baseia-se em duas bibliotecas principais de código aberto: max6675.h (Adafruit Industries, 2023), responsável pela comunicação SPI com o sensor; e PID_v1.h (Beauregard, 2017), que implementa o algoritmo de controle robusto.

O algoritmo implementa a equação contínua do PID:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Estruturou-se o ciclo de processamento visando o determinismo temporal e a robustez operacional, garantindo que as tarefas críticas de leitura e atuação sejam executadas dentro das janelas de tempo preestabelecidas:

Amostragem e Segurança: O sistema opera com um tempo de amostragem (T_s) de 250 ms, valor limitado pelo tempo mínimo de conversão exigido pelo módulo MAX6675. A cada ciclo, o microcontrolador verifica a integridade da leitura do sensor. Caso ocorra falha no termopar (detectada pela função **isn**an), o sistema aciona uma rotina de segurança que força o desligamento imediato do SSR para evitar o descontrole térmico.

Técnica de Atuação (“Slow PWM”): Dado que o atuador é um Relé de Estado Sólido controlando um sistema térmico de dinâmica lenta, não se utiliza o PWM de *hardware* de alta frequência. Em vez disso, implementou-se uma técnica de Controle Proporcional ao Tempo com uma janela (*Window Size*) de 8000 ms (8 segundos). O valor calculado pelo PID determina a fração de tempo que o relé permanece ligado dentro desta janela.

O código-fonte completo desenvolvido para o controlador PID, incluindo as configurações da biblioteca e a lógica de atuação por janela de tempo, encontra-se disponível em repositório digital público³.

Procedimentos Experimentais

Os ensaios foram divididos em etapas para identificação e validação do sistema. A aquisição de dados foi realizada via interface serial (USB) a uma taxa de 115200 bits por segundo. O *firmware* foi programado para transmitir, a cada 1000 ms (1 segundo), uma *string* em formato de valores separados por vírgulas contendo o tempo decorrido, a temperatura do processo e o *setpoint*.

Para sintonia do controlador e determinação dos parâmetros proporcional (K_p), integral (K_i) e derivativo (K_d), aplicou-se o método de Ziegler-Nichols em malha fechada (método do ganho crítico). Para isso foi definido K_i e K_d nulos, mantendo-se apenas a ação proporcional,

³ Disponível em: <https://github.com/plara2/bancada-didatica-pid>

O valor de K_p foi incrementado gradativamente até que o sistema apresentasse uma oscilação sustentada de amplitude constante. O monitoramento da resposta do sistema foi realizado por meio da ferramenta *Serial Plotter* do ambiente de desenvolvimento (IDE) do Arduino.

Após atingir a oscilação sustentada, foram identificados os instantes de temperatura máxima (picos de oscilação) para o cálculo do intervalo médio entre os ciclos, definindo-se assim o período crítico (T_{cr}). Os valores obtidos experimentalmente para o ganho crítico (K_{cr}) e o período crítico (T_{cr}) foram:

$$K_{cr} = 90.0$$

$$T_c = 168 \text{ s}$$

Com base nos valores experimentais de K_{cr} e T_{cr} , os parâmetros do controlador PID foram calculados utilizando as regras de sintonia clássicas de Ziegler-Nichols, conforme as equações a seguir:

$$K_p = 0,60 \cdot K_{cr}$$

$$T_i = 0,50 \cdot T_{cr}$$

$$T_d = 0,125 \cdot T_{cr}$$

Substituindo os valores obtidos ($K_{cr} = 90,0$ e $T_{cr} = 168 \text{ s}$):

$$K_p = 0,60 \cdot 90,0 = 54,0$$

$$T_i = 0,50 \cdot 168 = 84,0 \text{ s}$$

$$T_d = 0,125 \cdot 168 = 21,0 \text{ s}$$

Visto que o algoritmo de controle utilizado (biblioteca PID v1 para Arduino) implementa a equação na forma paralela independente, faz-se necessária a conversão das constantes de tempo (T_i e T_d) para os ganhos integral (K_i) e derivativo (K_d):

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{54,0}{84,0} \approx 0,643$$

$$K_d = K_p \cdot T_d = 54,0 \cdot 21,0 = 1134,0$$

Portanto, os parâmetros finais configurados no controlador foram: $K_p = 54,0$; $K_i = 0,64$ e $K_d = 1134,0$.

