

Análise do controle PID aplicado a um processo térmico

Giuseppe Manoel D Melo (IFPB, Campus Cajazeiras), Heriliany Iasmim de Sousa (IFPB, Campus Cajazeiras), Geronimo Barbosa Alexandre (IFPB, Campus Cajazeiras).

E-mails: giuseppe.manoel@academico.ifpb.edu.br, Heriliany.iasmim@academico.ifpb.edu.br, geronimo.alexandre@ifpb.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.05.02-5 Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais.

Palavras-chave: protótipo; temperatura; instrumentação; controle; supervisão.

1. Introdução

Sistemas de controle bem projetados são essenciais para aumentar a eficiência operacional, evitar paradas inesperadas e reduzir o tempo de *startup*, contribuindo para a manutenção inteligente de plantas industriais (OGATA, 2010). Controladores PID (proporcional, integral e derivativo) são amplamente utilizados em processos lineares, e seu desempenho pode ser mantido em sistemas levemente não lineares por meio de ajustes periódicos. Em malha fechada, o controlador atua com base no erro entre a referência e o valor medido, garantindo robustez e estabilidade ao sistema (DORF; BISHOP, 2001).

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo térmico em escala laboratorial com controle PID ajustado pelo método de Ziegler-Nichols. A planta é controlada por um CLP modelo FX3U-24MR da Mitsubishi Electric, com supervisão realizada via *software* VTScada, permitindo operação, ajuste de parâmetros e monitoramento em tempo real.

2. Materiais e métodos

O protótipo térmico é ilustrado na Figura 1, tendo sido desenvolvido para simular a dinâmica de um processo real de aquecimento e resfriamento em ambiente controlado. A fonte de calor é composta por uma lâmpada incandescente de 100 W (220 V), enquanto a medição de temperatura é realizada por um sensor PT100 blindado, acoplado a um transmissor 4–20 mA. A dissipação de calor é garantida por dois *coolers* de 12 V acionados diretamente pelas saídas digitais do CLP. Para o modo de controle PID, empregou-se um relé de estado sólido (SCR - *silicon controlled rectifier*) que recebe o sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) da placa Arduino UNO R3, o qual por sua vez é comandado por uma saída analógica 0-10V do CLP, modulando a potência entregue à lâmpada. O CLP FX3U-24MR processa o sinal analógico do PT100 e determina as ações de controle para a lâmpada e os *coolers*, de modo que a estratégia PID seja implementada em Ladder usando o *software* GX Works 2. O supervisor foi desenvolvido no *software* VTScada, na tela de supervisão é possível ligar/desligar o sistema (botões virtuais), ajuste do *setpoint* de temperatura, indicadores de estado da lâmpada e dos *coolers*, além de um gráfico em tempo real da temperatura e exportação dos dados do processo.

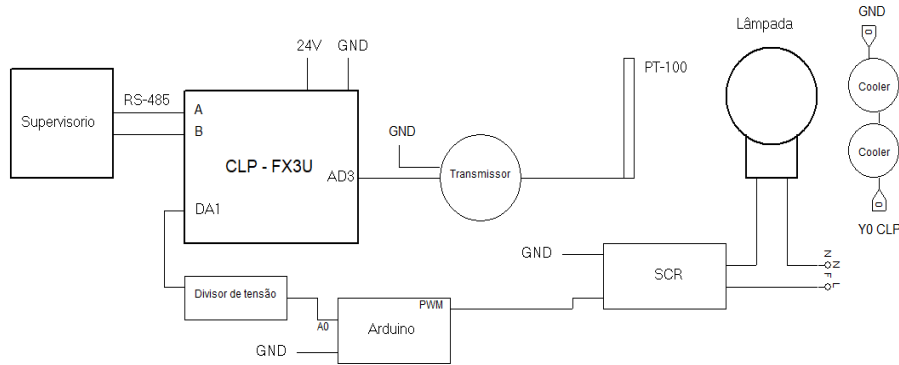
Figura 1 – Protótipo montado no laboratório.



Fonte: Autores (2025).

