

IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE CONTROLE DO TIPO “PID” COM FOCO ACADÊMICO

Letícia Gomes, gomes.leticia1@aluno.ifsp.edu.br¹

Gabriel de Moraes Cordeiro, cordeiro.gabriel@aluno.ifsp.edu.br¹

Leonardo Santos Mendonça, leomendonca99876@gmail.com¹

Samuel Augusto Soares Mania, augusto.samuel@aluno.ifsp.edu.br¹

Clayton José Torres, clayton@ifsp.edu.br¹

¹IFSP, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Rua Doutor Aldo Benedito Pierri, 250 - Jardim Paulo Freire, Araraquara.

Resumo. O controle de variáveis como nível e temperatura em tanques é uma aplicação clássica na automação e controle de processos industriais. Este artigo apresenta a implementação de um sistema de controle para um tanque com dupla variável — nível de líquido e temperatura — com foco educacional, visando a formação prática de estudantes de engenharia. O projeto foi desenvolvido utilizando uma planta didática equipada com sensores, atuadores e microcontroladores. Foram aplicadas estratégias de controle clássico, principalmente controladores PID, ajustados por métodos empíricos e simulações computacionais. A metodologia incluiu modelagem matemática simplificada, implementação dos controladores e análise de desempenho com variação de carga e perturbações externas. Os resultados mostraram que, mesmo em ambientes de baixo custo, é possível obter respostas satisfatórias e estáveis, contribuindo para o aprendizado de conceitos fundamentais de controle de sistemas. Além do aspecto técnico, o trabalho destaca o valor das plantas físicas como ferramenta pedagógica, proporcionando aos alunos uma compreensão concreta dos efeitos das variáveis e das respostas do sistema. Conclui-se que esse tipo de aplicação é eficaz para fixar conceitos teóricos e estimular o desenvolvimento de habilidades práticas, além de abrir espaço para a adoção de técnicas de controle avançado e sistemas de supervisão.

Palavras-chave: Controle PID. Tanque. Sistemas. PYTHON.

Abstract. The control of variables such as liquid level and temperature in tanks is a classic application in industrial automation and process control. This paper presents the implementation of a control system for a tank with two variables — liquid level and temperature — with an educational focus, aiming to provide practical training for engineering students. The project was developed using a didactic plant equipped with sensors, actuators, and microcontrollers. Classical control strategies were applied, mainly Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers, adjusted through empirical methods and computer simulations. The methodology included simplified mathematical modeling, controller implementation, and performance analysis under load variation and external disturbances. The results showed that, even in low-cost environments, it is possible to achieve satisfactory and stable responses, contributing to the understanding of fundamental system control concepts. Beyond the technical aspects, the work highlights the value of physical plants as a teaching tool, offering students a concrete understanding of the effects of process variables and system responses. It concludes that this type of application is effective for reinforcing theoretical concepts and encouraging the development of essential practical skills, while also paving the way for the adoption of advanced control techniques and supervision and data acquisition systems.

Keywords: PID Control. Tank. Systems. PYTHON.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas dinâmicos desempenham um papel fundamental na modelagem e controle de processos industriais e ambientais. Entre esses sistemas, tanques de nível e tanques térmicos se destacam por sua ampla aplicação na regulação de fluidos e no gerenciamento da transferência de calor. Esses tanques são governados por equações matemáticas que descrevem fenômenos como variações de nível, temperatura, fluxo e transferência de energia, os quais são intrinsecamente dinâmicos e frequentemente não lineares.

As propriedades desses sistemas são determinadas pelas condições físicas e pelas interações entre variáveis de entrada, como vazão ou energia térmica, e as respostas de saída, como altura do fluido ou temperatura; Assim como as

membranas celulares no contexto biológico podem ser comparadas a circuitos elétricos devido às suas propriedades eletroquímicas, os tanques podem ser representados por modelos matemáticos que se assemelham a sistemas elétricos, com resistências e capacidades equivalentes às restrições e acumulações de massa ou energia.

