



IMPLEMENTAÇÃO DE UM HELICÓPTERO COMO PLATAFORMA DIDÁTICA PARA ESTUDO DE CONTROLE PID BASEADO EM HARDWARE

IMPLEMENTATION OF A HELICOPTER AS A DIDACTIC PLATFORM FOR STUDYING HARDWARE-BASED PID CONTROL

Rodrigo da Ponte Caun¹, Willian Ricardo Bispo Murbak Nunes², Gianluca Treuko Muronì³, Jean de Oliveira Alexandrini⁴, Francisco Barreto Neto⁵, Márcio Roberto Covacic⁶, Ruberlei Gaino⁷

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v44p371-393.2025

RESUMO: Os controladores automáticos industriais do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) são reconhecidamente uma estratégia eficaz para resolver problemas de controle em aplicações a sistemas dinâmicos complexos e a plantas industriais, especialmente quando há dificuldades no levantamento de modelos matemáticos precisos. Dada sua relevância no setor industrial, é crucial que os alunos de engenharia compreendam os fundamentos desses controladores na prática. No entanto, identifica-se uma carência de protótipos didáticos que explorem sistemas aéreos como plataforma para o ensino prático de controle. Para suprir essa necessidade, este estudo propõe o desenvolvimento de um módulo didático de um helicóptero de um grau de liberdade (1-DOF) com controle de voo utilizando PID baseado em *hardware*. O sistema dinâmico consiste em um motor *brushless* acoplado a uma hélice, que se move ao longo do eixo vertical. O desafio reside na realização física da malha de controle analógica, abrangendo o processamento de sinais provenientes de sensores, controladores e atuadores, a fim de posicionar a plataforma móvel em uma altura desejada. A estrutura eletrônica proposta oferece flexibilidade na implementação, pois permite diferentes combinações das ações de controle. Além disso, este trabalho incorpora uma perspectiva pedagógica ao propor uma metodologia de aprendizagem ativa de ensino, que permite aos alunos explorarem e compreenderem de forma prática os princípios fundamentais de sistemas de controle, enriquecendo a experiência educativa de forma contextualizada.

PALAVRAS-CHAVE: metodologia de aprendizagem ativa; aprendizagem com recursos didáticos; *hardware* de controle; processamento de sinais; práticas em engenharia.

ABSTRACT: Proportional-Integral-Derivative (PID) industrial automatic controllers are widely acknowledged as an effective solution for addressing control challenges in complex dynamic systems and aging industrial plants, particularly in scenarios where precise mathematical modeling is difficult to achieve. Given the critical role of these controllers in industrial applications, engineering students need to acquire a deep, practical understanding of their underlying principles. However, there is a lack of didactic prototypes that explore aerial systems as a platform for practical control education. To bridge this gap, this study proposes the development of a didactic module featuring a one-degree-of-freedom (1-DOF) helicopter with flight control implemented via hardware-based PID. The dynamic system consists of a brushless motor coupled to a propeller, moving along the vertical axis. The primary challenge lies in the physical realization of the analog control loop, which includes processing signals from sensors, controllers, and actuators to position the mobile platform at a desired altitude. The proposed electronic structure provides flexibility in implementation, allowing different combinations of control actions. Furthermore, this work incorporates a pedagogical perspective by proposing an active teaching methodology, that allows students to practically engage with and understand the core principles of control systems, thereby enhancing their educational experience in a meaningful and contextually relevant manner.

KEYWORDS: active methodology; project-based learning; control hardware; signal processing; engineering experimentation.

¹ Prof. Dr. na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), rodrigocaun@utfpr.edu.br

² Prof. Dr. na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), willianr@utfpr.edu.br

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), muroni@alunos.utfpr.edu.br

⁴ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), alexandrini@alunos.utfpr.edu.br

⁵ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), franciscobarretoneto@alunos.utfpr.edu.br

⁶ Prof. Dr. na Universidade Estadual de Londrina (UEL), marciocovacic@uel.br

⁷ Prof. Dr. na Universidade Estadual de Londrina (UEL), rgaino@uel.br



INTRODUÇÃO

Sistemas de controle desempenham um papel essencial na otimização de processos de produção, na garantia de qualidade e segurança, na automação e na operação eficiente de plantas industriais (Pinto, 2014). As aplicações de sistemas de controle estão em diversos setores industriais, como: manufatura (Wang e Lin, 2009; Leitao e Restivo, 2008), energia (Ringwood, Bacelli e Fusco, 2014; Khare, Nema e Baredar, 2016), transporte (Wai, Lee e Chuang, 2010), levitação magnética (Li *et al.*, 2023; Muñoz *et al.*, 2013), veículos elétricos e autônomos (Klerk e Saha, 2021; Lipu *et al.*, 2021; Parekh *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2020), saneamento e tratamento de água (Du, Yan e Qiao, 2020) entre outros.

Quando um sistema adota uma estratégia de controle na qual uma ação é aplicada diretamente, sem considerar o *feedback* das variáveis do processo, essa operação é denominada controle de malha aberta (Ogata, 2010). Nesse tipo de controle, os operadores consultam folhas de dados contendo curvas ou tabelas de calibração para realizar os ajustes necessários. Essa estratégia não permite ajustes automáticos em resposta a mudanças e perturbações, o que pode resultar em uma sobrecarga de trabalho do operador e em menor precisão no controle do processo (Waseem, 2024).

Por outro lado, a alternativa mais adequada é a implementação de um sistema de controle de malha fechada, no qual as ações de controle são ajustadas de forma contínua a partir da realimentação das variáveis do sistema, permitindo a correção automática de erros (Gómez, 2017). Nesse sentido, o aprendizado sobre sistemas de controle é fundamental na formação de engenheiros, pois capacita os futuros profissionais a projetarem e implementarem soluções eficazes para controle automatizado em diversos contextos industriais (Carvalho, Barone e Zaro, 2010).

Entretanto, o aprendizado dos fundamentos de análise e projeto de sistemas de controle ainda é um desafio para estudantes de engenharia, especialmente devido à complexidade e à abstração dos conceitos envolvidos (Neto *et al.*, 2023). A compreensão teórica desses sistemas muitas vezes não é suficiente para que os alunos dominem as técnicas de controle e a aplicação de conceitos, tal como o proporcional-integral-derivativo (PID), amplamente utilizado na indústria (Åström e Hägglund, 2001; Ziegler e Nichols, 1942).