O custo total do sistema foi de R\$ 577,61, significativamente inferior ao custo médio de bancadas didáticas comerciais similares, estimadas em torno de R\$ 10.000,00. A Figura 2 ilustra o diagrama elétrico da bancada, incluindo as conexões para o controle PID. O processo de aquecimento é composto por três principais partes: os atuadores, os sensores e o CLP. O sensor de temperatura PT100 usado, possui uma faixa de temperatura vasta, permitindo medições precisas em ambientes que variam de -200°C a 850°C. O conversor de temperatura do PT100 para 4-20mA (entrada analógica – AD3 que está sendo usada) utilizado possui range de 0°C a 150°C.

Figura 2 – Diagrama elétrico para o sistema de controle PID.



Fonte: Autores (2025).

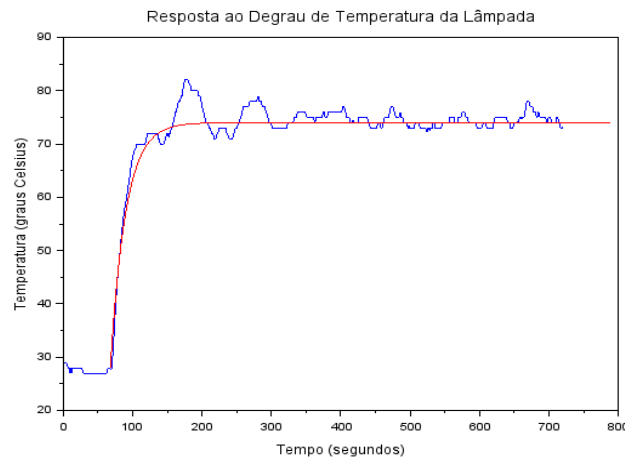
2.1 Ensaio em Malha Aberta para Modelagem do Processo Térmico

Para obter a função de transferência do sistema térmico, foi realizado um ensaio em malha aberta com a lâmpada operando sem controle. A temperatura foi registrada via CLP e exportada pelo VTScada, sendo analisada no Scilab para gerar o gráfico da temperatura \times tempo. O sistema foi modelado como um processo de primeira ordem com atraso, com variação de temperatura de 46 °C (de 28 °C a 74 °C), constante de tempo de 90 s e atraso de 68 s. A equação (1) que descreve o processo, demonstrou boa aderência aos dados experimentais.

$$P(s) = \frac{46}{90s + 1} e^{-68s} \quad (1)$$

A Figura 3 apresenta, em azul, os dados experimentais obtidos e, em vermelho, a curva simulada com base na equação do modelo matemático do sistema.

Figura 3 – Resposta ao degrau do modelo do processo versus os dados experimentais de temperatura.



Fonte: Autores (2025).

A partir desse gráfico, aplicou-se o método da curva de reação de Ziegler-Nichols para determinar os parâmetros K_p , T_i e T_d , que foram utilizados nas simulações e posteriormente na validação do controlador PID.