Ensaio Comparativo: Controle On-Off

Para estabelecer uma linha de base de desempenho da planta e verificar sua validade enquanto ferramenta para que um estudante possa compreender as particularidades do controle PID, também foi implementada uma estratégia de controle do tipo On-Off (duas posições). Este experimento tem como objetivo evidenciar as limitações deste método, especificamente a oscilação em torno do *setpoint*, devido à inércia térmica do bloco de alumínio.

O algoritmo foi desenvolvido mantendo-se a mesma estrutura de *hardware* e bibliotecas de leitura (max6675.h), alterando-se apenas a lógica de atuação. Para evitar o chaveamento excessivo do relé (efeito de *chattering*) devido a ruídos na leitura do sensor, implementou-se uma banda de histerese (H) de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ em torno do *setpoint*.

A lógica de controle, executada com um período de amostragem de 1000 ms (1,0 s), segue as condições descritas abaixo:

$$\begin{cases} 1 \text{ (Ligado)}, & \text{se } T(t) \leq SP - H \\ 0 \text{ (Desligado)}, & \text{se } T(t) \geq SP + H \\ u(t-1), & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Onde:

- $u(t)$ é o estado do atuador (SSR);
- $T(t)$ é a temperatura lida no instante atual;
- SP é o *setpoint* definido ($50,0\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- H é a histerese definida no código ($0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$);

Dada a grande inércia térmica do corpo de prova, frequências de amostragem elevadas tornam-se dispensáveis para a estabilidade do sistema de controle On-Off, por isso foi determinado o período de amostragem de 1000 ms. Ressalta-se ainda que o foco experimental não reside na comparação de desempenho entre On-Off e PID, mas na apresentação do potencial da plataforma em ilustrar didaticamente os conceitos fundamentais de cada técnica.

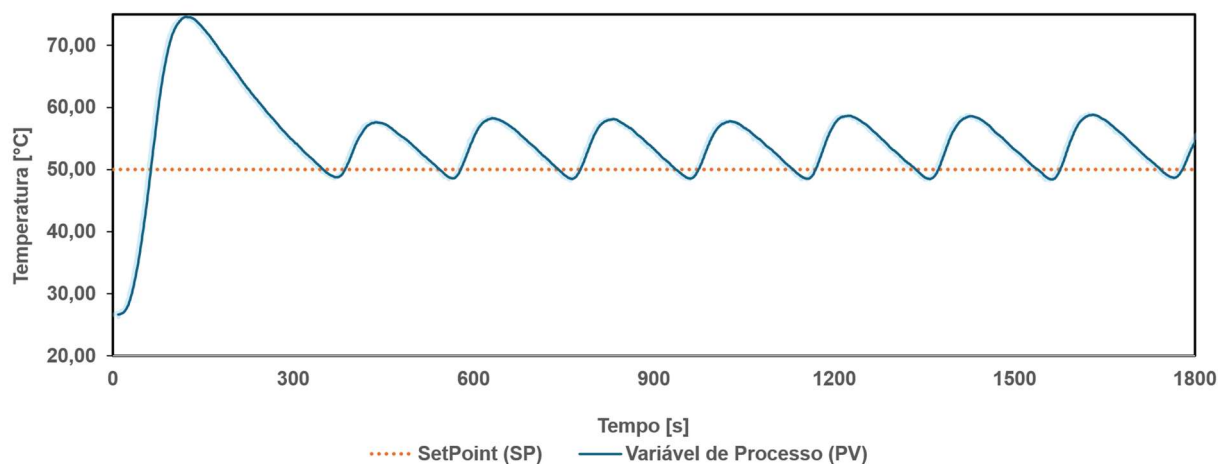
Dessa forma, o aquecedor é acionado somente quando a temperatura cai para $49,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e desligado apenas quando atinge $50,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Assim como no controlador PID, os dados de tempo, temperatura e estado do atuador foram transmitidos via porta serial para registro e posterior comparação das curvas de resposta temporal.

