

IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLE PID PARA ESTABILIZAÇÃO DE NÍVEL EM TANQUES DE ÁGUA

Pedro Lucas da Silva (IFMG - Campus Ibirité) E-mail: plucassilva4@gmail.com

Elberth Oliveira Lopes (IFMG - Campus Ibirité) E-mail: elbertholiveira9@gmail.com

Gustavo Canuto Cunha (IFMG - Campus Ibirité) E-mail: gustavocanuto.cunha@gmail.com

Alan Soares Gomes (IFMG - Campus Ibirité) E-mail: alan.soares.gomes01@gmail.com

Thiago H. B. de Carvalho Tavares (IFMG - Campus Ibirité) E-mail: thiago.tavares@ifmg.edu.br

Resumo: O artigo apresenta a implementação de um controlador PID para regular o nível de um tanque de água. O sistema foi modelado matematicamente e discretizado para permitir sua implementação digital. Os parâmetros do controlador foram ajustados para otimizar o desempenho para cada teste realizado. Esses testes mostraram que o PID foi eficaz. Os resultados foram validados via simulação no MATLAB, sugerindo viabilidade para implementação prática.

Palavras-chave: Controle PID, Nível de tanque de água, Controle Digital, Simulação, MATLAB.

IMPLEMENTATION OF A PID CONTROL FOR LEVEL STABILIZATION IN WATER TANKS

Abstract: The article presents the implementation of a PID controller to regulate the water tank level. The system was mathematically modeled and discretized to enable its digital implementation. The controller parameters were adjusted to optimize performance for each test conducted. These tests demonstrated that the PID was effective. The results were validated through simulation in MATLAB, suggesting feasibility for practical implementation.

Keywords: PID Control, Water Tank Level, Digital Control, Simulation, MATLAB.

1. Introdução

O controle é um ramo da engenharia que se dedica à modelagem, análise e projeto de sistemas capazes de regular variáveis de interesse, como temperatura, volume, pressão e velocidade, garantindo que uma grandeza controlada siga um comportamento desejado, mesmo na presença de distúrbios e incertezas (NISE, 2012). Para isso, um controlador atua sobre o sistema por meio de uma ação de controle, ajustando dinamicamente sua resposta de acordo com os sinais de entrada e saída. Os sistemas de controle são amplamente utilizados em diversas aplicações, como no setor automotivo (QUEIROZ, 2023), aeroespacial (ALVES; SICA, 2023) e até mesmo na medicina (DELLAGOSTIN et al., 2024).

O controle digital é uma abordagem moderna de controle em que os sinais de entrada e saída são processados digitalmente, geralmente por meio de um microcontrolador, microprocessador ou processador digital de sinais (DSP). Diferentemente do controle analógico, onde os sinais são contínuos no tempo e amplitude, o controle digital amostra o sinal em instantes discretos e realiza os cálculos de controle por meio de algoritmos numéricos (WAHLSTRÖM, 2015). Dessa forma, a implementação digital permite maior flexibilidade, reconfigurabilidade e integração com outros sistemas computacionais, além de possibilitar o armazenamento e manipulação de dados de forma eficiente.

A principal diferença entre controle digital e controle contínuo reside na forma como o processamento do sinal é realizado. No controle contínuo, as variáveis do sistema são manipuladas de maneira analógica, ou seja, os sinais variam continuamente no tempo e podem assumir infinitos valores dentro de um intervalo. Já no controle digital, os sinais são discretizados em instantes específicos por meio de um conversor analógico-digital (A/D), processados digitalmente e, posteriormente, convertidos de volta para o domínio analógico por um conversor digital-analógico (D/A) (NISE, 2012). Na Figura 1 é ilustrado, por meio de um diagrama de blocos, o posicionamento dos conversores A/D e D/A em um sistema de controle genérico.

Figura 1: Diagrama de blocos detalhado mostrando o posicionamento de conversores A/D e D/A.



Fonte: Nise (2012).

O controle digital apresenta diversas vantagens em relação ao controle analógico. Primeiramente, oferece maior robustez a ruídos e variações ambientais, pois os sinais digitais são menos suscetíveis a interferências. Além disso, possibilita a implementação de algoritmos complexos e adaptativos, que podem ser facilmente modificados sem a necessidade de alterar circuitos físicos. Outra vantagem importante é a facilidade de armazenamento e análise de dados operacionais, permitindo ajustes e otimizações com base em informações históricas. Por fim, o controle digital permite a integração com sistemas computacionais e redes industriais, viabilizando aplicações avançadas como Internet das Coisas (IoT) e Indústria 4.0 (BARBOSA; CARDOSO, 2020).

