



DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE BANCADA POCKET-SIZE PARA ENSINO E EXPERIMENTAÇÃO EM SISTEMAS DE CONTROLE

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2025.6189

Autores: CARLOS SOARES COSTA JUNIOR, JÉSSICA DA SILVA SOUSA, RAPHAEL BARROS TEIXEIRA

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma bancada portátil para experimentação de controle térmico, inspirada no TCLab, utilizando um Arduino Mega 2560 e transistores TIP31C como elementos de aquecimento. Foi realizada a identificação dinâmica do sistema, estimando parâmetros de primeira ordem (ganho estático, constante de tempo e tempo morto) a partir da resposta ao degrau de duty-cycle de 50 %. Com base nesses dados, projetou-se um controlador Proporcional-Integral em Python, com sintonia por correspondência de coeficientes visando erro estacionário nulo e tempo de acomodação inferior a 400 s. A bancada demonstra portabilidade e custo reduzido, fornecendo interface via pyserial e visualização em tempo real com matplotlib. Resultados experimentais confirmaram a coerência entre modelo teórico e comportamento prático, permitindo modular compromisso entre velocidade de resposta e estabilidade conforme as demandas educacionais de sistemas de controle.

Palavras-chave: Bancada portátil Controle térmico, Identificação Dinâmica, Controlador PI, Python, Arduino., Bancada portátil, Controle térmico, Identificação Dinâmica

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE BANCADA POCKET-SIZE PARA ENSINO E EXPERIMENTAÇÃO EM SISTEMAS DE CONTROLE

1 INTRODUÇÃO

A experimentação em laboratórios de engenharia desempenha papel fundamental na consolidação de conceitos teóricos e no desenvolvimento de habilidades práticas (Surgenor; Firth, 2004; Feisel; Rosa, 2005). Bancadas de trabalho didáticas permitem aos estudantes manipular diretamente sinais elétricos e medir variáveis físicas, elevando a retenção de conhecimento e promovendo aprendizagem ativa, extrapolando a perspectiva teórica de sala de aula. No contexto de sistemas de controle, o uso de protótipos portáteis e de baixo custo amplia o acesso a experimentos, especialmente em ambientes fora de laboratórios tradicionais. A aprendizagem vivenciada com estes módulos permite ainda o contato com conceitos e problemáticas típicas de situações reais de contextos industriais, tais como não linearidades, zona morta e atraso de resposta.

Este artigo propõe uma bancada "*pocket-size*" para controle térmico, baseada no microcontrolador Arduino e em transistores de potência, e em sensoriamento de temperatura. No sistema concebido o microcontrolador executa a interface entre o sistema físico e o software de aquisição e controle, implementado em python em um computador PC. A bancada foi projetada para a realização de experimentos típicos de controle de sistemas, tais como: (i) a identificação de modelos dinâmicos a partir da resposta ao degrau, onde é possível estimar ganho, constante de tempo e tempo morto; (ii) Identificação de modelos baseada em sinais medidos de entrada e saída do sistema real (Aguirre, 2015); (iii) Projeto e implementação de controladores analógicos e digitais na bancada (Ogata, 2010).

Segundo Moura Oliveira, Hedengren e Rossiter (2020, p. 3) evidenciam que a utilização de kits como o Arduino TCLab potencializa o ensino de controladores digitais ao proporcionar uma experiência prática e interativa, capaz de aproximar os estudantes de conceitos complexos de forma acessível e envolvente. Alinhando-se a essa proposta, Moura Oliveira, Soares e Cardoso (2022, p. 151) reforçam a importância dos laboratórios portáteis como estratégia pedagógica eficaz, sobretudo por viabilizarem práticas de engenharia de controle mesmo em contextos com restrições de infraestrutura, ampliando as possibilidades de aplicação do conhecimento teórico em situações reais.

Elawady e Tolba (2009, p. 5) diferenciam laboratórios presenciais, simulados e remotos, concluindo que cada tipo atende a diferentes objetivos—desde habilidades de projeto até compreensão conceitual—e defendem a integração de múltiplas modalidades para otimizar o aprendizado. Kassas et al. (2022, p. 1) discutem atributos desejáveis em ferramentas de ensino de sistemas de controle, enfatizando a importância de interfaces intuitivas e feedback imediato para a efetividade do aprendizado.

