



Projeto e implementação de um sistema de controle robusto com um grau de liberdade

Project and implementation of a robust control system with one degree of freedom

Leonardo Gomes da Silva¹, Rodrigo da Ponte Caun²,
Willian Ricardo Bispo Murbak Nunes³, Thales Eugenio Portes de Almeida⁴,
Flávio Luiz Rossini⁵

RESUMO

Este trabalho propõe uma abordagem educacional que integra experiências práticas ao aprendizado teórico, visando estimular o potencial criativo dos alunos na área de engenharia. A proposta é baseada no controle de voo de um helicóptero com um grau de liberdade e, portanto, o protótipo oferece uma plataforma didática para compreender o funcionamento de sistemas dinâmicos, permitindo aos alunos ajustar parâmetros e observar os resultados. A prática pedagógica permite explorar técnicas de controle a tempo discreto e contínuo no tempo, podendo ser utilizados modelos matemáticos por representações em funções de transferência ou espaço de estados. Nossos resultados experimentais exploram uma aplicação de controladores PID discretos aplicados à planta.

PALAVRAS-CHAVE: Helicóptero 1-DOF; PID; plataforma didática.

ABSTRACT

This work proposes an educational approach that integrates practical experiences with theoretical learning, aiming to stimulate the creative potential of students in the area of engineering. The proposal is based on the flight control of a helicopter with one degree of freedom and, therefore, the prototype offers a teaching platform to understand the functioning of dynamic systems, allowing students to adjust parameters and observe the results. The pedagogical practice allows the exploration of discrete-time and continuous-time control techniques, and mathematical models can be used through representations in transfer functions or state space. Our experimental results explore an application of discrete PID controllers applied to the plant.

KEYWORDS: 1-DOF helicopter; PID; educational platform.

INTRODUÇÃO

A abordagem educacional contemporânea tem impulsionado a busca por métodos que contemplem a integração de experiências práticas juntamente ao processo de aprendizagem de conceitos

¹ Voluntário do Programa Institucional de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: lsilva.2017@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6648189208359892.

² Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil E-mail: rodrigocaun@utfpr.edu.br. ID Lattes: 3945379729001649.

³ Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil E-mail: willianr@utfpr.edu.br. ID Lattes: 4889618956920630.

⁴ Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil E-mail: thalesalmeida@utfpr.edu.br. ID Lattes: 3975097763171890.

⁵ Docente no Curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil E-mail: flrossini@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8616413126997528.



teóricos. Esse enfoque é uma resposta ao reconhecimento de que o antigo modelo de ensino de engenharia, embora tenha sido gradativamente superado com ferramentas de simulação e aulas laboratoriais, muitas vezes direciona a compreensão do conteúdo de maneira restrita, não desafiando e estimulando o potencial criativo dos alunos (LOBATO et al., 2017).

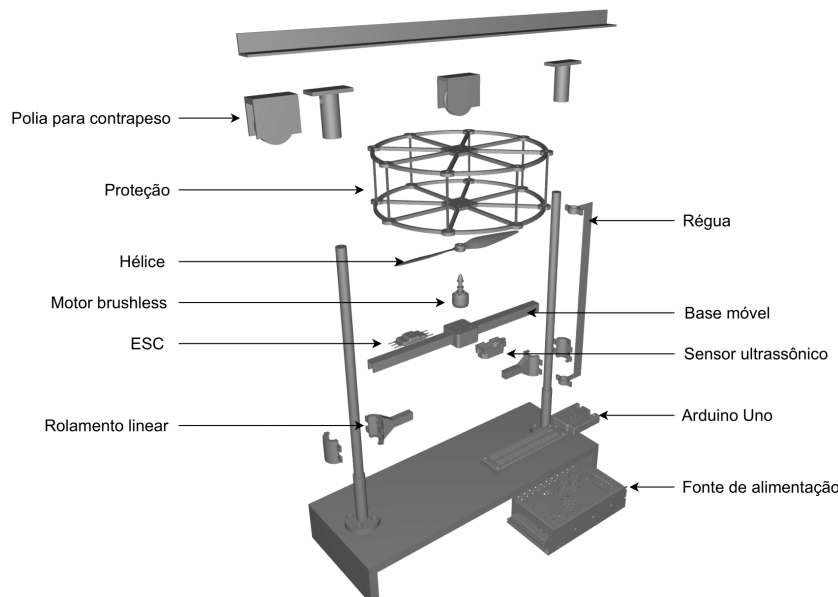
Diante destes desafios, esta proposta de trabalho objetiva o desenvolvimento de estratégias pedagógicas que não apenas transmitam informações, mas também habilitem os discentes a promoverem o pensamento crítico mediante a utilização de sistema dinâmicos reais, que muitas vezes apresentam imprecisões, não linearidades, entre outros – em contraposição aos estudos de modelos teóricos sob condições ideais de operação para fins didáticos de aplicação de conteúdos. Logo, a imersão em situações reais possibilita explorar o desenvolvimento de habilidades do século 21, como colaboração, pensamento criativo e resolução de problemas. Note, ainda, que esta metodologia ativa de ensino permite cristalizar conceitos abstratos da teoria de controle.