A complexidade dos tanques de nível e térmicos surge das interações não lineares entre os diferentes elementos e da necessidade de modelagem precisa para atender a objetivos específicos, como controle de temperatura ou manutenção de níveis estáveis (Costa; Silva; Queiroz, 2021). A concepção de modelos matemáticos, mesmo que inicialmente simplificados, é indispensável para compreender os mecanismos subjacentes ao comportamento dinâmico desses sistemas. Combinando estratégias clássicas de controle e técnicas avançadas, como inteligência artificial, é possível aprimorar a eficiência e a precisão do controle desses sistemas, trazendo contribuições significativas para diversas áreas da engenharia. A área de controle térmico tem experimentado um crescimento notável nos últimos anos, refletindo a demanda crescente por soluções eficientes e inovadoras em campos como automação industrial, processamento de energia e desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

O controle de sistemas térmicos envolve o estudo e a aplicação de técnicas para regular o comportamento de sistemas que envolvem a transferência de calor e a interação com fluidos. O estudo desses sistemas, como no caso de tanques de nível com aspectos térmicos, permite explorar a interação entre o controle de variáveis como nível e temperatura, contribuindo para a otimização de processos, a estabilidade operacional e a eficiência energética (Mendes, 2017). Além disso, a compreensão e o controle integrados de variáveis térmicas e hidráulicas possibilitam a regulação de sistemas interdependentes de forma mais robusta, reduzindo falhas, melhorando o desempenho e diminuindo custos operacionais. Essa abordagem é especialmente relevante em aplicações como reatores químicos, sistemas de climatização e processos industriais, onde a sinergia entre transferência de calor e fluxo de fluido é essencial para a qualidade e sustentabilidade do processo. Nesse contexto, destaca-se também a relevância pedagógica do estudo de sistemas térmicos e de controle.

O ensino de engenharia tem se beneficiado fortemente da associação entre teoria e prática, especialmente quando se utilizam sistemas reais ou simulados que representam fielmente os desafios industriais. No entanto, muitas bancadas didáticas disponíveis comercialmente apresentam custos elevados ou restrições quanto à flexibilidade de hardware e software, limitando o potencial dos alunos em projetar, adaptar e implementar suas próprias soluções. Essa limitação representa um obstáculo significativo, pois uma das competências essenciais do engenheiro é justamente a capacidade de desenvolver soluções completas, desde a concepção até a implementação.

Como apontado por Ferreira (2006), uma das dificuldades do ensino em Engenharia de Controle é o alto nível de abstração envolvido, tornando essencial a presença de laboratórios e ambientes experimentais que permitam ao aluno aplicar o conhecimento teórico em situações práticas. Assim, a utilização de sistemas térmicos de tanques como plataforma didática oferece uma excelente oportunidade para desenvolver essa competência, permitindo que os estudantes fortaleçam tanto a compreensão conceitual quanto às habilidades práticas, promovendo uma formação mais sólida, crítica e aplicada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica dos conteúdos que abordam a modelagem matemática de tanques em nível e térmicos, conceitos gerais de sistemas de controle aplicados a volumes de controle, aplicações semelhantes e também dados fornecidos no catálogo do fabricante do tanque.

Com base nessas informações, foi desenvolvida a modelagem matemática do sistema, seguida da simulação numérica do comportamento dinâmico utilizando ferramentas computacionais. Por fim, o modelo proposto foi testado e validado experimentalmente na planta didática de tanque disponível no campus da faculdade, permitindo comparar os resultados simulados com os obtidos na prática e avaliar a efetividade do controle implementado.

2.1. Sistemas de Controle

De acordo com a definição apresentada por Corriou (2004), os sistemas de controle podem ser representados por modelos que descrevem a relação entre variáveis de entrada e de saída de um processo, o que é especialmente útil em aplicações como o controle de processos químicos. Um sistema com uma única entrada e uma única saída é classificado como SISO (*Single Input, Single Output*), enquanto sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas são chamados MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*). Corriou destaca que, nos sistemas MIMO, é comum que o número de variáveis manipuladas (entradas) seja maior do que o de variáveis controladas (saídas), o que exige uma abordagem mais elaborada para o projeto e a análise do controle.

2.2. Sistemas de Controle

O estudo foi realizado no Laboratório de Hidráulica e Pneumática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), campus Araraquara, utilizando um sistema composto por um reservatório de aço inoxidável de 100 litros, uma bomba centrífuga de 1/2 CV, e um aquecedor de passagem de 5 kW, operando em 220V

monofásico. O sistema possui transmissores de temperatura com precisão de 0,2% da escala total (0 °C a 100 °C), e na saída do aquecedor, uma válvula esférica e um transdutor de vazão com capacidade de 0 l/h a 3000 l/h. A vazão é controlada por uma válvula proporcional acionada por atuador elétrico de 24 VCC, com fluxo direcionado para um rotâmetro (200 l/h a 2000 l/h) e um reservatório auxiliar de 75 litros.