Neste trabalho são apresentados resultados do projeto e implementação do protótipo, a sua modelagem baseada em resposta dinâmica de primeira ordem e o projeto de um controlador proporcional integral (PI). O controlador PI foi implementado em Python, utilizando a biblioteca python-control, objetivando desempenho didático e flexibilidade para diferentes topologias de sintonia (python-control.org, 2024).

O protótipo implementado mostrou-se adequado para ensino de engenharia, sendo utilizado em disciplinas de sistemas de controle para turmas de graduação em engenharia elétrica. Do ponto de vista de modelagem, o modelo obtido apresenta uma forte correspondência ao comportamento do sistema real. O controlador PI implementado no sistema real exibiu resultados compatíveis àqueles dos sistemas simulados em ambiente computacional.

2 CONCEPÇÃO, MODELAGEM E CONTROLE DO SISTEMA TÉRMICO

Na concepção do sistema térmico, partiu-se da inspiração no TCLab — um ambiente didático que integra aquecedores e sensores térmicos a uma plataforma Arduino para estudo de controle de temperatura (Park, 2020, p. 2). Com base nesse modelo, desenvolveu-se um protótipo acadêmico portátil e de baixo custo, reduzindo a topologia original a um único canal de aquecimento e um termistor, simplificando o hardware sem comprometer a capacidade de avaliação de desempenho em malha fechada. Essa abordagem permitiu concentrar esforços na implementação do algoritmo de controle em Python e na caracterização da dinâmica térmica do sistema real, assegurando que o escopo do trabalho abrangesse desde a aquisição de dados, identificação de sistemas, até a sintonia de controladores, mantendo alinhamento com práticas consolidadas de reprodutibilidade e escalabilidade experimental.

2.1 Modelagem e Identificação Dinâmica

Park (2020, p. 2) descreve o TCLab como benchmark para modelagem de sistemas térmicos, destacando quatro abordagens — lumped-parameter, FOPDT, ARX e Hammerstein — para representação da dinâmica térmica de um canal. No entanto, em consonância com as práticas mais estudadas na graduação de engenharia e considerando a natureza térmica do sistema, este trabalho adota um modelo linear de primeira ordem (FOPDT) como estratégia principal. Evers et al. (2019, p. 2) aplicam métodos de identificação a sistemas térmicos de precisão, enfrentando desafios como grandes transientes e limites de excitação, e propõem abordagens de regressão polinomial e NARX para modelagem eficiente, as quais serão avaliadas em comparação ao modelo FOPDT.

2.2 Projeto e Sintonia de Controladores Proporcional-Integral em Python

O algoritmo de controle adotado no trabalho foi o controlador Proporcional-Integral (PI), combinando ação proporcional, que reage diretamente ao erro instantâneo, com ação integral, que acumula o erro ao longo do tempo para eliminar o desvio em regime permanente. Formalmente, em domínio de Laplace, o compensador PI é representado através da Equação (1):

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

Onde no contexto do controle proporcional-integral (PI), os parâmetros K_p e K_i representam, respectivamente, os ganhos proporcional e integral. O ganho proporcional K_p ajusta a resposta do sistema ao erro atual, influenciando diretamente o tempo de resposta e o sobressinal (*overshoot*). Por outro lado, o ganho integral K_i acumula o erro ao longo do tempo, corrigindo desvios persistentes e eliminando o erro estacionário em regime permanente. No entanto, a inclusão da ação integral pode aumentar o tempo de acomodação do sistema, exigindo um balanceamento cuidadoso entre rapidez e precisão na resposta (OGATA, 2010).