O algoritmo implementado para o controle On-Off, com a lógica de histerese e aquisição de dados, também pode ser consultado integralmente no repositório online do projeto³.

Resultados

A figura 7 apresenta o comportamento da bancada didática quando ela é empregada para produzir uma oscilação sustentada com o objetivo de sintonizar o controlador por meio do método de Ziegler-Nichols. Esse comportamento dinâmico foi obtido ajustando o controlador PID para ação puramente proporcional com ganho crítico $K_{cr} = 90$.

Figura 7: Gráfico representando oscilação obtida com ação proporcional ($K_{cr} = 90$).



Fonte: Próprio Autor (2025).

Na Figura 7 é possível observar que a bancada didática apresenta o comportamento esperado da aplicação de um ganho elevado em um sistema com inércia térmica significativa, quando a acumulação da energia térmica continua elevando a temperatura mesmo após o corte do sinal de controle. Inicialmente, partindo da temperatura ambiente, o sistema apresenta um sobressinal expressivo, atingindo um pico próximo a 75 °C.

Após o regime transitório inicial (aproximadamente $t > 900$ s), observa-se que as oscilações se tornam periódicas e de amplitude constante em torno do *setpoint* de 50°C, caracterizando a oscilação sustentada necessária para a aplicação do método de Ziegler-Nichols. A assimetria observada entre os ciclos de aquecimento (subida rápida) e resfriamento (descida mais lenta) evidencia a não-linearidade natural do processo térmico: o aquecimento é forçado

pela resistência elétrica (ativo), enquanto o resfriamento depende majoritariamente da troca térmica com o ambiente e da atuação do *cooler* (passivo/forçado).

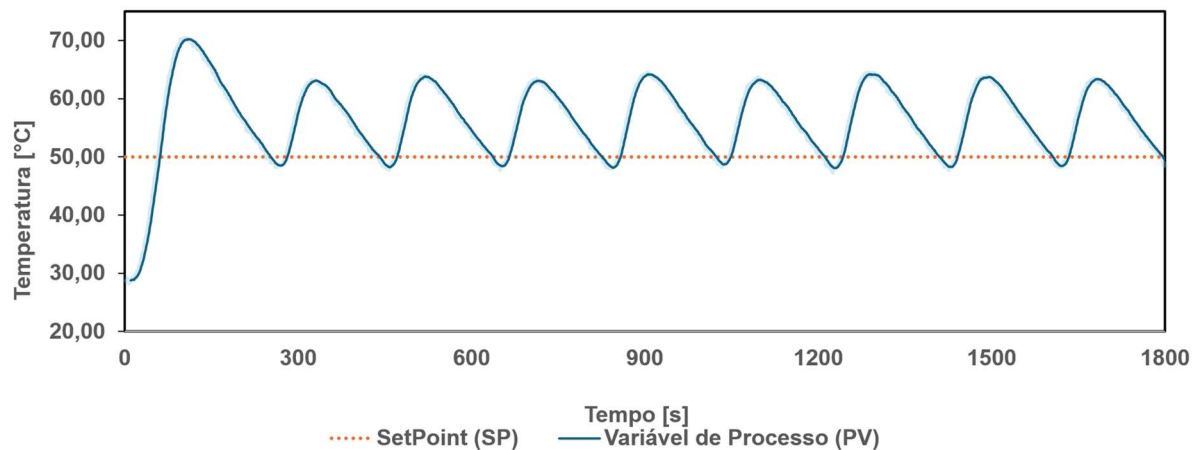
A resposta da bancada didática apresentada na Figura 7 permite que estudantes realizem a mensuração do período crítico (T_{cr}). No caso em exemplo, a mensuração poderia ser feita pela medição do intervalo de tempo entre os picos consecutivos da região de oscilação estável. Esse intervalo de tempo varia de 1200 s a 1800 s, com média em 168 s.