O controle é feito por um CLP de 24 VCC, com memória de 128 KB e entradas e saídas digitais e analógicas. O objetivo do trabalho é modelar o comportamento dinâmico do nível de água e da temperatura na saída do aquecedor, com base nas vazões de entrada e saída. O reservatório possui formato cilíndrico, capacidade de 160 litros (30 litros utilizados) e duas aberturas para entrada e saída do fluido. As especificações do reservatório, bem como as considerações mais importantes para a análise, estão apresentadas na Tab. 1 e 2 respectivamente, enquanto seu detalhamento técnico está disposto na Fig. 1 e o modelo simplificado considera suas propriedades principais relevantes para o estudo.

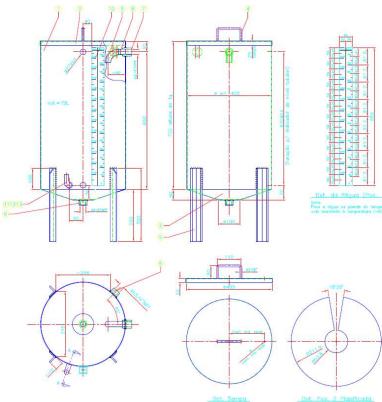


Figura 1. Parte do desenho técnico do tanque utilizado (Fonte: Ribas, S., 2011).

Tabela 1. Especificações do tanque utilizadas (Fonte: Elaborado pelos autores).

Área da base	$A = 0,2513m^2$
Altura máxima do tanque	$h = 0,65 m$
Área da válvula de entrada	$k1 = 0,00057 m^2$
Área da válvula de saída	$k2 = 0,00057 m^2$

Tabela 2. Simplificações físicas e hipóteses (Fonte: Elaborado pelos autores).

Aceleração da Gravidade	$g = 9,807 m/s^2$
Válvulas inteligentes	Fluxo relacionado diretamente a abertura
Abertura válvula 1	$a1 = 80\%$
Abertura válvula 2	$a2 = 100\%$

3. MODELAGEM DE NÍVEL DO SISTEMA

A modelagem matemática de sistemas dinâmicos é essencial na engenharia de controle, pois permite a previsão do comportamento de processos físicos e possibilita o desenvolvimento de estratégias de controle eficientes; Em especial, os sistemas de tanques são amplamente utilizados para representar processos industriais envolvendo armazenamento e transporte de fluidos. O controle de nível em tanques é uma aplicação clássica que, embora aparentemente simples devido à sua presença comum em ambientes universitários, carrega complexidades devido à não linearidade dos fluxos e à dependência de parâmetros físicos como área da base, vazão e altura da coluna de fluido.

Com os parâmetros do sistema definidos e as funções de transferência obtidas, implementou-se o modelo em um ambiente de simulação computacional. Os testes contemplaram variações na abertura das válvulas e perturbações externas, sendo analisadas as respostas temporais do sistema em termos de estabilidade, tempo de subida, sobrelevação e regime permanente. Os resultados mostraram boa aderência entre o modelo teórico e o comportamento experimental observado na planta.

Foi selecionada uma modelagem de tanque estático como simplificação, assim considerando que todo fluido que entra em um ponto do tanque deve sair em um outro ponto, para poder aplicar-se a equação de Bernoulli entre os pontos de referência 1 e 2 (entrada e saída, respectivamente), baseados na pressão atmosférica. Levou-se em consideração que m refere-se à massa de uma partícula do fluido que percorre 1-2 a uma velocidade v , e a representação do modelo simplificado dispõe-se na Fig. 2.

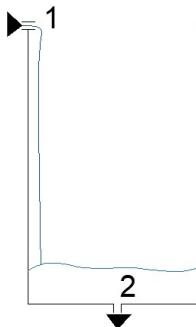


Figura 2 – Esquema simplificado do fluxo do tanque (Fonte:???).