Nesse contexto de dificuldade na assimilação dos conceitos de controle, estratégias pedagógicas que integram teoria e prática se tornam fundamentais, pois permitem aos estudantes vivenciarem a aplicação real dos modelos



matemáticos, experimentar o comportamento dinâmico dos sistemas e desenvolver competências experimentais. Diversos trabalhos ilustram essas abordagens, por exemplo:

- a) Khan *et al.* (2017) propuseram o uso de simulações de um quadricóptero em realidade virtual para explorar conceitos de modelagem e sintonia de controladores. Essa abordagem elimina riscos associados ao uso de drones reais e permite testes repetitivos em ambiente seguro, mas depende de infraestrutura computacional avançada e não proporciona o contato direto com *hardware* físico, o que pode limitar a aprendizagem de aspectos práticos como saturação de atuadores ou ruído de sensores.
- b) Odry *et al.* (2020) desenvolveram um sistema didático de robô auto balanceado equipado com motores de corrente contínua, empregando controle fuzzy. Essa solução permitiu aos estudantes explorar o comportamento dinâmico de sistemas instáveis e validar diferentes técnicas de controle, apresentando resultados positivos em engajamento e retenção do conhecimento. Entretanto, os autores destacam que a implementação exige conhecimento prévio de programação embarcada e cuidados na calibração do sistema.
- c) Souza *et al.* (2021) desenvolveram uma abordagem que integra o estudo teórico de circuitos RC com experimentação prática por meio da plataforma Arduino. Essa estratégia possibilitou que os estudantes observassem, em tempo real, a resposta de primeira ordem de circuitos resistivo-capacitivos, consolidando o entendimento de conceitos como constante de tempo e regime transitório. Observa-se, contudo, que a implementação de abordagens desse tipo pode envolver desafios logísticos, como a necessidade de disponibilidade de *kits* didáticos do experimento, além de conhecimentos prévios em programação.
- d) Neto *et al.* (2023) desenvolveram um protótipo de aeropêndulo destinado a estudantes com dificuldades na resolução de problemas práticos de controle. A plataforma permite abordar diversos aspectos de engenharia de controle, tais como: estratégias de identificação de sistemas; projeto e validação experimental de controladores clássicos por abordagens heurísticas e não heurísticas; comparação experimental de sistemas de controle de tipo 0 e tipo 1; análise de respostas subamortecidas e superamortecidas; e avaliação do comportamento de sistemas não lineares. Apesar dessas funcionalidades, o trabalho utiliza peças sem



recorrer à impressão 3D, o que compromete a replicação. Segundo os autores, os arquivos de simulação disponibilizados funcionam apenas como recursos auxiliares e não substituem a plataforma física, sendo a abordagem de ensino centrada no professor, que conduz as atividades e orienta os alunos na exploração do protótipo.

- e) Por fim, Normey-Rico e Morato (2024) propuseram uma abordagem dita inovadora para o ensino introdutório de controle de processos em cursos de engenharia, utilizando um sistema real de controle de velocidade de motor CC. O curso aborda os conceitos fundamentais de controle – incluindo P, PI e PID – sem exigir conhecimento avançado de matemática, com ênfase em análises no domínio do tempo e experimentação prática por meio de *kits* de baixo custo e simulador *open-source*. Segundo entrevistas com estudantes de 2016 a 2023, a metodologia aumentou a motivação e facilitou a compreensão dos conceitos, servindo como base para disciplinas subsequentes de controle. Apesar disso, o trabalho não apresenta relatos detalhados sobre as práticas didáticas adotadas nem discute perspectivas de metodologias centradas no aluno.

Em síntese, os estudos revisados reforçam que experiências práticas – sejam por meio de simulação imersiva ou protótipos físicos – promovem maior engajamento e aprendizagem significativa. Entretanto, as instituições de ensino ainda enfrentam um desafio significativo com o alto custo de aquisição de sistemas didáticos para compor laboratórios de engenharia. Consequentemente, a ausência de objetos de aprendizagem limita os estudantes a recursos práticos essenciais para a formação técnica e a compreensão aprofundada de conceitos teóricos. Assim, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de um helicóptero 1-DOF como uma estratégia para experiência prática de ensino dos fundamentos de sistemas de controle para estudantes de engenharia. Com base nessa proposta, os principais resultados esperados do projeto incluem:

- a) o desenvolvimento de um objeto de aprendizagem na forma de um helicóptero 1-DOF;
- b) um sistema de controle analógico em placa de circuito impresso, que pode ser aplicado para diversos contextos em teoria de controle utilizando PID;
- c) uma proposta didática construtivista de conhecimentos de sistemas de controle por meio de atividade prática experimental.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a seção seguinte, “fundamentação”, apresenta a fundamentação teórica sobre a técnica de controle PID e da proposta didática utilizada neste trabalho; a seção “materiais e métodos” mostra os materiais e métodos empregados para a montagem do helicóptero e da placa do controlador; a seção “resultados e discussões” contém os resultados experimentais de validação com o helicóptero, além da percepção discente sobre o uso do protótipo na aprendizagem da engenharia de controle. Por fim, as considerações finais do trabalho são apresentadas na seção “conclusões”.

FUNDAMENTAÇÃO

Esta seção apresenta, de forma articulada, os fundamentos do controle proporcional-integral-derivativo (PID) – técnica amplamente consolidada e aplicada em sistemas de controle – e a abordagem pedagógica baseada na sequência didática construtivista, que buscar fomentar experiências de aprendizagens significativas.

Controle proporcional-integral-derivativo

O controle PID, um método essencial na engenharia de controle, é constituído por três efeitos fundamentais: o proporcional, o integral e o derivativo. Os ganhos do controlador, conhecidos por K_p , K_i e K_d , desempenham funções distintas no comportamento transitório de sistemas dinâmicos. Ressalta-se que, neste trabalho, o processamento do sinal de erro pelas ações de controle ocorre de forma independente, logo as respostas individuais são combinadas por um circuito somador. A expressão matemática desta abordagem é bem conhecida na literatura, sendo obtida pela relação (Ogata, 2010):

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Para uma compreensão simplificada, o termo $K_p \times e(t)$ gera uma ação imediata proporcional ao erro instantâneo, reduzindo o tempo de subida e reagindo diretamente às discrepâncias entre referência e saída. A parcela $K_i \times \int_0^t e(\tau) d\tau$ corresponde a um histórico acumulado do erro ao longo do tempo e



tem como principal função eliminar o erro em regime permanente. No entanto, quando o erro muda de sinal – por exemplo, após atingir a referência – ocorre um processo de desaccumulação lento, em comparação a ação instantânea do proporcional, o que frequentemente provoca sobressinal pois o sinal de controle continua fornecendo uma ação corretiva mesmo após o sistema ter atingido o ponto desejado. Por fim, o termo $K_d \times \frac{de(t)}{dt}$ atua sobre a taxa de variação do erro, antecipando a tendência crescente do sinal $e(t)$ e atenuando oscilações, o que ajuda a reduzir o sobressinal provocado pela interação P-I (Li, Ang e Chong, 2006).

Em vista da proposta de implementação via *hardware* da malha de controle, a realização física do controlador PID tem sido baseado em amplificadores operacionais. Além disso, as constantes K_p , K_i e K_d são estabelecidas arbitrariamente devido a dois fatores: (a) o helicóptero 1-DOF apresenta valores mínimos e máximos distintos dos ganhos de controle PID, conforme a configuração utilizada; e (b) o processo de identificação é fortemente dependente da inclinação do sinal degrau de referência, que possui limitações práticas devido à operação do *driver* de potência do motor de elevação, em particular quando submetido a condições próximas às idealidades na descontinuidade do sinal.

Sequência didática construtivista

De acordo com Ausubel (1963; 1966; 1968), a aprendizagem significativa ocorre quando novos conhecimentos são ancorados em conceitos pré-existentes na estrutura cognitiva do aprendiz. No contexto do desenvolvimento de projetos em automação industrial, a construção e consolidação do conhecimento pelo próprio estudante ocorre por meio de atividades práticas promovendo, assim, uma compreensão mais profunda e duradoura.