Esses dois parâmetros experimentais ($K_{cr} = 90$ e $T_{cr} = 168$ s) permitiram aos estudantes realizar os cálculos dos ganhos K_p , K_i e K_d seguindo os parâmetros apresentados na Tabela 1.

Controle On-Off

A Figura 8 apresenta o desempenho do sistema operando com o controlador On-Off. A análise da curva de resposta revela as limitações intrínsecas desta estratégia para o controle da planta térmica construída.

Figura 8: Resposta temporal do sistema sob controle On-Off com histerese de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Primeiramente, observa-se um regime transitório agressivo. Ao partir da temperatura ambiente ($\approx 28^\circ\text{C}$), o atuador permanece ligado em potência máxima até cruzar o *setpoint* (50°C). Devido à elevada inércia térmica do bloco de alumínio e ao atraso de transporte entre o elemento aquecedor e o sensor, a temperatura continua subindo abruptamente mesmo após o

desligamento do relé, atingindo um pico inicial próximo a 70°C . Isso representa um sobressinal de aproximadamente 40% em relação ao valor desejado.

Como esperado, o sistema não se estabiliza em regime permanente, mas permanece em um ciclo limite (oscilação contínua) com perfil característico de “dente de serra”. Esse comportamento, permitiria que estudantes discutissem as diversas particularidades da assimetria na forma de onda, como:

1. **Subidas rápidas:** Ocorrem quando o relé é acionado, indicando que a potência do cartucho aquecedor é elevada para a massa do sistema, causando aquecimento rápido.

2. **Descidas lentas:** Ocorrem quando o relé desliga e o sistema resfria passivamente (troca com o ambiente) e com auxílio do *cooler*.

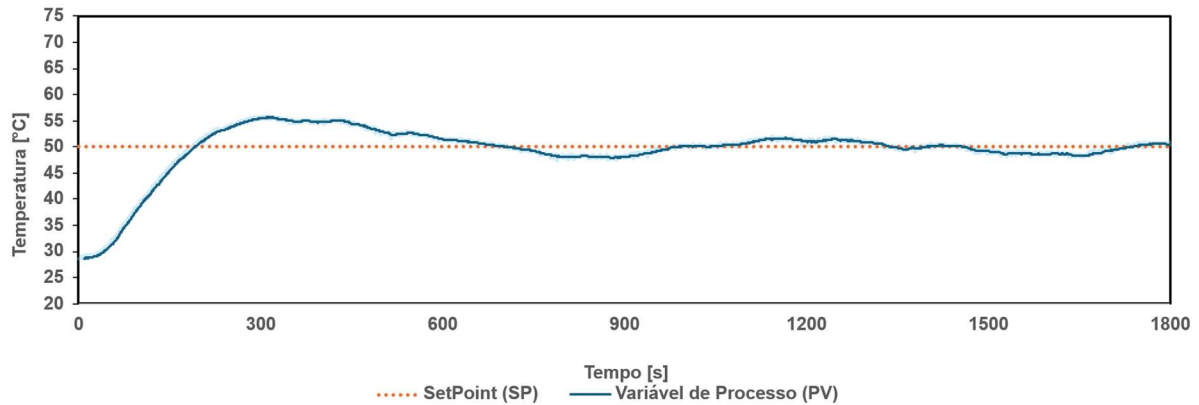
A banca didática demonstra com fidelidade que, mesmo com uma banda de histerese configurada para $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (desligando em $50,5^{\circ}\text{C}$ e ligando em $49,5^{\circ}\text{C}$), a inércia térmica não permite que o sistema estabilize próximo ao setpoint. A temperatura deve oscilar entre máximos de aproximadamente 63°C e mínimos de 49°C , resultando em uma amplitude de oscilação pico-a-pico (ΔT) de cerca de 15°C .