Dentre os principais tipos de controle digital, destacam-se os controladores proporcional-integral (PI), proporcional-integral-derivativo (PID) e suas variações. O controlador PI é amplamente utilizado quando há necessidade de eliminar o erro em regime permanente, mantendo uma resposta estável (VAZQUEZ-GUTIERREZ et al., 2019). O controlador PID, por sua vez, combina as ações proporcional, integral e derivativa, proporcionando uma resposta mais rápida e estável em sistemas dinâmicos complexos (GUELFÍ et al., 2020). Além desses, existem outras estratégias como o controle preditivo baseado em modelo (MPC) (RAPOSO et al., 2024), que antecipa o comportamento do sistema para otimizar a ação de controle, e os controladores *fuzzy* (DRAKULIĆ, 2023), que utilizam inteligência computacional para ajustar a resposta do sistema de maneira adaptativa.

Neste trabalho, o objetivo é projetar e implementar um controlador PID para um sistema de nível de um tanque de água, considerando um sistema de controle contínuo que é discretizado utilizando o método de segurador de ordem zero (ZOH). Serão estabelecidos critérios de desempenho para o sistema em malha fechada, especificamente o tempo de acomodação e a ultrapassagem percentual. Com base nesses critérios, será projetado um controlador digital que atenda aos requisitos de desempenho especificados. Por fim, a eficácia do controlador será validada por meio de simulações, demonstrando sua capacidade de regular o nível do tanque conforme os parâmetros desejados.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: na Introdução, é apresentado o contexto do problema, bem como os objetivos e a abordagem adotada para a implementação do controlador PID. Na Revisão Bibliográfica, são explorados trabalhos e aplicações relevantes que utilizam controle PID, fornecendo embasamento teórico para o

desenvolvimento deste estudo. A Metodologia detalha os procedimentos realizados, incluindo a descrição do sistema, os critérios de desempenho adotados e as ferramentas utilizadas, como *softwares* de programação. Na seção de Resultados e Discussões, são apresentados os resultados obtidos com a implementação do controlador, analisando seu desempenho em relação aos critérios estabelecidos. A Conclusão sintetiza os principais achados do trabalho e discute suas contribuições. Por fim, são listadas as referências utilizadas ao longo deste artigo na seção Referências.

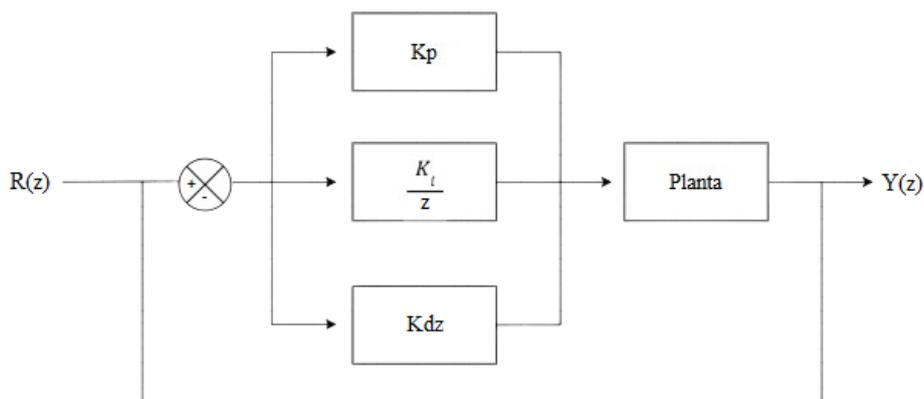
2. Revisão Bibliográfica

Dentro da área de controle digital, os controladores PID se tornaram uma ferramenta essencial no campo do controle automático, sendo amplamente utilizados para regular sistemas dinâmicos e manter uma variável de processo próxima de um valor desejado, como temperatura, pressão, volume ou velocidade. Hagglund e Guzmán (2024) destacam a relevância histórica e contemporânea do controle PID na engenharia de controle e na sociedade em geral, comparando-o com outras grandes invenções, como a eletricidade e o motor a vapor, e enfatizando seu papel revolucionário como pilar do campo de controle automático.

O controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) ajusta a saída de um sistema para alcançar um valor desejado, ou *setpoint*. Ele é composto por três componentes principais: a ação proporcional (K_p), que responde ao erro atual; a ação integral (K_i), que corrige erros acumulados ao longo do tempo; e a ação derivativa (K_d), que antecipa mudanças para melhorar a estabilidade do sistema (GUELFY et al., 2020). A Figura 2 ilustra um sistema de controle com o controlador PID, destacando as três ações. Além disso, essa forma genérica do controlador PID pode ser expressa no domínio da frequência, conforme mostrado na Equação 1 (DORF, 2010):

$$U(z) = k_p + \frac{K_i}{z} + K_d z. \quad (1)$$

Figura 2: Sistema de controle com o controlador PID.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

A seguir, serão apresentados alguns trabalhos que exploram a aplicação do controle PID em diferentes sistemas, destacando sua eficácia na melhoria do desempenho e estabilidade dos processos controlados.

Em Bhandari e Csurcsia (2022) é ressaltado a versatilidade desses controladores em seu trabalho, realizando a transformação da equação contínua do PID no domínio de Laplace para uma equação de diferenças no domínio discreto, usando a fórmula de Tustin. Dessa maneira, foi possível realizar o controle de um sistema de equilíbrio de uma bola sobre uma viga, utilizando uma câmera para detecção da posição, comunicação com um Arduino para controle de um servomotor, e técnicas para lidar com desafios práticos, como ruídos e saturação integral.

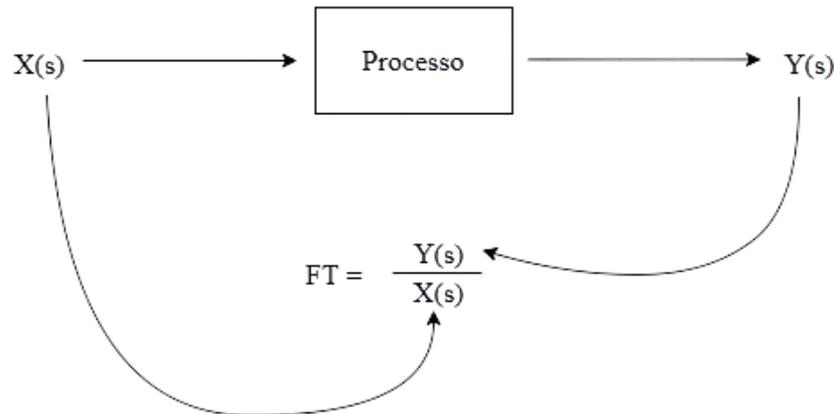
Taler et al. (2022) apresentam outra abordagem, de maneira a proporem um controlador PID digital para manter a temperatura constante da água em um tanque, considerando erros aleatórios nas medições de temperatura. Para melhorar a estabilidade, os autores aplicaram filtros digitais para eliminar a influência de distúrbios aleatórios, resultando em uma operação mais rápida e precisa do controlador, ressaltando a eficiência de tal sistema.

Já o trabalho de Desyatirikova et al. (2019) explora a importância da configuração adequada de controladores em sistemas de controle digital, analisando como as propriedades dinâmicas são influenciadas tanto pelas características do objeto controlado quanto pelo próprio controlador. O estudo investiga as leis de regulação aplicadas a controladores digitais lineares, com ênfase nos algoritmos computacionais utilizados na implementação de controladores PID e nos critérios de ajuste desses sistemas. Além disso, destaca a flexibilidade dos sistemas digitais, evidenciando sua capacidade de processar algoritmos de controle complexos e adaptativos, o que resulta em maior eficiência e precisão.

Outros trabalhos também já exploraram o controle aplicado ao nível de água em tanques, investigando diferentes estratégias de controle. Por exemplo, Drakulić (2023) analisou a teleoperação bilateral utilizando três estratégias: controle direto, controle PID e controle por Lógica Fuzzy. A teleoperação bilateral de um tanque, amplamente utilizada em setores como exploração espacial e manipulação de materiais perigosos, permite que um operador controle remotamente um sistema com avaliação de força, mas enfrenta desafios, como os atrasos na transmissão de dados, que podem comprometer a eficiência do sistema. Para reduzir esses atrasos na comunicação, foi testada a aplicação de variáveis de onda na transmissão de dados, e as comparações entre os métodos mostraram que a abordagem com variáveis de onda reduziu significativamente o tempo de atraso, sendo a estratégia de controle PID a que apresentou menor tempo de resposta e maior eficiência na comunicação bilateral.