Nesse cenário, o objeto de aprendizagem desenvolvido possibilita explorar o desenvolvimento de habilidades comportamentais, como colaboração, pensamento criativo e resolução de problemas reais por meio do projeto de controle de voo do helicóptero 1-DOF, além de estimular a experimentação prática dos conceitos teóricos de controladores PID. Assim, o professor atua como um facilitador, orientando e apoiando o aluno no processo de construção do conhecimento, permitindo que os alunos desenvolvam uma compreensão mais profunda e significativa dos conceitos (Vygotsky, 1978).

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada de acordo com uma sequência didática de abordagem construtivista, em consonância com o objetivo



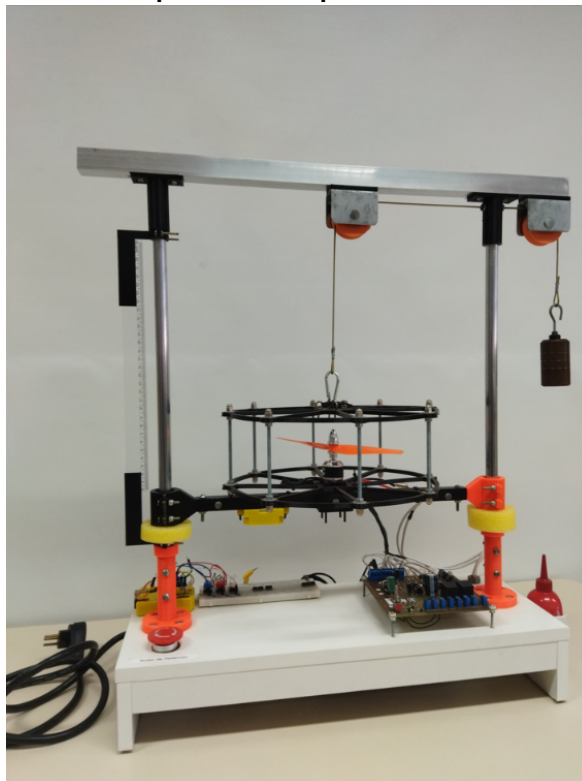
descrito no item c, que prevê a promoção do aprendizado de sistemas de controle por meio de atividades práticas experimentais, conforme segue:

1. inicialmente, o docente incentiva os estudantes a realizarem leituras e pesquisas sobre princípios do controle PID e aplicações a sistemas dinâmicos na indústria. Esse fato aproxima a proposta de atividade prática ao contexto industrial;
2. simulações computacionais são propostas objetivando a observação antecipada do comportamento dinâmico dos sinais de saída na presença do controlador PID e suas variantes;
3. após, sessões práticas em laboratório, utilizando o helicóptero 1-DOF de bancada, são realizadas por meio da implementação eletrônica de diferentes configurações do controle PID para validação prática do comportamento transitório do sistema. Nessa etapa, discussões guiadas permitem debater sobre desafios enfrentados, soluções propostas e resultados alcançados;
4. por fim, conclui-se sobre a aplicabilidade dos conhecimentos adquiridos em contextos industriais nas diversas áreas da engenharia.

MATERIAIS E MÉTODOS

O helicóptero 1-DOF é composto de uma hélice acoplada a um motor de elevação, posicionado no centro de uma plataforma móvel. Essa plataforma é guiada por dois rolamentos lineares que percorrem barras metálicas fixadas em um suporte, proporcionando um percurso linear. A visão real do protótipo, para operação de malha fechada, é detalhada na Figura 1.

Figura 1 – Protótipo do helicóptero 1-DOF de bancada



Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Na operação do protótipo são utilizados os seguintes dispositivos: (a) sensor de posição, através do módulo HC-SR04, que é composto por um emissor que emite um pulso ultrassônico ($f_e < 40$ kHz) e um receptor que recebe o pulso refletido, normalmente estes sinais são pulsos do tipo PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*); (b) driver de potência do tipo ESC (do inglês, *Electronic Speed Controller*) que opera por pulsos. Em termos práticos, um pulso de 1.0 ms desliga o motor, 1.5 ms o aciona à metade da velocidade e 2.0 ms proporciona a velocidade máxima (Silva *et al.*, 2023). Sendo assim, deve ser garantido um pulso mínimo para que o conjunto motor/hélice permaneça operante para as ações de controle; (c) atuador, responsável pelo deslocamento da plataforma móvel sendo composto por um motor do tipo *brushless*.

O modelo tridimensional do *hardware* de controle pode ser visualizado na Figura 2. A ilustração está subdividida em blocos de regulação e processamento de sinais, os quais serão detalhados a seguir:

- a) Amarelo: chave comutadora de conexão para a partida do sistema de controle;
- b) Azul: circuito de partida suave do sinal de referência;

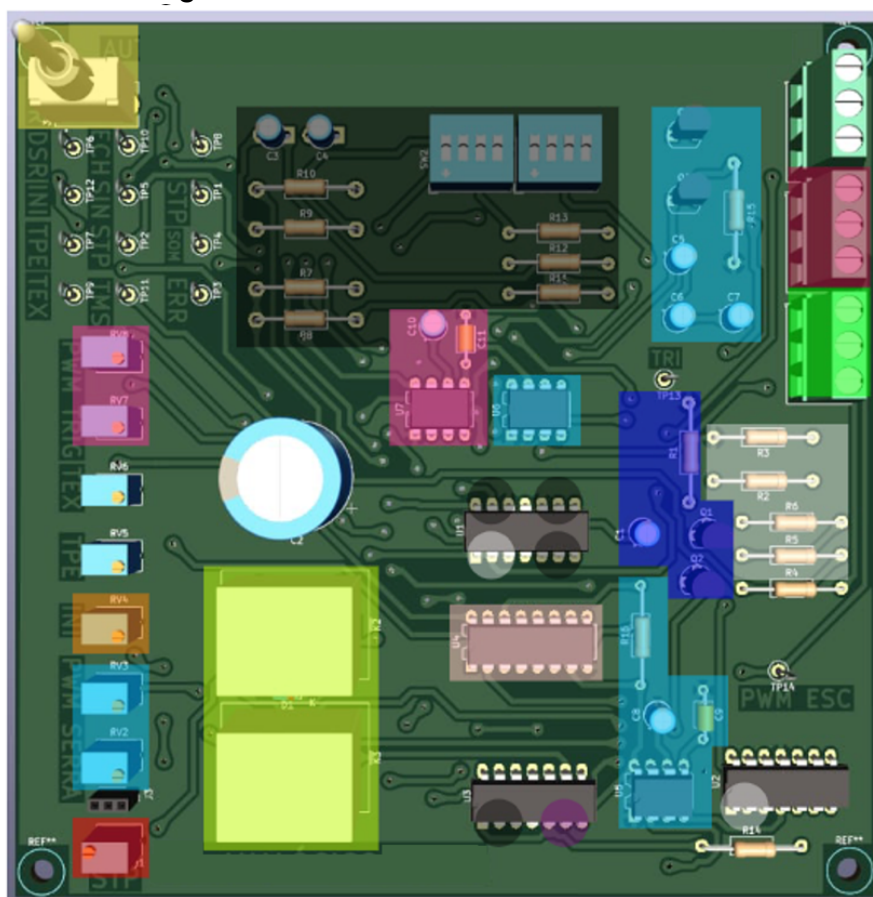
- c) Branco: buffer de isolamento e circuito subtrator;
- d) Ciano: geração e condicionamento do sinal dente de serra do tipo crescente;
- e) Laranja: resistor variável de ajuste do pulso de inicialização do ESC;
- f) Magenta: saída do sinal trigger e para o sensor de posição;
- g) Preto: circuito eletrônico de implementação dos ganhos do controlador PID;
- h) Rosa: desacoplamento e condicionamento do sinal PWM do sensor de posição e do ESC;
- i) Violeta: circuito comparador entre os sinais modulante e portadora de baixa frequência, para a geração do sinal PWM do ESC;
- j) Verde: sinais de tensões elétricas de alimentação dos circuitos eletrônicos;
- k) Vinho: sinais de tensões elétricas de saída para o ESC e o trigger do sensor ultrassônico, bem como a entrada do seu sinal "echo";
- l) Verde limão: relés de comutação dos sinais de referência;
- m) Vermelho: resistor variável de ajuste do *setpoint*