Esse resultado confirma que a bancada didática é capaz de oferecer aos estudantes uma compreensão efetiva de que o controle On-Off, embora simples, apresenta uma grande variação de temperatura, inviabilizando a manutenção precisa do setpoint. Essa compreensão, torna mais concreta a necessidade de implementação do controlador PID para modulação proporcional da potência em aplicações que não tolerem variações tão amplas.

Controle PID

A Figura 9 apresenta a resposta do sistema operando com o controlador PID digital, utilizando os parâmetros obtidos pelo método de Ziegler-Nichols ($K_p = 54,0$; $K_i = 0,64$; $K_d = 1134,0$) e a técnica de atuação por janela de tempo (PWM de baixa frequência).

Figura 9: Resposta temporal do sistema em malha fechada com controlador PID sintonizado ($K_p = 54,0$; $K_i = 0,64$; $K_d = 1134,0$).



Fonte: Próprio Autor (2025).

Analisando o regime transitório, observa-se que também nesse cenário, a bancada didática mostrou-se capaz de reproduzir o comportamento esperado. O sistema alcança o valor de setpoint (50 °C) pela primeira vez em aproximadamente 185 s segundos. A resposta do sistema também apresenta o sobressinal previsto pela teoria de Ziegler-Nichols, que, ao priorizar a velocidade de resposta, permite uma margem de oscilação inicial (critério de decaimento de um quarto). A temperatura atinge um pico máximo de aproximadamente 55 °C no instante $t \cong 390$ s, representando um desvio percentual de cerca de 11% acima do setpoint.

A Figura 9 comprova que a bancada didática pode proporcionar que os estudantes discutam o efeito dos termos integral e derivativo sobre a resposta do sistema. Neste experimento, por exemplo, a Ação Derivativa (K_d) amorteceu as oscilações, impedindo que o sistema se tornasse instável ou mantivesse o comportamento oscilatório apresentado no ensaio de ganho crítico. Já a Ação Integral (K_i) atuou para dirimir o erro em regime permanente.

Nesse experimento, o sistema entrou em regime permanente passados 1000 s. Esse resultado permitiria que estudantes visualizassem a diferença do regime permanente obtido no controle On-Off, que permite que a temperatura oscile em torno do alvo, e obtido com o controle PID, que mantém a variável de processo (PV) aderente ao setpoint. As pequenas flutuações observadas no final do gráfico são inerentes ao sistema devido a ruídos de medição, dificuldade de resposta a perturbações térmicas ambientais e limitações da própria resolução do sensor termopar utilizado, característica que também pode ser explorada no processo formativo.

Considerações Finais

O presente trabalho cumpriu o objetivo de desenvolver e validar uma bancada didática para o ensino de sistemas de controle digitais, consolidando a aplicação prática de controladores PID em microcontroladores. A integração entre o ambiente de programação, a instrumentação eletrônica e a planta térmica permitiram demonstrar, de forma tangível, as etapas fundamentais de um projeto de engenharia de controle: desde a aquisição de dados e identificação de sistemas até a sintonia e validação da malha fechada.

Quanto ao valor didático do sistema, os resultados experimentais confirmaram que a bancada didática oferece aos estudantes o contato com as particularidades tanto da estratégia PID quanto do controle On-Off. Com o seu emprego, torna-se concreta a percepção de que a estratégia de duas posições resulta em um ciclo limite com oscilações de amplitude elevada que podem ser inadequadas para processos que exigem precisão. Ao mesmo tempo, a bancada apresenta a característica do controle PID digital, sintonizado pelo método de Ziegler-Nichols, de estabilizar a temperatura bem próxima do *setpoint* com uma pequena oscilação, diminuindo o erro em regime permanente e amortecendo as oscilações transientes. O comportamento do sistema valida o algoritmo implementado e a metodologia de projeto baseada na técnica de Slow PWM para atuação em relés de estado sólido para o desenvolvimento de bancadas dessa natureza.