Jardim (2019), aborda a implementação de um sistema didático de controle de nível em tanques acoplados, ressaltando sua utilização em indústrias químicas, petroquímicas, de celulose e de alimentos. A modelagem do sistema e a implementação do controlador PID se mostraram fundamentais para analisar a resposta transitória e em regime estacionário, considerando fenômenos como não-linearidade e sinais ruidosos. Esse trabalho é de particular importância, pois, a partir dele, é obtida a função de transferência utilizada neste trabalho, sendo o processo de modelagem apresentado na Seção Metodologia e a função de transferência obtida apresentada na Seção Resultados e Discussões. A função de transferência serve como uma ferramenta fundamental para representar a relação entre entrada e saída de sistemas, o que facilita a análise e o controle, especialmente em sistemas complexos como os envolvidos na teleoperação bilateral. A representação de uma função de transferência genérica é representada na Figura 3.

Figura 3: Representação de uma Função de Transferência.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

O trabalho de Zhang e Hong (2024) propõe um controlador robusto para a manutenção do rumo de navios, abordando a limitação do controlador PID tradicional em condições adversas de navegação. A inovação do estudo está no uso do segurador de ordem zero (ZOH) combinado com modificação não linear, a fim de reduzir o tempo de resposta, melhorar a precisão de controle e diminuir o consumo de energia do leme. O controlador, além de garantir robustez e estabilidade, mostrou-se uma solução energética mais eficiente, atendendo às necessidades práticas de navegação e demonstrando a aplicabilidade do segurador de ordem zero como uma ferramenta eficaz no controle de sistemas dinâmicos.

Em controle digital, é importante realizar a discretização do sistema e o ZOH se destaca como uma ferramenta valiosa para esse processo, mantendo a integridade do controle digital. O ZOH permite que o controlador seja adaptado a um sistema digital, com características de resposta mais estáveis e uma redução significativa dos erros de controle, sem comprometer a precisão ou aumentar o consumo de energia.

Os critérios de desempenho adotados neste trabalho influenciam diretamente a eficácia do controlador PID na regulação do nível do tanque. Esses critérios são, de acordo com Nise (2012): (i) o tempo de acomodação (T_a), que representa o tempo necessário para que a resposta do sistema se estabilize dentro de uma faixa de erro pré definida após uma variação na entrada; e (ii) a ultrapassagem percentual (UP), que indica a magnitude do pico máximo alcançado pela variável controlada antes de se estabilizar no valor final.

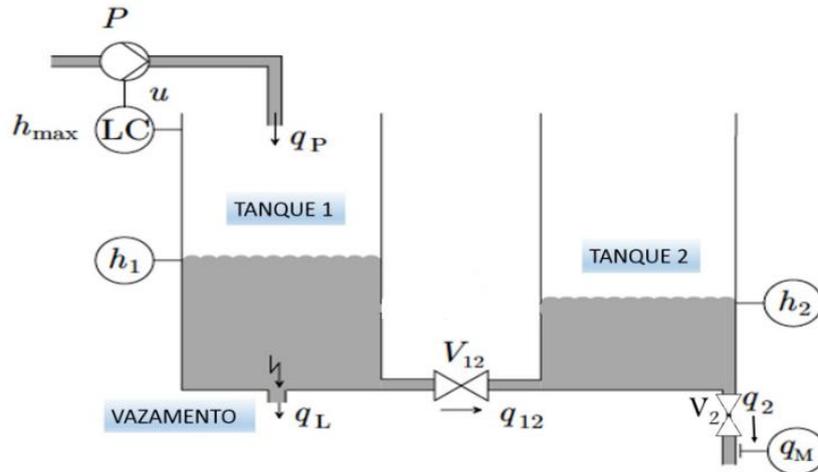
3. Metodologia

Esta seção apresenta a metodologia adotada na realização deste trabalho. A modelagem do sistema a ser controlado é apresentada na Subseção 3.1. Em seguida, na Subseção 3.2, é abordado o desenvolvimento do controlador PID, utilizando Matlab para auxiliar na implementação e visualização dos resultados.