O esquema eletroeletrônico do *hardware* desenvolvido está contido na Figura 3. A partir dessa figura, pode-se identificar o fluxo de sinais no ensaio prático da malha de controle:

1. na inicialização, o pulso do ESC deve operar no intervalo de 1 a 1,1 ms. Esse sinal é gerado a partir de uma chave de dois estados controlada por um relé. Logo, a detecção desse sinal é percebida por um sinal sonoro do motor (emissão de um "bip"). No caso do *setpoint*, este é definido pelo usuário por meio da escolha de uma tensão elétrica entre 0,7 e 1,67 V, compreendendo uma altura de 9,1 (repouso) a 21,71 cm;
2. em seguida, o sensor ultrassônico recebe o sinal de *trigger* (TRIG), isto é, um sinal PWM gerado por intermédio do circuito integrado (CI) 555 com período de 1,5 ms, o qual retorna um sinal pulsado no pino "ECHO" referente ao receptor ultrassônico;
3. este sinal é condicionado por um filtro passivo RC de 1ª ordem, que o ajusta a um sinal de corrente contínua (CC);

4. o sinal CC é subtraído do sinal de *setpoint*, que representa um sinal degrau com inclinação ajustável de referência da altura desejada;
5. o sinal de erro é processado pelo circuito do controlador PID, conforme ação de controle selecionada pelo estudante;
6. o sinal de controle (modulante) é, então, comparado com um sinal dente de serra (portadora), produzindo o sinal PWM com razão cíclica dentro da faixa de operação do ESC.

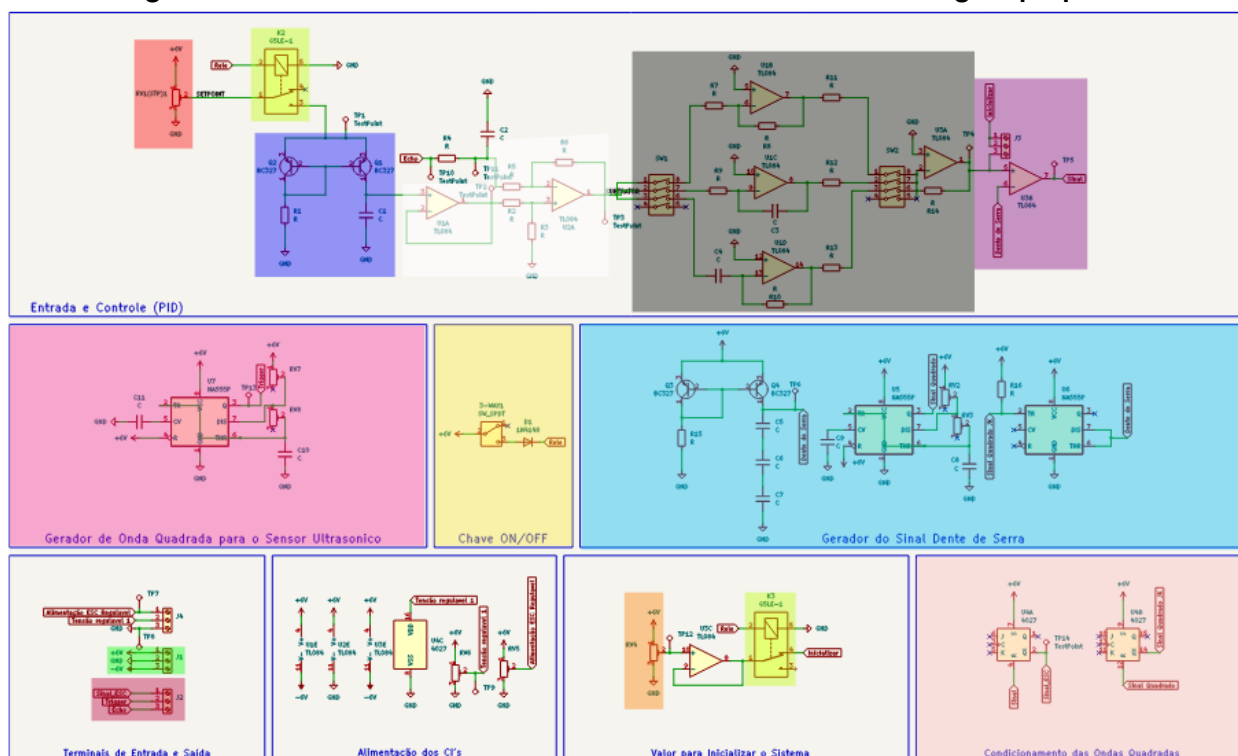
Figura 2 – Hardware do sistema de controle



Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Observação: para melhorar a qualidade dos sinais PWM e dente de serra gerados eletronicamente, utilizou-se flip-flops do tipo JK e um espelho de corrente em série com capacitores, respectivamente.

Figura 3 – Circuito eletroeletrônico do sistema de controle analógico proposto



Fonte: elaborada pelos autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

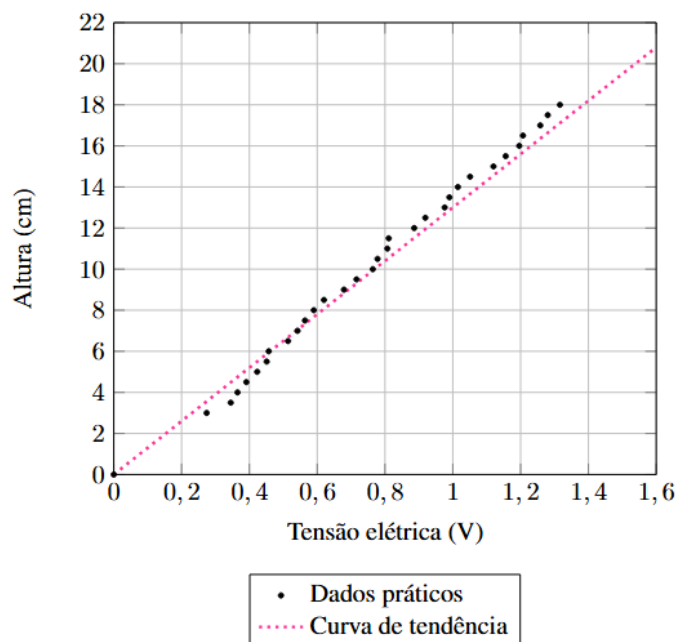
Nesta seção, serão abordados testes práticos de validação do *hardware* de controle. Para tanto, serão consideradas a identificação do sistema e a avaliação de uma implementação de controle do tipo PD.