Entretanto, a análise dinâmica dos ensaios revelou uma limitação importante quanto à aplicabilidade pedagógica do sistema em aulas experimentais de curta duração. A elevada inércia térmica do corpo de prova de alumínio resultou em constantes de tempo longas, exigindo janelas de observação superiores a 1800 segundos (30 minutos) para a realização completa de procedimentos como a determinação do ganho crítico (K_{cr}) e a estabilização da resposta. Essa característica temporal impõe desafios logísticos para a disciplina, visto que o tempo necessário para aquecimento, perturbação e resfriamento pode exceder a disponibilidade de horas-aula convencionais.

Visando superar essa barreira temporal, sugere-se como trabalho futuro o desenvolvimento de uma planta baseada no aquecimento de fluidos em fluxo contínuo (similar a sistemas de aquecimento de água de passagem). Diferentemente de massas sólidas estáticas, sistemas de fluxo dinâmico apresentam resposta significativamente mais rápida às variações de

potência. Essa alteração na natureza física do processo permitiria reduzir drasticamente o tempo de acomodação e resfriamento, viabilizando a realização de múltiplos ciclos de sintonia e testes de perturbação dentro do período regular de uma aula experimental.

Referência

ADAFRUIT INDUSTRIES. **MAX6675 Library**: Arduino library for interfacing with MAX6675 thermocouple amplifier. Versão 1.1.2. Nova Iorque, 2023. Disponível em: <https://github.com/adafruit/MAX6675-library>. Acesso em: 15 out. 2025.

BEAUREGARD, Brett. **Arduino PID Library**. Versão 1.2.1. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library>. Acesso em: 15 out. 2025.

BRUNTON, Steven L.; KUTZ, J. Nathan. **Data-driven science and engineering: Machine learning, dynamical systems, and control**. Cambridge University Press, 2022.

DAGA, Alisson L.; LENZI, Marcelo K.; QUADROS, Thiago D. de. **Módulo didático para estudo de controlador PID analógico**. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA DA UFPR, 2019, Curitiba. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2019. p. 40–47.

HEWING, Lukas; WABERSICH, Kim P.; MENNER, Marcel; ZEILINGER, Melanie N. Learning-Based Model Predictive Control: Toward Safe Learning in Control. **Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems**, v. 3, p. 269-296, maio 2020. DOI: 10.1146/annurev-control-090419-075625. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-control-090419-075625>. Acesso em: 13 dez. 2025.

HOU, Zhongsheng; WANG, Zhongsheng. **Data-Driven Control and Learning Systems**. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 5, p. 4070-4075, 2017.

HOTZ, Jéssica dos Santos. **Bancada didática para controle de nível e temperatura**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica) . Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LAGE, Vinícius Nunes. **Desenvolvimento de um controlador PID para estabilização de uma plataforma com dois graus de liberdade**. 2016.

MCALEER, Kevin. **PID Controllers**. KevsRobots, 13 mar. 2023. Disponível em: https://www.kevsrobots.com/resources/how_it_works/pid-controllers.html. Acesso em: 16 dez. 2025.

NASCIMENTO, João Vitor Ferreira. **Projeto de Controlador PID para Controle de Temperatura e Implementação de Técnicas para Otimização dos Resultados**. 2025. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

NISE, Norman S. **Control systems engineering**. John Wiley & Sons, 2019.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

RAKOVIĆ, Saša V.; LEVINE, William S. (Eds.). **Handbook of Model Predictive Control**. New York: Birkhäuser, 2018.

RAWLINGS, James B.; MAYNE, David Q.; DIEHL, Moritz M. **Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design**. 2. ed. Santa Barbara: Nob Hill Publishing, 2017.

ROSSITER, J. A.; SERBEZOV, A.; VISIOLI, A.; ZÁKOVÁ, K.; HUBA, M. A survey of international views on a first course in systems and control for engineering undergraduates. **IFAC Journal of Systems and Control**, v. 13, art. 100092, 2020. DOI: 10.1016/j.ifacsc.2020.100092. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2020.100092>. Acesso em: 14 dez. 2025.