3.1. Modelando o sistema

O sistema a ser desenvolvido neste trabalho é ilustrado na Figura 4. Esse sistema envolve o acoplamento de dois tanques, com o objetivo de controlar o nível de líquido no tanque 2, ou seja, a altura h_2 .

Figura 4 - Sistema de tanques acoplados.



Fonte: Blanke et al. (2006).

Nesse sistema, h_1 e h_2 representam as alturas, em cm, dos níveis de líquido nos tanques 1 e 2, respectivamente. As vazões, em cm^3/s , são indicadas por q_p , que é a vazão que entra no tanque 1; q_{12} , a vazão que entra no tanque 2; q_L , que representa um possível distúrbio, como um vazamento no tanque 1; e q_2 , a vazão de saída do sistema. A válvula V_{12} controla a passagem de líquido entre os dois tanques, enquanto a válvula V_2 regula a saída do líquido do tanque 2 para o reservatório.

A modelagem do sistema, descrita em Jardim (2019), é resumida nesta seção. Para o sistema monotanque com fluxo laminar, o autor baseia-se em um modelo matemático simplificado. O balanço de massa do tanque é representado pela equação diferencial:

$$Ar_1 \frac{dh_1}{dt} = q_p - q_{12}, \quad (2)$$

onde Ar_1 é a área da base do tanque, q_p a vazão de entrada e q_{12} é a vazão de saída. A relação entre q_{12} e a altura h_1 do tanque é dada por:

$$q_{12} = \frac{h_1}{R_1}, \quad (3)$$

sendo R_1 a resistência da válvula de saída. Aplicando a Transformada de Laplace, obtém-se a função de transferência:

$$\frac{H_1(s)}{Q_p(s)} = \frac{R_1}{R_1 Ar_1 s + 1}. \quad (4)$$

Para um sistema de dois tanques acoplados, a modelagem segue princípios semelhantes, com as equações diferenciais governando o fluxo entre os tanques. O balanço de massa para cada tanque é descrito por:

$$Ar_1 \frac{dh_1}{dt} = q_p - q_{12}, \quad (5)$$

$$Ar_2 \frac{dh_2}{dt} = q_{12} - q_2, \quad (6)$$

Aqui, Ar_2 é a área da base do tanque 2.

A relação entre a altura dos tanques e as vazões é expressa por:

$$q_{12} = \frac{h_1 - h_2}{R_1} \text{ e } q_2 = \frac{h_2}{R_2}, \quad (7)$$

onde R_2 representa a resistência da válvula de saída do tanque 2.

A equação final do sistema, considerando a Transformada de Laplace e desconsiderando perturbações, resulta em:

$$\frac{H_2(s)}{Q_p(s)} = \frac{R_2}{R_1 A r_1 R_2 A r_2 s^2 + (R_1 A r_1 + R_2 A r_2 + R_2 A r_1) s + 1}. \quad (8)$$

3.2 Desenvolvimento do controlador PID

Para projetar e implementar o controlador digital PID, foi utilizada a ferramenta computacional Matlab para auxiliar na programação e visualização dos resultados.

Após obter a função de transferência, foi aplicada nela uma entrada em degrau. Assim, foi possível determinar o tempo de subida T_r e de acomodação T_s do sistema antes de aplicar o controle PID. Com o tempo de subida, determinou-se o tempo de amostragem T mais adequado para o problema, sendo esse $\frac{1}{6}$ do tempo de subida. Além disso, com o tempo de acomodação conhecido, é possível propor melhorias nesse tempo que sejam factíveis, ou seja, tempos de acomodação desejados que não exigirá do controlador ganhos tendendo ao infinito.

Os ganhos do controlador PID (K_p , K_i , e K_d) são determinados de acordo com o T_s desejado. Esses ganhos são determinados pelas Equações (12), (13) e (14):

$$K_p = \frac{\tau_1 + \tau_2}{K \cdot \tau}, \quad (12)$$

$$k_i = \frac{1}{K \cdot \tau}, \quad (13)$$

$$k_d = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{K \cdot \tau}, \quad (14)$$

onde: τ_1 e τ_2 são obtidos por meio das raízes (pólos) da função de transferência obtida para o sistema; τ é dado por $\frac{t_s}{4}$ e K pela Equação (15).

$$K = num \cdot \tau_1 \cdot \tau_2, \quad (15)$$

sendo a variável num , o numerador da função de transferência encontrada.