Com os parâmetros do modelo e o sistema definidos, é possível determinar a equação matemática correspondente, e para isso realiza-se o balanço de massas, considerando que a diferença entre a vazão de entrada e saída do tanque corresponde à variação do volume no tanque. Essa relação pode ser expressa em termos da variação da altura:

$$\frac{dv}{dt} \cdot Q_{in(t)} - Q_{out(t)} \quad (1)$$

$$v_{(t)} = A \cdot h_{(t)} \quad (2)$$

$$A_{(t)} \cdot \frac{dH_{(r)}}{dt} = k \cdot \alpha - A_{out} \cdot \sqrt{2g \cdot h_{(t)}} \quad (3)$$

$$\frac{dH_{(r)}}{dt} = k \cdot \alpha - \frac{A_{out}}{A_{(t)}} \cdot \sqrt{2g \cdot h_{(t)}} \quad (4)$$

Os pontos de equilíbrio de um sistema dinâmico representam as condições em que suas variáveis permanecem constantes ao longo do tempo, ou seja, quando as entradas e saídas estão em balanço e não há variação no estado do sistema; Em termos matemáticos, são os valores para os quais as derivadas das variáveis de estado se anulam, indicando que o sistema atingiu uma condição estática ou estacionária. Esses pontos são fundamentais para a análise de estabilidade, pois o comportamento do sistema nas proximidades desses estados revela se ele tende a retornar ao equilíbrio após uma perturbação ou se se desestabiliza. A identificação e a análise dos pontos de equilíbrio são etapas cruciais no projeto de controladores, permitindo a linearização de modelos não-lineares e a aplicação de técnicas clássicas de controle, onde:

$$\left(\frac{dH_{(r)}}{dt} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{k \cdot \alpha}{A_{(t)}} = \frac{A_{out}}{A_{(t)}} \cdot \sqrt{2g \cdot h_{(t)}} \quad (6)$$

$$h_{(t)} = \frac{(k \cdot \alpha)^2}{2g \cdot (A_{out})^2} \quad (7)$$

A modelagem apresentada neste trabalho tem como objetivo obter uma função de transferência que relate a temperatura da água na saída do aquecedor com a vazão volumétrica de entrada, e para isso foram adotadas algumas hipóteses simplificadoras: assume-se que a mistura da água no interior do tanque ocorre de forma rápida e eficiente, garantindo temperatura uniforme em todo o volume a cada instante de tempo (caracterizando-se assim como uma mistura perfeita); considera-se também que não há perdas de calor para o ambiente, caracterizando um sistema termicamente isolado. Além disso, admite-se a possibilidade de variação de massa no interior do tanque, uma vez que há fluxo contínuo de entrada e saída de água, embora o volume de controle seja considerado constante ao longo do tempo. Com essas premissas, é possível aplicar o balanço de energia ao sistema e, a partir disso, derivar uma equação diferencial que descreve a dinâmica térmica do tanque, servindo de base para a obtenção da função de transferência desejada.

A linearização por série de Taylor é uma técnica amplamente utilizada na análise de sistemas não lineares, permitindo aproximar o comportamento do sistema por um modelo linear em torno de um ponto de equilíbrio. Essa abordagem consiste em expandir as equações não lineares em uma série de Taylor e, em seguida, desprezar os termos de ordem superior, mantendo apenas os termos lineares.

O resultado é um sistema linearizado que facilita o uso de ferramentas clássicas de análise e projeto de controle, como função de transferência, lugar das raízes e resposta em frequência. A validade dessa aproximação depende da proximidade do ponto de operação com o ponto de equilíbrio escolhido, sendo especialmente útil em sistemas cuja

dinâmica varia pouco ao redor desse ponto. Foi utilizado esse método para linearizar ambas as equações (Nível e Térmico) em torno dos pontos de equilíbrio, e abaixo segue o exemplo da linearização do nível:

$$\sqrt{2g \cdot H_{(t)}} \quad \text{para} \quad h_{eq} \quad (8)$$

$$\frac{k \cdot \alpha}{A_t} = \frac{A_{out}}{A} \quad (9)$$

$$h_{eq} = y_{eq} \quad (10)$$

$$h_t = y_t \quad (11)$$

$$\sqrt{2g \cdot h_{(t)}} \cong \sqrt{2g \cdot h_{eq}} + \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2g \cdot h_{eq}}} \cdot y_{(t)} \quad (12)$$