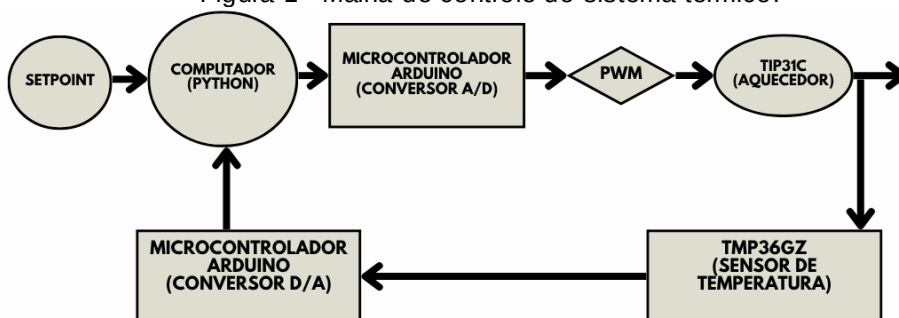
A opção por um controlador PI para a avaliação do sistema pode ser expressa pela necessidade de regular a temperatura com erro nulo em regime estacionário, e ainda, buscar uma resposta dinâmica com o tempo de acomodação menor que a do sistema em malha aberta.

2.3 Metodologias de Implementação em Python

A *python-control* é a principal biblioteca para análise e projeto de sistemas de controle em Python, fornecendo classes de sistemas lineares, operações de diagrama de blocos e funções para sintonia de controladores (python-control.org, 2024). Embora o foco seja mais amplo, exemplos de uso mostram como instanciar um controlador PI a partir de sua função de transferência, sem necessidade de codificação manual da integração numérica.

No protótipo didático concebido um sinal de atuação é estabelecido em uma interface python computacional. O sinal é transmitido por comunicação serial para o microcontrolador Arduino, que o modula por PWM (*Pulse Width Modulation*) como um sinal de tensão analógico na base de um transistor de potência. A corrente gerada no transistor resulta no seu aquecimento por efeito Joule. Dados coletados por um sensor de temperatura mostram que existe então uma relação dinâmica entre o sinal de tensão de entrada e a temperatura estabelecida no transistor. Este comportamento é então aproveitado como a malha de controle que compõe o sistema térmico proposto, o qual é apresentado no diagrama da Figura 1.

Figura 1 - Malha de controle do sistema térmico.



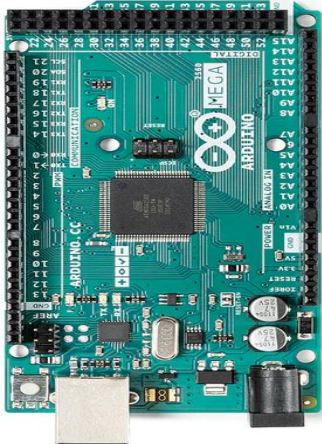
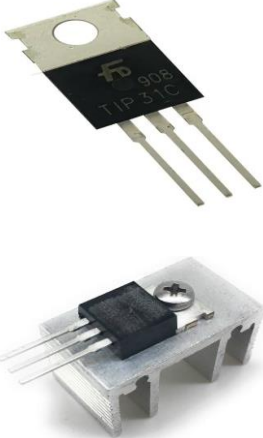
Fonte: Autores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a implementação desta bancada experimental foram utilizados componentes de baixo custo e fácil acesso por laboratórios de ensino, o que facilita a replicação deste sistema. São utilizados o microcontrolador Arduino Mega 2560, o transistor de potência TIP31C

acoplado a um dissipador de temperatura de alumínio e o sensor de temperatura TMP36GZ, os quais são apresentados na Figura 2.a, 2.b e 2.c respectivamente.

Figura 2 - Componentes físicos do protótipo.

Fig.2.a - Microcontrolador Arduino Mega 2560	Fig. 2.b - Transistor de potência com dissipador.	Fig. 2.c Sensor de temperatura TMP36GZ
		
Fonte: Arduino Store.	Fonte: Mercado Livre.	Fonte: Mercado Livre.

O microcontrolador Arduino Mega 2560 é baseado no ATmega2560 que disponibiliza 54 portas digitais de I/O (sendo 15 com capacidade PWM) e 16 entradas analógicas com conversor A/D de 10 bits (resolução de 0–5 V em 1 024 níveis). Essa configuração robusta viabiliza tanto o acionamento do transistor de potência quanto a amostragem do sensor de temperatura, além de suportar futuras expansões para múltiplos canais.