Por fim, o protótipo de helicóptero de um grau de liberdade (do inglês, *Degree of Freedom – DOF*) desenvolvido oferece uma plataforma didática simples e flexível, pois permite-se implementações analógicas e digitais de controladores, além de ajustes de parâmetros da planta (por exemplo, a massa do helicóptero por meio de um contrapeso, tornando um parâmetro incerto do sistema).

MATERIAIS E MÉTODOS

O protótipo, em operação de malha aberta, é composto de uma hélice acoplada a um motor *brushless* de elevação, posicionado no centro de em 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 explodida do protótipo, para operação de malha fechada, é detalhada na Figura 1.

Figura 1 – Visão explodida da característica construtiva do protótipo.



Fonte: Elaborado por autores (2023).

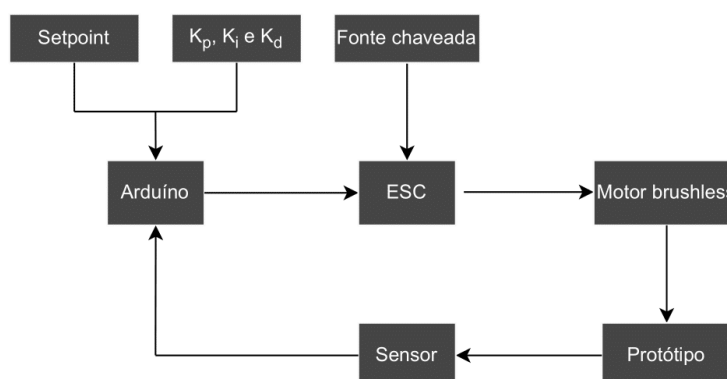


Em linhas gerais, será descrito os principais elementos para o controle de voo:

- (a) Algoritmo de controle: O código desenvolvido envolve uma rotina que inicializa o motor *brushless*, colocando-o em um estado controlável. Após, em cada ciclo de interrupções, o ARDUINO UNO recebe os sinais de leitura do sensor, cujos dados são suavizados através de um filtro de média móvel. Após a filtragem, o algoritmo calcula a ação de controle PID a tempo discreto e envia o sinal de controle ao ESC. Por fim, o valor de regime é atingido através do critério de $\pm 2\%$ de erro em relação ao valor desejado.
- (b) *Driver* de potência: Para controlar a velocidade do motor utilizou-se um controlador eletrônico de velocidade (do inglês, *Electronic Speed Controller – ESC*), que converte os sinais de controle em Modulação por Largura de Pulso (do inglês, *Pulse-Width Modulation – PWM*). 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 atinge a velocidade máxima. Normalmente, essa modulação é realizada em aeromodelos por meio de radiotransmissores, contudo neste protótipo o dispositivo digital Arduino Uno é responsável pelo gerenciamento do ESC através de uma saída PWM de 8 bits. Logo, é possível obter um sinal de controle excursionando o intervalo quantizado de 0 a 255, que viabiliza um ajuste preciso de velocidades e compatibilidade com diversos tipos de motores.
- (c) Atuador: O motor *brushless* é responsável pelo deslocamento da plataforma móvel, sendo escolhido devido a sua eficiência, reduzido desgaste mecânico e maior confiabilidade que os motores convencionais. Sua operação baseia-se na comutação eletrônica para gerar o movimento rotacional.
- (d) Sensoriamento: A fim de medir o deslocamento vertical do protótipo, optou-se por usar o módulo de sensor ultrassônico HC-SR04. Este dispositivo é operado por um emissor e um receptor que calculam a distância com base no tempo de retorno das ondas sonoras refletidas na superfície do suporte.