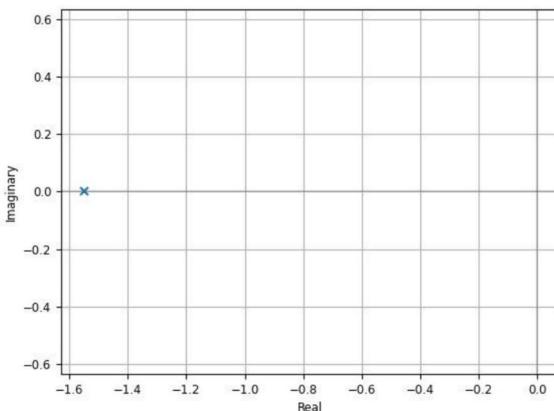
A função de transferência é uma ferramenta matemática fundamental na análise de sistemas dinâmicos, utilizada para representar a relação entre a entrada e a saída de um sistema no domínio da frequência, ou mais especificamente, no domínio de Laplace; Essa representação permite descrever o comportamento dinâmico do sistema por meio de equações algébricas, facilitando a análise de sua resposta e o projeto de controladores. A aplicação da função de transferência é amplamente difundida nas áreas de engenharia de controle, eletrônica e modelagem de sistemas, sendo essencial para o desenvolvimento de estratégias de controle eficientes e para a compreensão da dinâmica envolvida em processos físicos e industriais. A seguir, são apresentadas as funções de transferência obtidas para as variáveis de nível e temperatura do tanque, resultantes do processo de modelagem matemática realizado neste trabalho.

$$G_{(s)} = \frac{1}{s + \left(\frac{1}{2\sqrt{2g \cdot 0,051}}\right)} \rightarrow \frac{1}{s + 2,21 \cdot H} \rightarrow G_{(s)} = \frac{1}{s + 0,55} \quad (13)$$

$$G_{(H)t} = \frac{1}{s + \frac{1 \cdot \pi \cdot (0,2)}{1 \cdot 0,003} \cdot 0,2} \rightarrow \frac{1}{s + 0,8373} \quad (14)$$

a)

Pole/zero plot for sys[4]



b)

Pole/zero plot for sys[4]

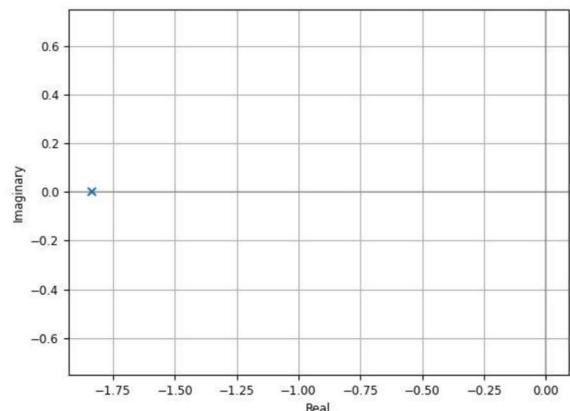


Figura 3. a) Raiz da função transferência de nível. | b) Raiz da função transferência térmica (Fonte: Elaborado pelos autores).

As Fig. 4 a) e b) apresentam os diagramas de blocos que representam, respectivamente, os sistemas de controle de nível e de temperatura do tanque. Ambos os sistemas foram modelados como sistemas dinâmicos de primeira ordem, permitindo uma análise clara de sua resposta temporal e facilitando o projeto de controladores.

Na Fig. 4 a), observa-se a estrutura do sistema de controle de nível, composta por um bloco principal que representa a dinâmica do tanque e um caminho de realimentação. Essa configuração em malha fechada permite que o sistema corrija continuamente o erro entre o valor desejado de nível e a resposta real, por meio de um sinal de controle aplicado à entrada; O sensor de realimentação é representado por um bloco separado, responsável por fornecer a medição do nível atual para comparação com a referência.

De forma análoga, a Fig. 4 b) ilustra o sistema de controle de temperatura, também em configuração de malha fechada. Nesse caso, o bloco principal representa a resposta térmica do sistema, levando em consideração as características físicas do processo de aquecimento. A realimentação atua de modo semelhante ao sistema de nível, possibilitando o ajuste da temperatura de saída com base no valor de referência definido.

Esses diagramas são fundamentais para a compreensão do comportamento dinâmico do sistema, permitindo a aplicação de métodos de controle que assegurem estabilidade, precisão e eficiência no ajuste das variáveis de interesse.