O elemento de aquecimento é composto por um transistor TIP31C em configuração emissor-comum, acompanhado de resistor de base de 1 k Ω para limitar correntes de pico. O sinal PWM (0–5 V) gerado por uma fonte estabilizada de 5 V/2 A fornece alimentação ao TIP31C, garantindo estabilidade de tensão. O Arduino modula a corrente no dissipador de alumínio perfurado, convertendo potência elétrica em calor de maneira linear em função do *duty-cycle*.

O TMP36GZ fornece tensão de saída proporcional à temperatura (10 mV/°C). Posicionado junto ao dissipador através de uma pasta térmica, o sensor é lido pelas entradas A0–A15 do Mega 2560 a cada 0,5 s. O conversor AD do arduino converte o valor bruto de 10 bits em tensão e, por meio da equação de calibração do fabricante, em graus Celsius, assegurando precisão de ± 2 °C.

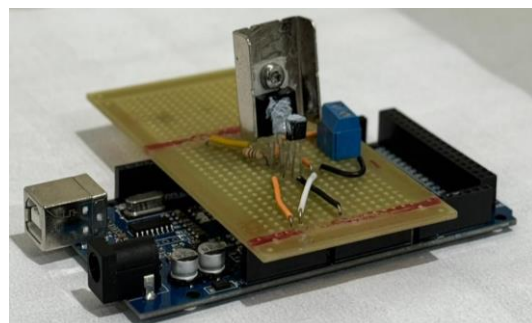
Com todos os componentes devidamente preparados e identificados, procedeu-se à soldagem dos elementos na placa de circuito impresso de 15 $\times$ 10 cm. Inspirada no TCLab original, esta configuração contemplou a fixação do transistor, do dissipador de calor e do sensor de temperatura, entre outros componentes previamente descritos, mantendo a capacidade de experimentação de controle térmico em ambiente doméstico. A Figura 3.a ilustra a disposição final dos itens na placa, destacando visualmente a organização do circuito. A Figura 3.b, por sua vez, apresenta a bancada experimental completa, já montada e pronta para os testes, evidenciando a integração entre os componentes eletrônicos e os demais instrumentos utilizados durante as experimentações.

Fig. 3.a - Disposição final dos itens na placa.



Fonte: Autores.

Fig. 3.b - bancada experimental completa.