O diagrama de blocos da Figura 2 exemplifica a estratégia de controle adotada. Inicialmente, são definidos alguns parâmetros, tais como valor desejado da altura do helicóptero e os ganhos do controlador proporcional-integral-derivativo (PID). O algoritmo de controle processa a lei de controle e envia o sinal ao atuador (ESC), que aciona o motor *brushless*. O motor *brushless*, por sua vez, altera a dinâmica de movimento da plataforma (elevação ou descensão), aferido pelo sensor de posição vertical. Esse sinal sensorado é transmitido em tempo real ao dispositivo digital de controle, que permite atuar no sistemas em um intervalo de amostragem e, portanto, agir na variável de saída desejada.

Figura 2 – Diagrama de funcionamento



Fonte: Elaborado por autores (2023).

A estratégia de controle adotada tem sido o PID, devido a sua importância em aplicações de automação industrial e suas vantagens de precisão e desempenho transitório para diversas aplicações a sistemas dinâmicos (BISHOP, 2011). Além disso, esta técnica é particularmente útil em aplicações a plantas desconhecidas, tornando-se uma escolha versátil na indústria (OGATA, 2011). Este controlador combina três componentes essenciais que permitem ajustar a saída em função do erro atual (resposta transitória), do erro acumulado (função de rastreamento) e da taxa de variação do erro (amortecimento de oscilações). Para implementá-lo, é necessário descrever as equações diferenciais das componentes proporcional, integral e derivativo a fim de calcular uma aproximação da ação de controle digital, conforme segue:

$$\begin{aligned}
 u(t) &= u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) \\
 &= K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Os valores dos ganhos K_p , K_i e K_d podem ser encontrados de forma empírica (arbitrária). A versão digital do controlador PID é obtida através das aproximações:

- **Integral:** $u_i(t) = K_i \int_0^t e(t) dt = K_i T \sum_{i=1}^k e(i) \Rightarrow u_i[k] = K_i (Te[k] + u_i[k - 1])$
- **Derivada:** $u_d(t) = K_d \dot{e}(t) \Rightarrow u_d[k] = K_d \frac{e[k] - e[k - 1]}{T}$

Ressalta-se que a ação conjunta das três componentes de controle suprimem suas desvantagens individuais i.e., a ação proporcional e derivativa não eliminam o erro de regime permanente e a ação integral promove altas níveis de oscilações (muitas vezes indesejável).

RESULTADOS

Esta seção discute a implementação prática do sistema de controle (em malha fechada) de voo do protótipo de helicóptero 1-DOF desenvolvido. Para tanto, optou-se por duas configurações de sintonia dos controladores PID discreto, cujos valores dos ganhos estão disponíveis na Tabela 1 e os testes práticos de bancada contidos nas Figuras 3 e 4.

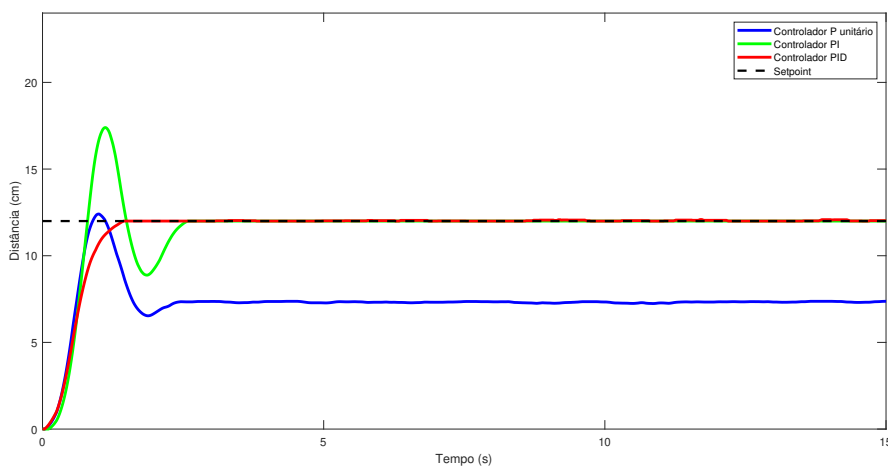


Tabela 1 – Valores de sintonia do controle PID para as implementações práticas.