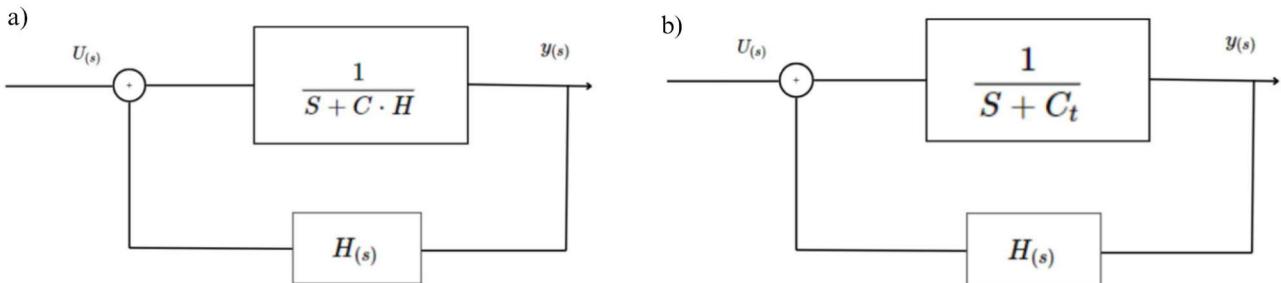


Figura 4. a) Sistema de bloco de nível. | b) Sistema de bloco de temperatura. (Fonte: Elaborado pelos autores).

O ganho "k" foi determinado para o sistema de controle de nível e para o sistema térmico do tanque por meio de simulação. Utilizando ferramentas como a linguagem em PYTHON, foram modelados os dois sistemas e os ganhos ajustados de forma iterativa, visando otimizar a resposta dinâmica e garantir um controle preciso. No caso do sistema de nível, o ganho foi ajustado para assegurar uma resposta estável, com mínimo sobrepasso e tempo de acomodação adequado. Para o sistema térmico, o ganho foi calibrado para garantir que o controle de temperatura mantivesse a precisão desejada, respondendo rapidamente às variações externas sem comprometer a estabilidade. A simulação permitiu identificar os valores ideais de "k" sem a necessidade de testes físicos, oferecendo uma solução eficaz e econômica para os ajustes finos dos sistemas.

Tabela 3. Ganho proporcional de nível e térmico (Fonte: Elaborado pelos autores).

Kp Nível	Kp Térmico
1,818	1,194

5. RESULTADOS

Os parâmetros ajustados para os controladores PID das variáveis térmica e de nível demonstraram desempenho satisfatório frente às exigências do sistema proposto, sendo testados na prática para validar sua eficácia. Para o controle térmico, os ganhos definidos foram $K_p=2,5126$, $K_i=0,5025$ e $K_d=0,314$, proporcionando uma resposta eficiente, com estabilidade e erro em regime estacionário minimizado, o que garantiu a manutenção da temperatura dentro dos limites desejados com precisão. Já para o controle de nível, os parâmetros adotados foram $K_p = 2,5402$, $K_i=5,8$ e $K_d=0$, com um tempo adicional de 100 segundos para análise. Esses valores resultaram em um desempenho robusto, com resposta rápida, baixa oscilação e erro reduzido, assegurando uma regulação eficaz do nível do fluido.

Os testes práticos realizados na planta física confirmaram a necessidade de pequenos ajustes nos parâmetros, visando a adequação ao comportamento real do sistema. Para o controle de nível, o tempo de ação integrativa foi mantido em 5,8 segundos, desconsiderando-se o termo derivativo. No controle térmico, o ganho derivativo foi ajustado para 0,314.

De modo geral, os controladores projetados atingiram o objetivo de estabilizar as variáveis do sistema, equilibrando tempo de resposta, estabilidade e eficiência. Apesar das simplificações realizadas com fins didáticos, os resultados obtidos, após os testes práticos, comprovam a eficácia da estratégia de controle em condições reais, oferecendo uma solução confiável para o gerenciamento simultâneo das variáveis térmica e de nível.

A caracterização dinâmica de sistemas térmicos é fundamental para o projeto e avaliação de estratégias de controle que garantam estabilidade, precisão e resposta rápida diante de variações na referência. Neste contexto, a análise da resposta ao degrau da malha fechada desempenha um papel essencial para compreender o comportamento transitório e estacionário do sistema diante de perturbações ou mudanças na variável de controle, como a temperatura.

A Figura 1 apresenta a resposta temporal do sistema térmico a uma entrada degrau, com amplitude unitária. Observa-se que a curva inicia sua trajetória em um valor inferior a 0,3, o que pode indicar uma condição inicial imposta pela inércia térmica do processo ou um estado anterior de equilíbrio térmico. A partir do instante zero, o sistema responde de forma crescente, atingindo o valor de pico próximo de 1,07 após cerca de 14 segundos, ultrapassando temporariamente

a referência imposta. Essa ultrapassagem, ou overshoot, é típica de sistemas térmicos que possuem certo grau de atraso e acoplamento térmico, frequentemente modelados como sistemas de segunda ordem com amortecimento subcrítico.