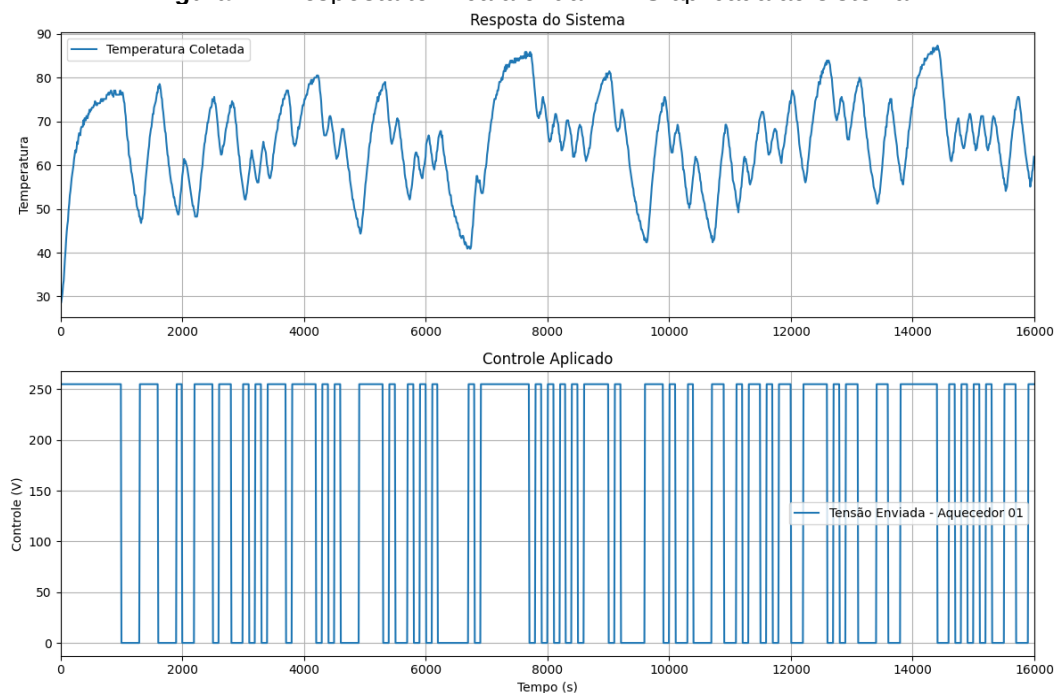


Fonte: Autores.

3.1 Testes de Excitação com PRBS

Para verificar o comportamento dinâmico da bancada, foi aplicado um sinal de Sequência Binária Pseudo-Aleatória (*Pseudo-Random Binary Sequence*, PRBS) com *duty cycle* de 100 % (5 V médios), alternando aleatoriamente entre ligado e desligado em ciclos de segundos, durante 260 min de aquisição contínua. A Figura 4 mostra a resposta medida na planta térmica, que acompanha fielmente o padrão de controle aplicado. Embora a identificação de parâmetros do modelo não tenha sido realizada a partir desse ensaio, o sinal PRBS é conhecido por fornecer riqueza espectral suficiente para algoritmos de identificação de sistemas lineares. No caso em particular da bancada, a modelagem foi efetuada por meio da determinação dos parâmetros a partir da resposta ao degrau, enquanto o ensaio com PRBS ilustra a capacidade da bancada de reproduzir diferentes frequências de excitação.

Figura 4 – Resposta térmica à onda PRBS aplicada ao sistema.

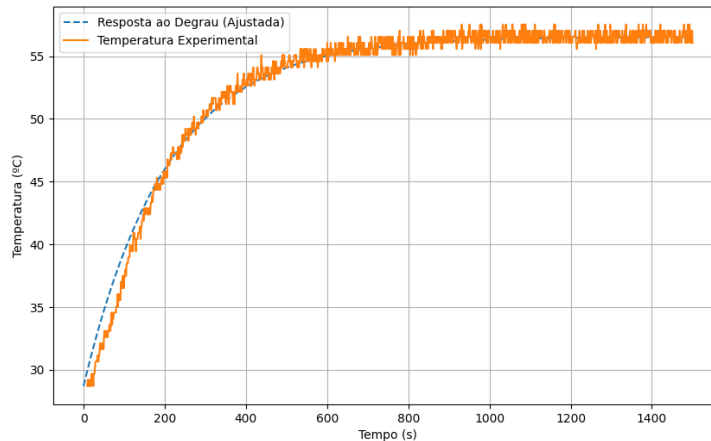


Fonte: Autores.

3.2 Modelagem e Projeto do Controlador PI

A partir da curva de resposta ao degrau vista na Figura 5, a resposta térmica coletada permitiu extrair ganho estático, constante de tempo e tempo morto para modelagem tendo em base o avanço da temperatura a partir da temperatura ambiente de 28°C. Constatou-se comportamento de primeira ordem sem zeros. O tempo de assentamento $t_s \approx 4\tau$ foi estimado em 900 s, resultando em $\tau = 225$ s. Em regime permanente, a diferença de temperatura estabilizou 15 °C para entrada de 2,5 V médios, definindo ganho $K = 15/2,5 = 6$ °C/V.

Figura 5 – Resposta experimental ao degrau de entrada comparado ao degrau simulado.



Fonte: Autores.