Após determinar os ganhos do PID, partiu-se da Equação (1) para determinar a equação do controlador.

Com o controlador PID implementado, a discretização do sistema foi realizada utilizando o método ZOH. Para a avaliação do desempenho do sistema, foram estabelecidos critérios de desempenho, sendo um deles a ausência de ultrapassagem percentual, ou seja, sem sobressinal na saída. Além disso, definiu-se que o nível de água no tanque 2 deveria atingir precisamente 30 cm.

A fim de analisar o impacto do tempo de acomodação no comportamento do sistema, foram conduzidos seis testes, em que o tempo de acomodação desejado foi ajustado para

diferentes valores percentuais em relação ao tempo de acomodação da planta sem controlador: 95%, 90%, 85%, 80%, 70% e 20%. Esse último cenário foi escolhido propositalmente para impor uma exigência extrema ao sistema, demonstrando que, nessas condições, o controlador não seria capaz de satisfazer os critérios de desempenho estabelecidos.

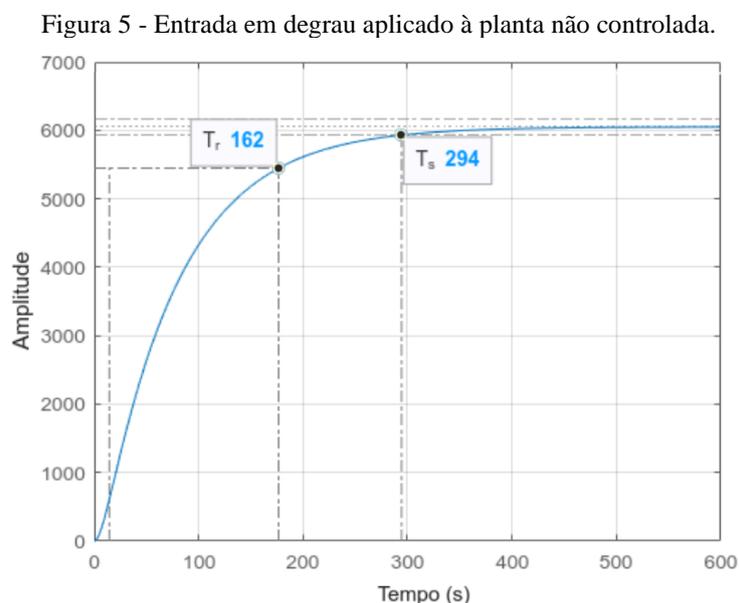
Para cada um desses testes, aplicou-se uma entrada em degrau e avaliou-se se o sistema controlado atendia aos critérios de desempenho. Os resultados foram representados graficamente no MATLAB, permitindo uma visualização do comportamento do sistema em cada cenário.

4. Resultados e Discussões

Após a modelagem do sistema, a função de transferência $G(s)$, apresentada na Equação (16), foi determinada considerando os mesmos valores de área do tanque e resistência das válvulas utilizados por Jardim (2019).

$$G(s) = \frac{10.63}{s^2 + 0.1421s + 0.001757} \quad (16)$$

As raízes de $G(s)$ são: -0,1284 e -0,1284, ou seja, pode-se afirmar que o sistema é estável. Após aplicar uma entrada em degrau na planta, foi possível obter que o tempo de subida T_r do sistema não controlado é, aproximadamente, 162 segundos e o tempo de acomodação T_s é cerca de 294 segundos (Tais tempos podem ser observados na Figura 5). Assim, foi possível determinar que o tempo de amostragem adequado para o problema é em torno de 27 segundos.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Com relação aos seis cenários de teste, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1, onde, para cada critério de desempenho, é apresentado o T_s obtido pelo sistema controlado e os ganhos ajustados do controlador PID.

Tabela 1 – Resultados para os cenários de testes.