Esse comportamento evidencia a presença de energia acumulada no processo térmico, representando a dificuldade do sistema em dissipar rapidamente o calor gerado ou absorvido. Posteriormente, a resposta entra em um regime de acomodação, com uma curva suavemente decrescente até estabilizar-se no valor desejado de 1,0 após cerca de 30 segundos, caracterizando um tempo de acomodação moderado.

Ao se correlacionar essa resposta com os parâmetros térmicos apresentados na Figura 2, pode-se inferir que o modelo térmico foi corretamente sintonizado para garantir estabilidade e controle proporcional-integral adequado. Elementos como a constante de tempo térmica, ganho do processo, e capacidade térmica do sistema influenciam diretamente na inclinação da curva e na duração da resposta transitória. A leve ultrapassagem pode estar associada ao atraso térmico (*dead time*) comum em trocadores de calor, fornos ou câmaras térmicas, exigindo compensações adicionais no controlador.

Do ponto de vista de projeto, a resposta observada é satisfatória para aplicações industriais que não exigem respostas ultra rápidas. No entanto, para processos sensíveis à temperatura ou com margens térmicas restritas (como em bioprocessos ou sistemas eletrônicos), a presença de overshoot pode comprometer a integridade do processo, sendo recomendada a aplicação de estratégias como controle preditivo ou sintonias mais conservadoras (critério de Ziegler-Nichols modificado, por exemplo).

Em síntese, a análise conjunta da resposta ao degrau e dos parâmetros térmicos do sistema revela um modelo bem ajustado, com desempenho robusto em malha fechada, demonstrando capacidade de seguir referências com precisão e sem oscilações significativas. Essa abordagem representa uma etapa fundamental no desenvolvimento e validação de sistemas térmicos automatizados, contribuindo para sua eficiência energética e operacional.

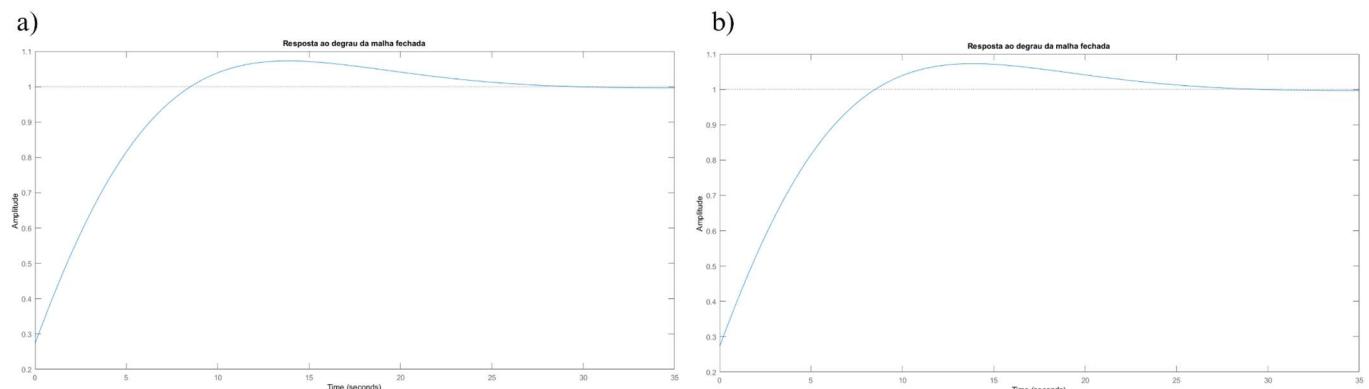


Figura 5. a) Resposta ao Degrau Térmico. | b) Resposta ao Degrau Nível (Fonte: Elaborado pelos autores).