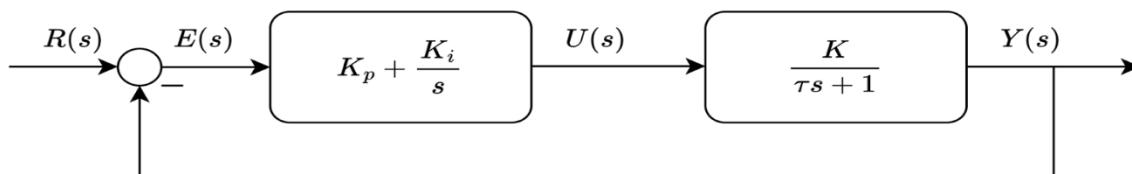
Com os valores obtidos, a planta térmica é aproximada através da Equação (2):

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{6}{225s + 1} \quad (2)$$

Para atingir erro zero em regime permanente e $t_s \leq 400$ s, adotou-se controlador PI seguindo o modelo apresentado na Equação (1) anteriormente.

Onde posiciona-se a Equação (1) na malha de controle conforme visto na Figura 6 - Malha de controle do sistema térmico com realimentação:

Figura 6 - Malha de controle do sistema térmico com realimentação:



Fonte: Autores

A função de transferência em laço fechado mostrada na Equação (3) foi avaliada em simulação e comparada aos dados experimentais ao degrau.

$$G_{mf}(s) = C(s) \frac{G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (3)$$

É relevante apontar que a malha de controle assim estabelecida passa a exibir uma dinâmica de um sistema de segunda ordem, cuja função de transferência em malha fechada é dada através da Equação (4):

$$G_{mf}(s) = \frac{\frac{KK_p}{\tau}s + \frac{KK_i}{\tau}}{s^2 + \left(\frac{1+KK_p}{\tau}\right)s + \frac{KK_i}{\tau}} \quad (4)$$

Esta representação pode então ser comparada a de um sistema de segunda ordem canônico, com amortecimento ζ e frequência natural ω_n , dada pela Equação (5):

$$H(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

Comparando os coeficientes do numerador de (4) e (5) é possível determinar valores dos ganhos do controlador a partir do amortecimento e frequência natural desejados. Estes parâmetros estão associados ao tempo de acomodação do sistema, que passa a figurar como um requisito de projeto do controlador. Assim, escolhendo $\zeta = 0,707$ e $\omega_n = 4/(\zeta t_s) = 0,014$ rad/s, aplicam-se as condições de sintonia via correspondência de coeficientes em função de ζ e ω_n , resultando nos valores de K_p e K_i apresentados no tópico de resultados.

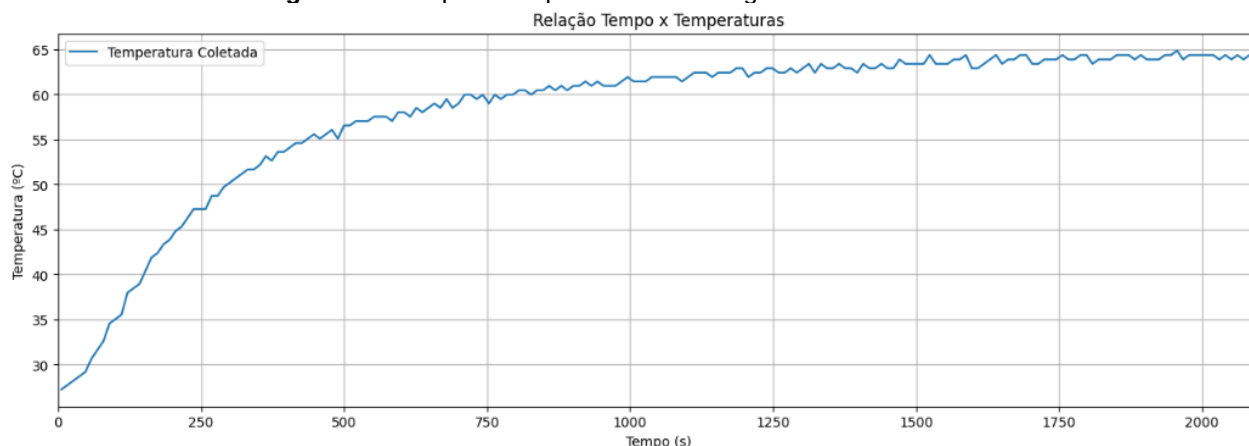
4 RESULTADOS

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos nos testes de identificação do processo térmico em malha aberta, na síntese e validação do controlador Proporcional-Integral e na análise comparativa entre simulação e ensaio prático.