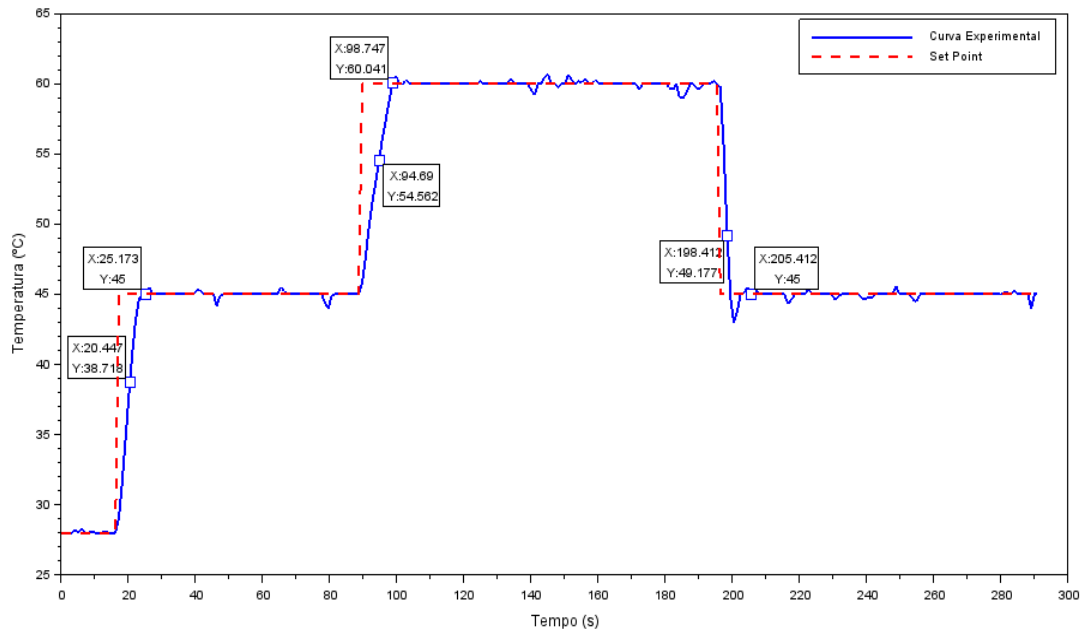
3. Resultados e discussão

O experimento de validação do controle PID com ventilação forçada ocorreu no dia 20/03/2025 e teve duração de 1h (das 14h:20m as 15h:20m), os dados foram exportados e tratados no *software* Scilab.

Na Figura 4 é possível ver o comportamento da ação de controle, com a saída seguindo a referência de controle num cenário de vários degraus de temperatura (45°C, 60°C e -45°C) partindo da temperatura ambiente (28°C).

A Tabela 1 foi organizada para apresentar os valores dos parâmetros de desempenho do controle PID frente aos três degraus de temperatura (45°C, 60°C e -45°C), vide Figura 4. Os ganhos do controlador sintonizado e avaliados no cenário da Figura 4, foram $K_p=100$, $K_i=1$ e $K_d=30$, percebe-se que o sistema é estável e bem comportado em malha fechada, mostrando que a lei de controle consegue levar a saída controlada (temperatura) a seguir as referências de controle, com erro em regime permanente nulo.

Figura 5 – Resultados experimentais do controle PID.



Fonte: Autores (2025).

Tabela 1. Dados de desempenho e robustez do controle PID experimental.

Parâmetro	Setpoint de 45°C	Setpoint de 60°C	Setpoint de -45°C
Tempo de subida	20,44s	4,69s	8,41s
Tempo de acomodação	25,17s	8,75s	15,41s
Overshoot	0,0%	0,0%	0,0%
Valor do pico	0,99	1,01	1,04

Fonte: dados da pesquisa (2025).

Percebe-se da Tabela 1 que para sair da temperatura ambiente (28°C) para a temperatura de 45°C o controle levou 25,17 s, contudo para a temperatura de 60°C o controle levou 8,75 s, tendo em vista que o sistema térmico já se encontrava aquecido. Já no resfriamento (a temperatura estava em 60°C e foi para 45°C), o controle levou 15,41 s, aproximadamente o dobro do tempo quando aqueceu de 45°C para 60°C, contudo foi usada a ventilação forçada, que ajudou a reduzir a dinâmica térmica.

Durante os testes de validação da aplicação SCADA na operação do processo didático foi observado um atraso (latência) no envio / recebimento dos dados de aproximadamente 4 (quatro) segundos, sendo um tempo insignificante quando comparado com a dinâmica da planta térmica (minutos).

A bancada didática está sendo utilizada em disciplinas da graduação em engenharia de controle e automação para experimentos como modelagem, caracterização de sensores, sintonia de controladores e supervisão local/remota.

4. Considerações finais

A planta didática desenvolvida mostrou-se uma solução eficaz e de baixo custo para experimentação em controle térmico, permitindo medições em tempo real, testes com controladores PID em ambiente sujeito a perturbações, e aplicações no ensino de Engenharia de Controle e Automação. Com custo significativamente inferior ao de bancadas comerciais, o sistema também se destaca pela supervisão local eficiente dos dados.

Como trabalhos futuros, propõe-se a implementação de supervisão remota (*web site*), integração com outras bancadas por meio de comunicação mestre-escravo, teste de novas estratégias de controle como PI *Fuzzy* e PID adaptativo, além da inclusão de sistemas de alarme no SCADA para maior segurança operacional.

Agradecimentos: Ao Instituto Federal da Paraíba Campus Cajazeiras.

Referências

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Moderno**. 8ª Edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5ª Edição, Editora Pearson, 2010.