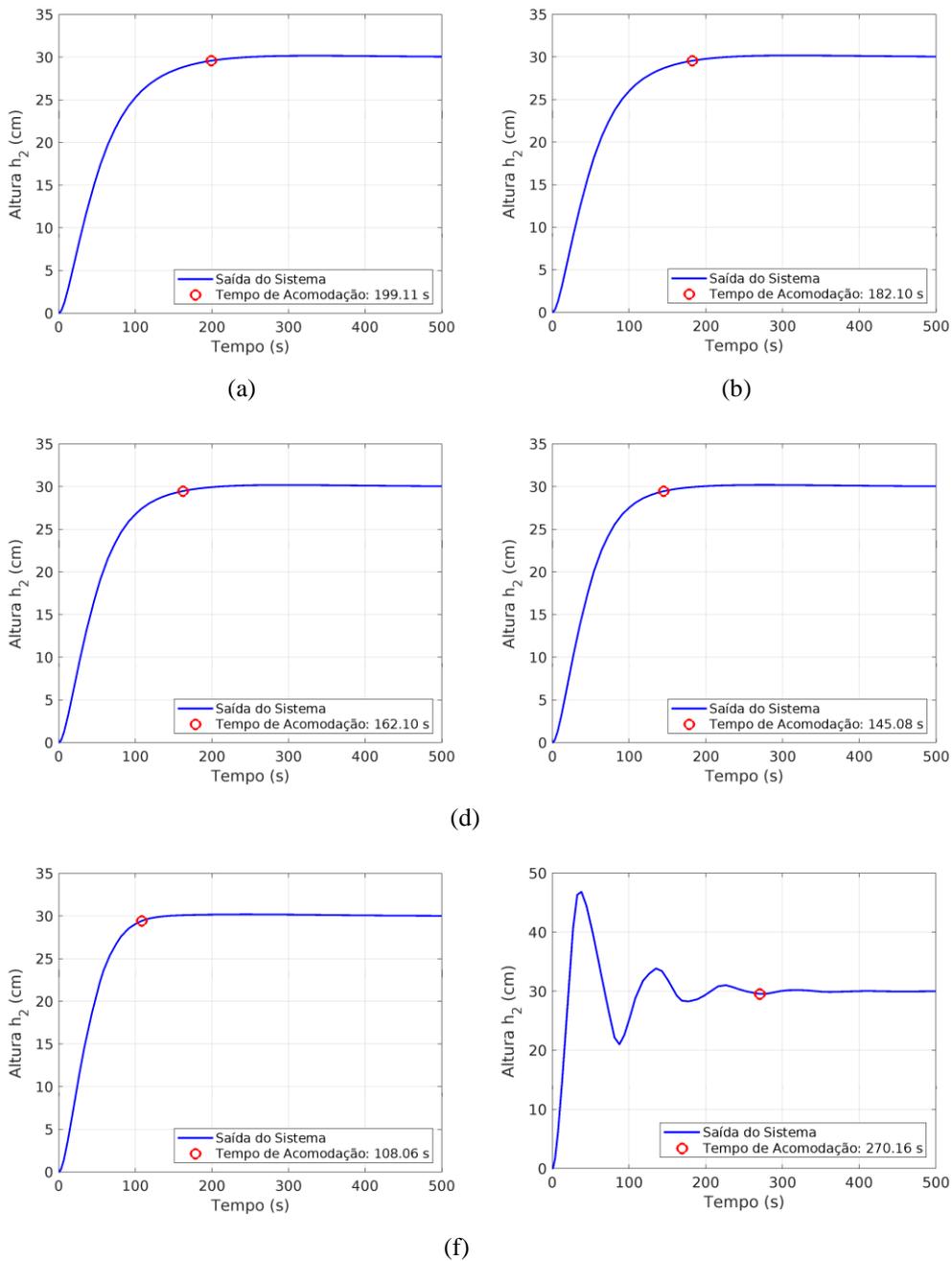
Critério de desempenho T_s	T_s (segundos)	K_p	K_i	K_d
(95% = 279,3s)	199,11	1,9134e-04	2,3659e-06	0,0013
(90% = 264,6s)	182,10	2,0197e-04	2,4973e-06	0,0014
(85% = 249,9s)	162,10	2,1385e-04	2,6442e-06	0,0015
(80% = 235,2s)	145,08	2,2722e-04	2,8095e-06	0,0016
(70% = 205,8s)	108,06	2,5968e-04	3,2108e-06	0,0018
(20% = 58,8s)	270,16	9,0888e-04	1,1238e-05	0,0064

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Já na Figura 6, são apresentados, graficamente, as curvas de saída do sistema controlado em azul. Além disso, em vermelho, é mostrado o tempo de acomodação obtido. Para todos os cinco primeiros cenários, é possível observar que o sistema atingiu todos os critérios de desempenho estabelecidos, não havendo sobressinal e obtendo um tempo de acomodação menor do que o exigido. Esses resultados validam a implementação do controlador PID para o sistema de nível do tanque de água.