4.1 Resposta ao Degrau em Malha Aberta

A aplicação de um degrau de 50 % do *duty-cycle* (2,5 V médios) por 2000 segundos, forneceu o perfil de resposta mostrado na Figura 5. Observou-se um comportamento de primeira ordem, sem dinâmicas oscilatórias, com tempo de assentamento (t_s) de aproximadamente 900 s e ganho estático (K) de 6 °C/V.

Figura 5 – Resposta experimental ao degrau em malha aberta.



Fonte: Autores.

4.2 Avaliação do Controlador PI

Foram realizados três experimentos de controle com parâmetros distintos, conforme a tabela 1 a seguir:

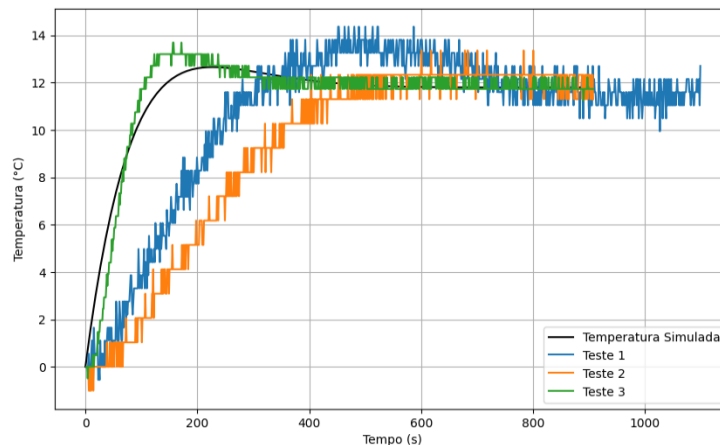
Tabela 01 - Amostragens experimentais do controlador PI.

Experimento	Kp	Ki	Overshoot (%)	ts(s)	Análise do grafico
Teste 1	0,22	0,05	8	800	Subamortecido: resposta estavel, porem lenta.
Teste 2	0,5	0,006	0	600	Superamortecido: sem ultrapassagem e tempo intermediário
Teste 3	0,583	0,0046	12	300	Subamortecido rapido: maior overshoot

Fonte: Autores

As ilustrado na Figura 6, o Teste 2 apresentou a resposta mais suave, enquanto o Teste 3 atingiu a consigna mais rapidamente, ainda que com ultrapassagem de 12 %. O Teste 1, embora estável, demandou maior tempo de acomodação e um overshoot de 14% .

Figura 6 – Comparação das respostas experimentais dos testes 1, 2 e 3.

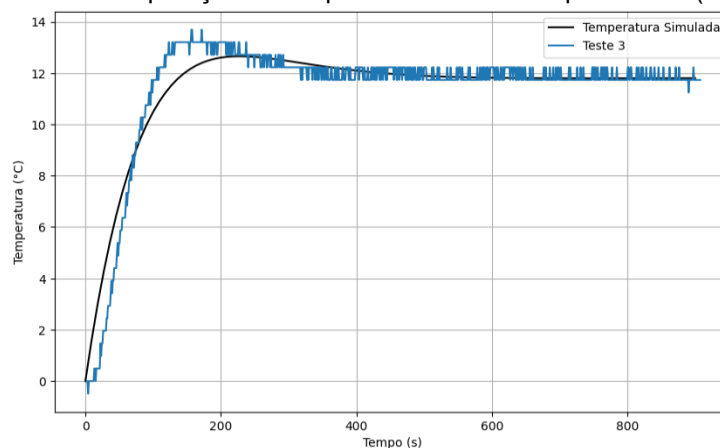


Fonte: Autores.

4.3 Comparação Simulação x Experimental

A resposta simulada do modelo de primeira ordem foi sobreposta à curva experimental do Teste 3 (Figura 7). Verificou-se um *dead-time* de aproximadamente 20 s no ensaio real, não contemplado na simulação, e pequenas oscilações em regime permanente atribuídas a ruídos de leitura e inércia térmica não modelada.