Identificação do sistema por ação de controle proporcional

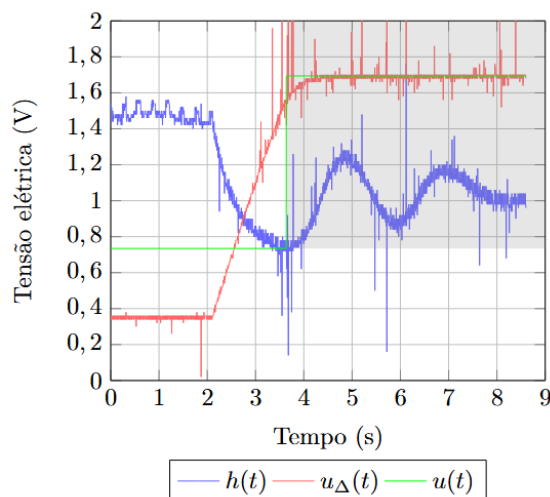
A viabilidade matemática de projetos de controladores do helicóptero 1-DOF está associada à obtenção das funções de transferência do transdutor e da dinâmica do protótipo. Para tanto, a Figura 4 ilustra a curva de tensão elétrica versus altura do sensor ultrassônico.

A reta que melhor ajusta os pontos é dada por $a(t) \approx 13 \times v(t)$, com $a(t)$ e $v(t)$ a variação da altura e da tensão elétrica do transdutor, respectivamente. Para essa curva, os maiores desvios em relação aos dados práticos têm sido de 0,0758 e -0,0736, cujos erros quadráticos são de 0,0057 e 0,0054. Logo, pode-se identificar que a função de transferência do transdutor é dada por $H(s) = \frac{V(s)}{A(s)} \approx 0,077$. Para a identificação do sistema, considere a Figura 5.

Figura 4 – Dados práticos da relação entrada-saída do sensor de posição



Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Figura 5 – Resposta temporal do sensor de ultrassom sob ação do controlador proporcional $K_p = 3,6$ 

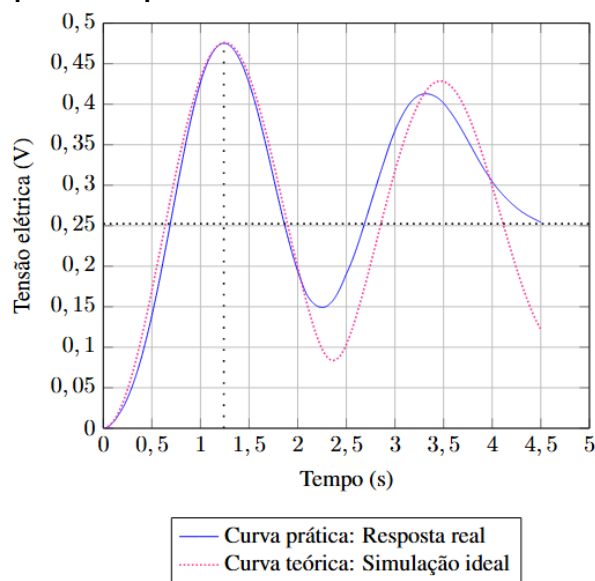
Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Observação: o sensor apresenta um *offset* de **0,7346 V**, e a aceleração do motor da hélice deve apresentar uma partida suave em rampa, pois variações severas acionam seu modo de proteção, que, por sua vez, torna-o inativo para uma operação segura. Assim, após o término do tempo de subida da rampa, o protótipo inicia a resposta

Na Figura 5, tem-se que $h(t)$ representa o sinal real de elevação do helicóptero 1-DOF, $u_d(t)$ representa o sinal degrau real de referência cuja inclinação crescente é ajustável no protótipo e, por fim, $u(t)$ representa o sinal degrau ideal.

Para melhorar a precisão dos dados, um filtro digital tem sido utilizado para remover as irregularidades dos sinais (ruídos) captados pelo osciloscópio, resultando no sinal de linha contínua azul da Figura 6.

Figura 6 – Resposta temporal filtrada do transdutor de altura da Figura 5



Fonte: elaborada pelos autores (2025).

A partir dessa curva, pode-se definir alguns parâmetros transitórios de sistemas de 2ª ordem, como $t_{pico} = 1,24$ segundos, sobressinal de **0,2228 V** e regime permanente de **0,2524 V**, que resulta no máximo sobressinal de $M_{ss\%} = 88,27\%$. A partir desses índices, define-se ξ e ω_n por:

$$\begin{aligned}
 \xi &= \frac{-\ln(M_{ss})}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(M_{ss})}} \\
 &= \frac{-\ln(0,8827)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(0,8827)}} \\
 &= 0,0397
 \end{aligned} \tag{2}$$



$$\begin{aligned}
 t_{pico} &= \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \Rightarrow \\
 \Rightarrow \omega_n &= \frac{\pi}{t_{pico} \sqrt{1 - \xi^2}} \\
 &= \frac{\pi}{1,24 \sqrt{1 - 0,0397^2}} \\
 &= 2,5355
 \end{aligned} \tag{3}$$

Logo, pode-se obter a função de transferência de malha fechada, $F(s)$, por:

$$\begin{aligned}
 F(s) &= \frac{K' \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \\
 &= \frac{6,4288 \times K'}{s^2 + 0,2013s + 6,4288}
 \end{aligned} \tag{4}$$

sendo K' o ganho CC do sistema. Esse parâmetro pode ser obtido por meio da equação do erro, dada por:

$$\begin{aligned}
 e(+\infty) &= |1 - F(0)| \times (1,6939 - 0,7346) \\
 F(0) &= 1 - \frac{0,9593 - 0,2524}{0,9593} \\
 K' &= 0,2631
 \end{aligned} \tag{5}$$

A partir da equação de malha fechada, pode-se obter a função de transferência de malha aberta, $G(s)$, por:

$$\begin{aligned}
 F(s) &= \frac{K_p G(s)}{1 + K_p G(s) H(s)} \Rightarrow \\
 \Rightarrow G(s) &= \frac{F(s)/K_p}{1 - F(s)H(s)} \\
 &= \frac{\frac{K'}{K_p} \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2 [1 - K' H(s)]} \\
 &= \frac{0,4698}{s^2 + 0,2013s + 6,299}
 \end{aligned} \tag{6}$$

A partir do modelo matemático, objetiva-se: (a) obter um simulador de análise dinâmica da altura do helicóptero 1-DOF, conforme apresenta a Figura 7; e (b) implementar um controlador do tipo PD para melhorar a resposta transitória do sistema, cujos polos de malha fechada com realimentação unitária negativa



encontram-se em $-0,1007 \mp j2,5998$. Logo, tem-se que $\xi' = 0,0387$ e $\omega' = 2,6017$, do qual resulta em um comportamento transitório com sobressinal de **88,54%** e tempo de estabelecimento de **38,734** segundos (critério **2%**).