K_p	K_i	K_d	Tipo
Ensaio 1			
1	0	0	P
1	1.05	0	PI
1	1.05	0.3	PID
Ensaio 2			
1	0	0	P
1	1.45	0	PI
1	1.45	0.5	PID

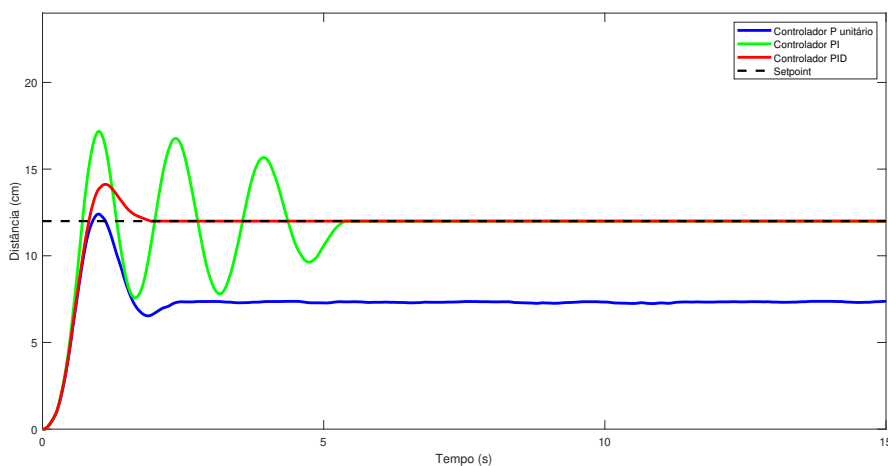
Fonte: Elaborado por autores (2023).

Figura 3 – Sinais do deslocamento vertical com os parâmetros do Ensaio 1.



Fonte: Elaborado por autores (2023).

Figura 4 – Sinais do deslocamento vertical com os parâmetros do Ensaio 2.



Fonte: Elaborado por autores (2023).



Estes sinais permitem validar a operação do protótipo, bem como ilustrar os efeitos dos tipos de controle na resposta transitória do helicóptero 1-DOF de bancada. Portanto, ao operar esta plataforma didática os alunos teriam a percepção de avaliar vantagens/desvantagens das configurações de controladores automáticos industriais mais usuais, tais como proporcional (P), proporcional-integral (PI) e o proporcional-integral-derivativo (PID). Além disso, poder-se-ia implementar outras configurações clássicas do domínio da frequência, como por exemplo avanço, atraso e avanço-atraso de fase. A viabilidade de aplicação de técnicas de controle moderno, no domínio do tempo, está associada à incorporação de outros estados, como por exemplo a integral do erro.

Conclusão

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de um protótipo de um helicóptero de um grau de liberdade para fins de uso como plataforma didática ao ensino da teoria de controle a tempo contínuo e discreto. A proposta didática posiciona o aluno no centro de sua aprendizagem, permitindo desenvolver competências exigidas ao engenheiro do século 21. Note, ainda, que a abordagem pedagógica proposta permite que os alunos apliquem seus conhecimentos em situações reais e, portanto, aproxima suas ações/decisões na solução de problemas mais complexos e menos idealizadas que as convencionais abordagens teóricas de sala de aula. Por fim, implementações práticas baseadas em controladores PID discretos, permitiu ilustrar a flexibilidade dos ensaios práticos e a cristalização dos efeitos na ação de controle dos termos proporcional, integral e derivativo.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Brasil.

Disponibilidade de Código

Os autores optaram por não disponibilizar os códigos devido à sua simplicidade de replicação.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- BISHOP, Richard C Dorf Robert H. **Modern control systems**. [S.l.: s.n.], 2011.
- LOBATO, Salatiel et al. Didactic prototype to model and to design linear control applied to a RLC plant, p. 1–6, 2017. DOI: [10.1109/COBEP.2017.8257393](https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257393).
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5^a. [S.l.]: São Paulo: Pearson, 2011.