Figura 7 – Sobreposição da resposta simulada e experimental (Teste 3).



Fonte: Autores

Os resultados confirmam a coerência entre modelo teórico e comportamento prático, demonstrando que ajustes em e permitem modular o compromisso entre velocidade de resposta e estabilidade, conforme as demandas específicas de aplicação.

5 CONCLUSÃO

A bancada portátil desenvolvida neste trabalho demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o ensino prático de sistemas de controle, aliando baixo custo, portabilidade e facilidade de implementação. A identificação dinâmica da planta térmica, seguida do projeto e sintonia de um controlador Proporcional-Integral em Python, permitiu aos estudantes observar, de forma direta, a resposta do sistema a diferentes configurações de controle e compreender os efeitos de parâmetros como ganho e constante de tempo sobre o desempenho em malha fechada.

A experimentação prática aproximou teoria e aplicação, proporcionando uma experiência de aprendizagem ativa alinhada às diretrizes educacionais contemporâneas. As respostas subamortecidas e superamortecidas observadas validaram o modelo teórico adotado e reforçaram a importância do ajuste refinado em controladores reais. A proposta mostra-se replicável em contextos acadêmicos diversos, favorecendo o desenvolvimento de competências analíticas e experimentais essenciais à formação em Engenharia.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao Laboratório de Controle, Inteligência e Eletrônica (LINCE), Laboratório de Fabricação Digital (FabLab) e a Faculdade de Engenharia Elétrica (FEE) pelo fomento e apoio a este trabalho.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, Luis Antonio. *Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não lineares: teoria e aplicação*. 4. ed. rev. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015.

ELAWADY, Y. H.; TOLBA, A. S. Educational Objectives of Different Laboratory Types: a Comparative Study. *arXiv*, 2009. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/0912.0932>. Acesso em: 17 maio 2025.

EVERS, E. et al. Identifying Thermal Dynamics for Precision Motion Control. *Control Systems Technology*, Eindhoven University of Technology, v. 27, 2019.

FEISEL, L. D.; ROSA, A. J. The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education. *Journal of Engineering Education*, v. 94, n. 1, p. 121–130, Jan. 2005. DOI: 10.1002/j.2168-9830.2005.tb00833.x.

KASSAS, Z. M. et al. A Unified Approach for Classroom and Laboratory Control Systems Design. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association*, Ohio State University, 2022.

OGATA, Katsuhiko. *Engenharia de controle moderno*. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

PARK, S.T. Benchmark Temperature Microcontroller for Process Dynamics and Control (TCLab). *Brigham Young University*, 2020. Disponível em: <https://scholarsarchive.byu.edu/facpub/2519/>. Acesso em: 17 maio 2025.

PYTHON-CONTROL. *Python Control Systems Library Documentation*. Disponível em: <https://python-control.readthedocs.io/>. Acesso em: 17 maio 2025.

SURGENOR, B.; FIRTH, K. The Role of the Laboratory in Design Engineering Education. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association*, Queen's University, 2004. Disponível em: <https://ojs.library.queensu.ca/index.php/PCEEA/article/view/3848>. Acesso em: 17 maio 2025.

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A POCKET-SIZE BENCH FOR TEACHING AND EXPERIMENTATION IN CONTROL SYSTEMS

Abstract: *This paper describes the development of a portable thermal control bench, inspired by the TCLab, using an Arduino Mega 2560 and TIP31C transistors as heating elements. Dynamic identification of the system was performed by estimating first-order parameters (static gain, time constant, and dead time) from the 50 % duty-cycle step response. Based on these parameters, a Proportional-Integral controller was designed in Python, tuned by coefficient matching to achieve zero steady-state error and a settling time below 400 s. The bench offers portability and low cost, featuring a serial interface through pyserial and real-time visualization with matplotlib. Experimental results confirmed the alignment between theoretical model and practical performance, enabling adjustment of the trade-off between response speed and stability to meet educational requirements in control systems*

Keywords: *Portable bench; Thermal control; Dynamic identification; PI controller; Python; Arduino.*