A resposta proporcional do helicóptero 1-DOF com $K = 3,6$ (ganho mínimo necessária para o voo), obtida pela diagramação gráfica de blocos da Figura 7, está ilustrada na linha tracejada vermelha da Figura 6.

Destaca-se, aqui, a alta fidelidade da resposta dinâmica até **2,1** segundos, validando a função de transferência da equação (6). Após esse instante de tempo, um complexo conjunto de sinais de atuação no motor *brushless* tem sido simplificado a um saturador na saída dos controladores (i.e., bloco rosa da Figura 7). Logo, a dinâmica de acionamento do atuador tem inferido as diferenças transitórias entre os sinais prático/teórico do sensor de altura, bem como outros efeitos mecânicos do protótipo.

Implementação prática de uma estratégia de controle do tipo PD

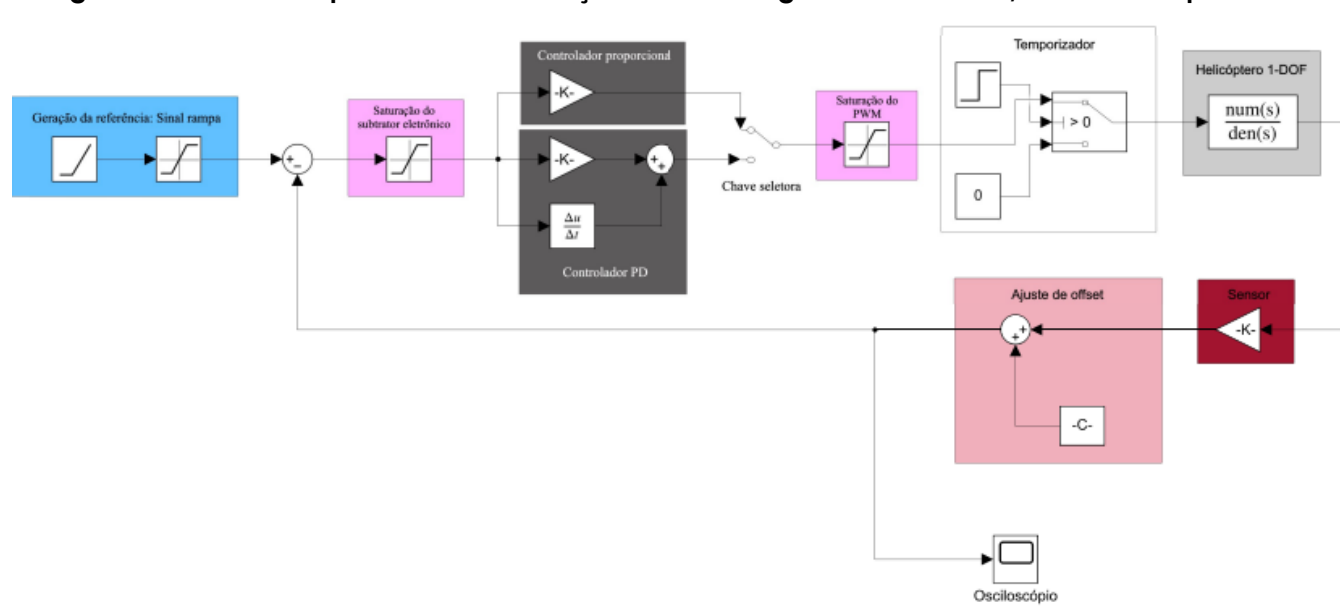
Um último teste de operação para o *hardware* de controle desenvolvido tem sido a implementação de uma estratégia de controle proporcional-derivativa. Logo, essa proposta tem sido mais desafiadora, devido à dificuldade de seleção dos componentes eletrônicos para a realização física do ganho derivativo e do ajuste dos ganhos mínimos para a operação do protótipo, fato que motivou um método arbitrário de escolha dos ganhos para fins de validação do modelo teórico.

Dessa forma, tem sido escolhido o par de ganhos $K_P = 7,5$ e $K_D = 1$, implementados por meio dos componentes:

$$K_P = \frac{R_{P2}}{R_{P1}} = \frac{75k}{10k} = 7,5 \text{ e } K_D = C_D \times R_D = 100\mu \times 10k = 1 \quad (7)$$

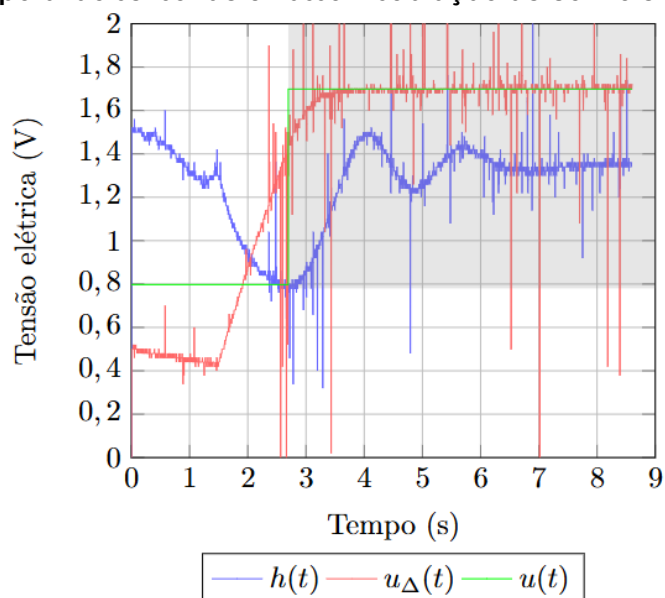
Logo, a Figura 8 ilustra o comportamento temporal prático da resposta ao degrau de amplitude **0,9014V** (valor desejado de $\approx$ **11,7** cm de altura).

Figura 7 – Modelo simplificado de simulação das estratégias de controle P/PD do helicóptero



Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Figura 8 – Resposta temporal do sensor de ultrassom sob ação de controle proporcional-derivativa



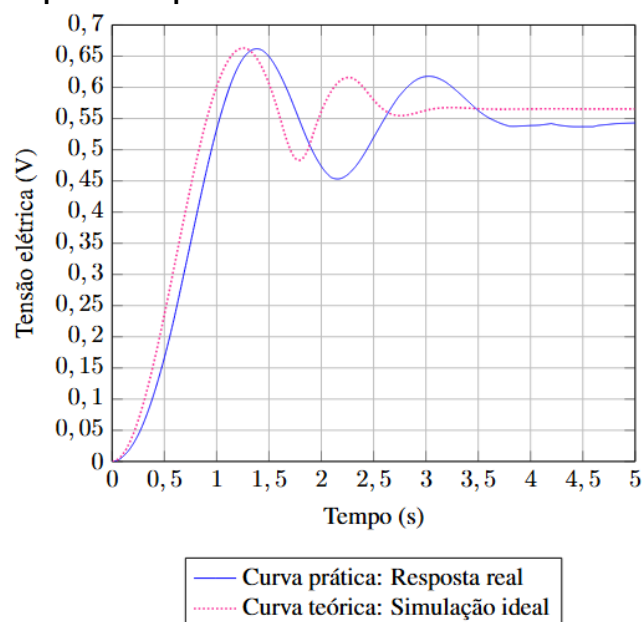
Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Por outro lado, a Figura 9 contém o sinal filtrado e ajustado à amplitude do sinal de entrada, excluindo a parcela de *offset* de **0,7974 V**.