Entretanto, para fins de ilustração, é possível observar na Figura 6 (e) que, para o critério de desempenho de 20%, o controlador não conseguiu cumprir com os critérios de desempenho, uma vez que há a presença de sobressinal (oscilações) e o tempo de acomodação foi maior do que o exigido.

Figura 6 - Entrada em degrau aplicado à planta controlada para cada cenário de teste.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

5. Conclusão

Neste trabalho, foi modelado o sistema e obtida sua função de transferência, possibilitando a identificação dos ganhos (K_p , K_i , e K_d) do controlador PID. O sistema de controle foi discretizado e testado com uma entrada em degrau, atendendo aos critérios de desempenho estabelecidos, como ultrapassagem percentual nula e tempos de acomodação reduzidos.

Foram realizados seis testes sucessivos, nos quais o tempo de acomodação foi progressivamente reduzido, garantindo uma resposta mais rápida e eficiente do sistema.

O controlador foi implementado com sucesso, permitindo o controle preciso do nível do tanque de água, validando a estratégia adotada.

Para trabalhos futuros, pretende-se aplicar o controle ao sistema físico, garantindo a transição da simulação para a implementação prática. Essa etapa permitirá avaliar o desempenho do controlador em condições reais e possíveis ajustes necessários para otimizar sua resposta.

Referências

ALVES, T. C. D. S.; SICA, Fernando Cortez. *O estado da arte dos sistemas de controle de reentrada dellagosna atmosfera para veículos aeroespaciais reutilizáveis.* In: *Paper presented 2023 12 Workshop em Engenharia e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.* 2023.

BARBOSA, Gabriel Nogueira; CARDOSO, Lucas Pimenta. *Desenvolvimento de uma bancada didática para as disciplinas de sistemas de controle com identificação de planta e projeto de controlador PID via simulação computacional.* 2020.

BHANDARI, Pujan; CSURCSIA, Péter Zoltán. *Digital implementation of the PID controller. Software Impacts, v. 13, p. 100306, 2022.*

BLANKE, M. et al. *Diagnosis and faulttolerant control. 2. ed. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2006.*

DELLAGOSTIN, Jonatan et al. *Acionamento e controle de movimentos de uma prótese mioelétrica de mão.* 2024.

DESYATIRIKOVA, Elena N. et al. *Selection of controller settings in digital control systems.* In: *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2019. p. 474-477.*

DORF, R. H. B. R. C. *“ModernControl Systems”.12. ed. [S.l.]: PRENTICE HALL, 2010.*

Drakulić, U. (2023). *Bilateral teleoperation for water tank level control using direct, PID, and Fuzzy Logic control methods. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1298, 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/1298/1/012023.*

GUELFÍ, Mateus Antonio et al. *Estudo comparativo entre variações de evolução diferencial para a sintonia de controladores pid. Revista Sinergia, v. 22, n. 1, 2020..*

HÄGGLUND, Tore; GUZMÁN, José Luis. *Give us PID controllers and we can control the world. IFAC-PapersOnLine, v. 58, n. 7, p. 103-108, 2024.*

JARDIM, Izaac Vieira. *Sistema didático de controle de nível em tanques acoplados. 2019. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Elétrica, Vitória, 2019.*

NISE, N. S. *Engenharia de sistemas de controle. 6. ed. São Paulo: LTC, 2012.*

QUEIROZ, Luiz Fernando Barbosa. *Modelagem e controle PID de sistema automotivo de suspensão ativa.* 2023.

RAPOSO, et al. *Battery Charger Based on Interleaved Three-Branch Converter with Model Predictive Control. In: 2024 International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE). IEEE, 2024. p. 1-6.*

TALER, Dawid et al. *Control of the temperature in the hot liquid tank by using a digital PID controller considering the random errors of the thermometer indications. Energy, v. 239, p. 122771, 2022.*

WAHLSTRÖM, Björn. *Differences between analog and digital I&C. In: Proceedings of the 9th International Conference on Nuclear Plant Instrumentation, Control & Human–Machine Interface Technologies (NPIC & HMIT 2015). 2015.*

ZHANG, Xianku; HONG, Haochen. *Design of ship course keeping controller based on zero-order holder and nonlinear modification. Chinese Journal of Ship Research, v. 19, n. 1, 2024.*