6. CONCLUSÃO

A modelagem matemática e o desenvolvimento dos controladores PID para o controle do nível de água do tanque e da temperatura do aquecedor apresentaram resultados que comprovam a efetividade da abordagem adotada. No controle térmico, a aplicação dos parâmetros finais ajustados $K_p = 2,5126$, $K_i = 0,5025$ e $K_d = 0,314$ garantiu uma resposta rápida, com estabilidade adequada, minimização do erro em regime estacionário e boa rejeição a perturbações. Para o controle de nível, os parâmetros ajustados $K_p = 2,5402$, $K_i = 5,8$ e $K_d = 0$ asseguraram uma operação robusta, com regulação precisa do nível de água e sem oscilações significativas, mesmo diante de variações no sistema. Os testes práticos realizados na planta física permitiram validar as simulações desenvolvidas em ambiente PYTHON, demonstrando que, embora simplificações tenham sido necessárias durante a modelagem como a consideração de mistura perfeita no sistema térmico e a linearização em torno dos pontos de operação, as respostas dinâmicas obtidas foram consistentes com as expectativas teóricas. Além disso, as ferramentas de análise de sistemas de controle utilizadas, como o método do lugar das raízes e o critério de Nyquist, foram fundamentais para garantir a estabilidade e o desempenho desejados para ambas as variáveis controladas.

O trabalho realizado também evidenciou a importância de ajustes finos no comissionamento prático, como o ajuste do tempo integrativo no controle de nível e da constante derivativa no controle térmico, destacando a necessidade de flexibilidade na aplicação dos parâmetros calculados teoricamente. Esses ajustes reforçam a relevância da etapa experimental para a obtenção de sistemas de controle eficazes.

Assim, pode-se concluir que os objetivos propostos neste estudo foram plenamente alcançados, demonstrando a viabilidade de projetar e implementar estratégias de controle eficientes para processos térmicos e de nível de água. Além disso, o projeto contribuiu para o fortalecimento da integração entre teoria e prática no ensino de Engenharia de Controle,

proporcionando uma experiência significativa no desenvolvimento de competências analíticas, práticas e de solução de problemas em sistemas dinâmicos reais.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor Clayton Torres pelo apoio, orientação e dedicação ao longo do desenvolvimento deste trabalho, contribuindo de forma significativa para o nosso aprendizado e crescimento acadêmico. Estendemos também nossos agradecimentos ao LARA – Laboratório de Automação e Robótica Aplicada do Instituto Federal de São Paulo – Campus Araraquara, pelo fornecimento da infraestrutura e dos recursos necessários para a realização das atividades experimentais, promovendo um ambiente propício à pesquisa, inovação e desenvolvimento tecnológico.

8. REFERÊNCIAS

- Abcm. “Journal of the Brazilian Society of Engineering and Mechanical Sciences”. 1 Feb. 2007. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/journal/index.shtml>.
- Andresen, S. Et Al. “Eigenfrequency Maximisation by Using Irregular Lattice Structures”. *Journal of Sound and Vibration*, v. 465, p. 115027, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115027>.
- Astm International. “A276/A276M - 24a: Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes”. West Conshohocken, PA, 2024.
- Big Kaiser. “Damping Tools”. 24 mai. 2024. Disponível em: <https://www.bigkaiser.eu/en/products/damping-tools.html>.
- Castaño, S. Modelagem matemática de nível de um tanque [linearização]. *Youtube*, 2021. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=bEM02M5aI_s. Acesso em: 07 abr. 2024.
- Castaño, S. Modelo matemático de um tanque de nível. *Análise de Sistemas*. Disponível em: https://controlautomaticoeducacion.com/analisis-de-sistemas/tanque-nivel/#google_vignette. Acesso em: 07 abr. 2024.
- Costa, C. R. Q.; Silva, E. T. N.; Queiroz, R. N. Avaliação de dinâmica de nível em tanques em série. In: AYOUB, J. P. (Org.). *Desvendando a engenharia: sua abrangência e multidisciplinaridade*. 1. ed. [S.l.]: Editora Científica Digital, 2021. p. 85–96. Disponível em: <http://www.editoracientifica.com.br/articles/code/210203183>. Acesso em: 22 abr. 2025.
- Corriou, J.-P. *Process control: Theory and Applications*. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2004.
- Ferreira, A. L. S. O problema da defasagem entre a teoria e a prática: proposta de uma solução de compromisso para um problema clássico de controle. [S.l.: s.n.], 2006.
- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P. *Fundamentos de transferência de calor e massa*. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- Mendes, F. V. Modelagem e controle de nível de um tanque de área variável. [S.l.], 2017.
- Moller, B.; Beer, M. *Fuzzy randomness, uncertainty in civil engineering and computational mechanics*. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- Ogata, K. *Engenharia de controle moderno*. São Paulo: Pearson, 2011.
- Prosys. *Planta didática para controle de processos: apostila de treinamento*. Prosys Engenharia, 2011.
- Ribas, S. *Desenho técnico dimensional tanque principal 75L*. Prosys Engenharia, IFSP, Araraquara, 2011.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.