Evidencia-se que, assim como tem ocorrido na implementação proporcional de controle, há uma fidelidade entre as curvas teóricas e práticas, embora sob a influência de uma compressão temporal em relação aos dados práticos, fato que

ressalta dinâmicas não modeladas do processo de acionamento do motor *brushless*. Além disso, pode-se afirmar que os objetivos foram atingidos à medida que houve a validação do *hardware* de controle e da implementação do controle PD no aperfeiçoamento da resposta transitória do protótipo, que apresentou um tempo de estabelecimento de **3,5720** segundos (critério 2%) e sobressinal de **22,87%**.

Figura 9 – Resposta temporal filtrada do transdutor de altura da Figura 8



Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Perspectivas pedagógicas

Esta seção apresenta o instrumento elaborado para uso dos estudantes como um recurso de retroação docente, no qual o instrumento avalia a qualidade da plataforma sob estudo, medidas pelo questionário contendo 10 itens objetivos, conforme Quadro 1.



Quadro 1 – Instrumento de pesquisa de avaliação da plataforma didática

Seção	Ind.	Guia Orientativo
Conceitual	1	Como você avalia o protótipo do helicóptero 1-DOF para aplicações em controle PID analógico?
	2	O protótipo ajudou a melhorar sua compreensão sobre controle PID?
	3	O protótipo ajudou a melhorar sua compreensão sobre respostas transitórias de sistemas dinâmicos?
	4	O uso do protótipo facilitou sua participação e engajamento na disciplina?
Aprendizagem	5	Em que medida o uso do protótipo contribuiu para o seu aprendizado prático?
	6	Você se sente mais preparado para aplicar conceitos de controle PID em situações práticas após utilizar o protótipo?
	7	O protótipo foi útil para compreender melhor a relação entre teoria e prática?
Pedagógica	8	Como você avalia a metodologia de aprendizagem ativa aplicada com o uso do protótipo?
	9	Você recomendaria o uso do protótipo para outras disciplinas do curso?
	10	Há algo que você mudaria no protótipo ou na forma como ele foi utilizado em atividades práticas?

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Os dados da pesquisa realizada com os estudantes do 5º período do curso de Engenharia Elétrica da UTFPR – campus Apucarana, aplicada no 1º semestre letivo de 2024, totalizam um universo de 11 participantes e estão compilados na Tabela 1. Este questionário teve como objetivo coletar informações sobre a experiência discente com o uso do protótipo de helicóptero 1-DOF na implementação de controladores analógicos, na disciplina de Sistemas de Controle 1. Logo, busca-se entender como o uso do protótipo contribuiu para o aprendizado prático, para a compreensão teórica e para o engajamento na disciplina, visando aperfeiçoar o processo de ensino-aprendizagem em futuras turmas. Para a coleta dos dados, utilizou-se uma escala do tipo Likert, a qual permite quantificar o grau de concordância ou discordância dos estudantes em relação às afirmações propostas, facilitando a análise estatística das respostas e possibilitando identificar tendências de percepção do grupo quanto ao impacto pedagógico do protótipo no processo de aprendizagem. Ressalta-se que o questionário é anônimo, assegurando a preservação de identidade dos participantes.



Tabela 1 – Instrumento de pesquisa de avaliação da plataforma didática

Indicador	Peso	Classificação	Freq.	%
1	5	Muito Satisfeito	5	45,45
	4	Satisfeito	5	45,45
	3	Neutro	1	9,10
2	5	Muito Satisfeito	6	54,54
	4	Satisfeito	4	36,36
	3	Neutro	1	9,10
3	5	Muito Satisfeito	6	54,55
	4	Satisfeito	5	45,45
4	5	Muito Satisfeito	11	100,00
5	5	Muito Satisfeito	10	90,90
	4	Satisfeito	1	9,10
6	5	Muito Satisfeito	4	36,36
	4	Satisfeito	5	45,45
	3	Neutro	2	18,19
7	5	Muito Satisfeito	6	54,55
	4	Satisfeito	5	45,45
8	5	Muito Satisfeito	3	27,27
	4	Satisfeito	6	54,54
	2	Insatisfeito	2	18,19
9	5	Muito Satisfeito	6	54,55
	4	Satisfeito	3	27,27
	3	Neutro	1	9,09
	2	Insatisfeito	1	9,09
		Média Ponderada	4,46	

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

A análise dos dados revela uma percepção amplamente positiva dos discentes em relação ao protótipo do helicóptero 1-DOF para aplicações de controladores PID analógicos. A maioria dos alunos (**90,90%**) mostrou-se satisfeita ou muito satisfeita com a experiência, sugerindo que o protótipo atendeu às expectativas ao oferecer uma base prática para o aprendizado. Não houve registros de insatisfação, reforçando a eficácia da ferramenta.

A contribuição do protótipo para a compreensão de conceitos fundamentais como controle PID e respostas transitórias foi clara, com mais de **90,90%** dos discentes afirmando que ele melhorou significativamente sua compreensão. Este dado reforça o valor pedagógico de utilizar plataformas didáticas para tornar conceitos teóricos mais tangíveis.

Outro ponto de destaque foi o engajamento total dos alunos, com **100%** dos respondentes afirmando que o uso do protótipo aumentou sua participação nas



atividades da disciplina. Esse dado ressalta que a interação prática gera maior envolvimento, motivação e pré-disposição ao aprendizado.

No entanto, **18,19%** dos alunos demonstrou neutralidade ao avaliar sua preparação para aplicar o controle PID em cenários práticos reais, indicando a necessidade de explorar mais os contextos industriais.

A metodologia de aprendizagem ativa utilizada com o protótipo foi bem recebida pela maioria, embora **18,19%** tenham demonstrado insatisfação. Isso sugere que ajustes na implementação dessa metodologia poderia aumentar ainda mais sua eficácia. Por fim, **81,82%** dos alunos recomendaram o uso do protótipo em outras disciplinas, reforçando sua importância no processo ensino-aprendizagem.

Além disso, a média ponderada geral das respostas, considerando as frequências e os pesos atribuídos, é de aproximadamente 4,46. Isso indica que, em uma escala de 1 a 5, a percepção geral dos discentes sobre o protótipo do helicóptero 1-DOF para aplicações de controladores PID analógicos é bastante positiva, tendendo a uma alta satisfação e à concordância com os benefícios da plataforma didática.

Por fim, há espaço para melhorias, especialmente no que tange à qualidade do *hardware* de controle, pois têm sido relatados alguns problemas técnicos causados por mau contato. Essas mudanças, juntamente com a sugestão de usar dados práticos obtidos pelo sistema para exercícios em sala de aula, são indicativos que poderiam melhorar a clareza e a eficiência do aprendizado com o protótipo, conforme comentários deixados no item 10 do instrumento de pesquisa.

CONCLUSÕES

Em conclusão, o desenvolvimento e implementação do protótipo de helicóptero 1-DOF com controle PID analógico se mostrou uma solução eficaz para o ensino prático de sistemas de controle em engenharia. Os testes experimentais validaram as funções de transferência e a dinâmica do protótipo, evidenciado pela fidelidade entre o modelo teórico idealizado e o comportamento prático, especialmente em relação à resposta transitória do sistema. O controlador PD aprimorou de forma significativa essa resposta, reduzindo o tempo de estabelecimento e o sobressinal, o que comprova a versatilidade do hardware de controle proposto.



Do ponto de vista pedagógico, o protótipo não apenas facilitou a compreensão teórica de conceitos, como controle PID e respostas transitórias, mas também aumentou o engajamento e a participação dos estudantes. A elevada taxa de satisfação, com mais de 90% dos alunos relatando melhorias na compreensão dos conceitos, e a recomendação de uso do protótipo em outras disciplinas destacam seu valor como ferramenta didática. Contudo, foram identificadas oportunidades de melhoria, como a necessidade de aperfeiçoamento da placa de circuito impresso, que apresentou pequenos problemas técnicos, e a maior proximidade dos conceitos em contextos industriais. A inclusão de dados práticos nas atividades em sala de aula é uma recomendação que pode fortalecer ainda mais a eficácia do protótipo como recurso didático, contribuindo para uma formação técnica mais sólida e para o preparo dos estudantes no enfrentamento dos desafios da indústria moderna, visto que a aprendizagem dos conceitos de controle PID, seja por meio de controladores analógicos ou digitais, conduz à mesma compreensão dos princípios aplicados na indústria, onde essa técnica é amplamente adotada no controle de processos.

REFERÊNCIAS

- ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. The future of PID control. **Control Engineering Practice**, Elsevier, v. 9, n. 11, p. 1163-1175, 2001.
- AUSUBEL, D. P. **The psychology of meaningful verbal learning**. Oxford: Grune & Stratton, 1963.
- AUSUBEL, D. P. Early versus delayed review in meaningful learning. **Psychology in the Schools**, v. 3, n. 3, p. 195-198, 1966.
- AUSUBEL, D. P. **Educational psychology: a cognitive view**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1968.
- CARVALHO, A. S.; BARONE, D. A. C.; ZARO, M. A. A aprendizagem significativa no ensino de engenharia de controle e automação. **Revista Novas Tecnologias na Educação**, v. 8, n. 3, 2010.
- DU, S.; YAN, Q.; QIAO, J. Event-triggered PID control for wastewater treatment plants. **Journal of Water Process Engineering**, v. 38, p. 101659, 2020.
- GOMÉZ, P. M. **Design of PID Controllers for Uncertain Plants**. Tese (Doutorado) – Universidad de Murcia, Murcia, 2017.
- KHAN, S. *et al.* Teaching tool for a control systems laboratory using a quadrotor as a plant in MATLAB. **IEEE Transactions on Education**, IEEE, v. 60, n. 4, p. 249-256, 2017.
- KHARE, V.; NEMA, S.; BAREDAR, P. Solar–wind hybrid renewable energy system: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 58, p. 23-33, 2016.

- KLERK, M. L. D.; SAHA, A. K. A comprehensive review of advanced traction motor control techniques suitable for electric vehicle applications. **IEEE Access**, IEEE, v. 9, p. 125080-125108, 2021.
- LEITAO, P.; RESTIVO, F. J. Implementation of a holonic control system in a flexible manufacturing system. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)**, IEEE, v. 38, n. 5, p. 699-709, 2008.
- LI, F. *et al.* Control methods for levitation system of EMS-type maglev vehicles: An overview. **Energies**, MDPI, v. 16, n. 7, 2023.
- LI, Y.; ANG, K. H.; CHONG, G. C. Y. Pid control system analysis and design. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 26, n. 1, p. 32-41, 2006.
- LIPU, M. H. *et al.* Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 292, p. 126044, 2021.
- MUÑOZ, J. C. *et al.* Comparison of dynamic control strategies for transit operations. **Transportation Research, Part C: Emerging Technologies**, Elsevier, v. 28, p. 101-113, 2013.
- NETO, R. C. *et al.* An aeropendulum-based didactic platform for the learning of control engineering. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Springer, v. 34, n. 3, p. 566-577, 2023.
- NORMEY-RICO, J. E.; MORATO, M. M. Teaching control with basic maths: introduction to process control course as a novel educational approach for undergraduate engineering programs. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Springer, v. 35, n. 1, p. 41-63, 2024.
- ODRY, Á. *et al.* Fuzzy control of self-balancing robots: A control laboratory project. **Computer Applications in Engineering Education**, Wiley, v. 28, n. 3, p. 512-535, 2020.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010.
- PAREKH, D. *et al.* A review on autonomous vehicles: Progress, methods and challenges. **Electronics**, MDPI, v. 11, n. 14, 2022.
- PINTO, J. E. M. G. **Aplicação prática do método de sintonia de controladores PID utilizando o método do relé com histerese**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- RINGWOOD, J. V.; BACELLI, G.; FUSCO, F. Energy-maximizing control of wave-energy converters: The development of control system technology to optimize their operation. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 34, n. 5, p. 30-55, 2014.
- SILVA, L. G. *et al.* Projeto e implementação de um sistema de controle robusto com um grau de liberdade. **Anais... XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**. [S.l.]: s.n., 2023.
- SOUZA, L. G. de. *et al.* O uso do arduino para o estudo de circuitos do tipo RC. **Conexões - Ciência e Tecnologia**, v. 15, 2021.
- VALLIM, M. B. R. **Em direção à melhoria do ensino na área tecnológica: a experiência de uma disciplina de introdução à engenharia de controle e automação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2000.
- VYGOTSKY, L. S. **Mind in society: The development of higher psychological processes**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978.



- WAI, R.-J.; LEE, J.-D.; CHUANG, K.-L. Real-time pid control strategy for maglev transportation system via particle swarm optimization. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 58, n. 2, p. 629-646, 2010.
- WANG, J. *et al.* Safety of autonomous vehicles. **Journal of Advanced Transportation**, Wiley, v. 2020, article ID 8867757, n. 1, 2020.
- WANG, L.-C.; LIN, S.-K. A multi-agent based agile manufacturing planning and control system. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 57, n. 2, p. 620-640, 2009.
- WASEEM, U. **Process Control: A Comprehensive Guide to Implementation and Understanding in Industrial Systems**. 2024. Disponível em: <https://www.wevolver.com/article/understanding-process-control-an-important-technique-for-industrial-processes>. Acesso em: 18 set. 2025.
- ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. **Transactions of the American Society of Mechanical Engineers**, American Society of Mechanical Engineers, v. 64, n. 8, p. 759-765, 1942.