

CONTROLADOR PID: CONCEITOS, APLICAÇÕES E DEMONSTRAÇÃO PRÁTICA EM UM PÊNDULO INVERTIDO

Categoria do Trabalho – Trabalhos de Conclusão de Curso

Cauã Souza Vieira

Frank Eric Cruz Barbosa

Gabriel Gomes Mauricio

Gabriel Barros Laytynher

Prof. Joel Junior Cordeiro (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA)

RESUMO

Este trabalho analisa o projeto e a implementação prática de um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) para a estabilização de um protótipo físico de pêndulo invertido, um sistema classicamente instável. A metodologia abrange a revisão teórica, a simulação computacional para validação do controle, e a construção e teste de um protótipo funcional. O objetivo principal é desenvolver um sistema de controle eficaz que estabilize o pêndulo real, minimizando oscilações, sobressinal (overshoot) e eliminando o erro em regime estacionário. Os resultados práticos, obtidos a partir do protótipo, demonstram a eficácia da técnica PID para estabilizar sistemas complexos, ao mesmo tempo que destacam os desafios da transição da simulação para o hardware, como atrito e ruído de sensores. O estudo conclui reafirmando a importância e a versatilidade do controlador PID como uma ferramenta fundamental na automação e controle.

Palavras-chave: Controlador PID; Pêndulo Invertido; Sistemas de Controle; Implementação Prática; Automação.

1 INTRODUÇÃO

Os controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) representam a espinha dorsal da engenharia de controle moderna, sendo aplicados em mais de 90% dos processos industriais (Aström & Hägglund, 2006). Sua ubiquidade em campos que vão da automação fabril à robótica e aos transportes deve-se a uma combinação única de estrutura simples, robustez frente a não linearidades e uma excelente relação custo-benefício. Em sua essência, o PID

atua como um "cérebro de correção contínua", calculando o erro entre um valor desejado (setpoint) e uma variável medida, e gerando ações corretivas com base em três termos interligados: o Proporcional (resposta imediata ao erro), o Integral (eliminação de desvios persistentes) e o Derivativo (antecipação de tendências).

Neste contexto, o pêndulo invertido emerge como um paradigma clássico para a validação de técnicas de controle. Trata-se de um sistema intrinsecamente instável, cuja dinâmica não linear exige compensações em tempo real para resistir à sua tendência natural ao colapso gravitacional. A sua estabilização não é apenas um desafio acadêmico, mas também um análogo a problemas industriais críticos, como a estabilização de veículos autônomos, o controle de braços robóticos e o alinhamento de plataformas flutuantes.

Apesar da ampla utilização do controlador PID, o desafio deste trabalho é transpor a teoria e a simulação para um protótipo físico, lidando com as imperfeições do mundo real. A implementação em sistemas instáveis enfrenta desafios práticos significativos, como oscilações persistentes, sobressinal (*overshoot*), sensibilidade a ruídos de medição e a dificuldade de realizar a sintonia fina dos parâmetros (K_p , K_i , K_d) para garantir estabilidade e desempenho ótimos. Este trabalho aborda a seguinte questão central: Como projetar, construir e sintonizar um controlador PID para estabilizar eficientemente um protótipo de pêndulo invertido, minimizando oscilações, *overshoot* e a vulnerabilidade a ruídos?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Principal:

- Projetar, implementar e validar um sistema de controle PID para a estabilização de um protótipo físico de pêndulo invertido.

2.2 Objetivos Secundários:

- Construir um protótipo funcional de baixo custo do sistema pêndulo invertido utilizando microcontroladores, sensores e atuadores.
- Validar o modelo matemático e a estratégia de controle por meio de simulação antes da implementação no hardware.
- Analisar os desafios da implementação prática, como ruído de sensores, atrito e limitações de atuadores, comparando os resultados do protótipo com os da simulação.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para este trabalho é dividida em duas frentes principais: revisão bibliográfica e desenvolvimento prático-experimental.

1. **Revisão Bibliográfica:** Realizou-se uma pesquisa sistemática em bases de dados acadêmicas, com foco no Google Scholar. Foram utilizadas combinações de termos de busca como: "controlador PID" + "pêndulo invertido" + "revisão"; "PID controller" + "inverted pendulum" + "review"; e "aplicações industriais" + "controlador PID". A análise de artigos de referência, como os de Kuczmam (2020), Ponce et al. (2014) e Moreira et al. (2021), permitiu a construção de um robusto referencial teórico.
2. **Desenvolvimento Prático e Experimental:** O desenvolvimento do protótipo seguiu as seguintes etapas:
 - **Modelagem e Simulação Preliminar:** Definição do modelo dinâmico do pêndulo invertido utilizando as equações de Euler-Lagrange (Kuczmam, 2020) e sua linearização. O modelo foi implementado em MATLAB/Simulink para projetar e sintonizar preliminarmente os ganhos PID (K_p , K_i , K_d), validando o design do controle antes da implementação física.
 - **Construção do Protótipo (Hardware):** Montagem de um protótipo físico composto por um microcontrolador (ex: Arduino ou ESP32), um sensor para medir a posição do pêndulo (ex: encoder ou acelerômetro), um atuador (motor DC com driver Ponte H) e a estrutura mecânica do carro e do pêndulo.
 - **Implementação do Controle (Software):** O algoritmo de controle PID foi programado no microcontrolador. O software é responsável por ler os dados do sensor, calcular o erro, aplicar a lógica PID e enviar o sinal de controle (PWM) para o atuador.
 - **Testes e Validação Experimental:** Realização de testes experimentais com o protótipo para sintonizar os ganhos PID em condições reais, registrando os dados de resposta do sistema para validar sua capacidade de estabilização frente a perturbações.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo fundamenta-se em dois pilares: a teoria do controle PID e a dinâmica do sistema de pêndulo invertido.

- **Controlador PID:** O controlador PID é um mecanismo de feedback que opera sobre o erro $e(t) = \text{setpoint} - \text{valor_medido}$. O termo **Proporcional (P)** gera uma saída proporcional ao erro atual, garantindo uma resposta rápida, mas frequentemente deixando um erro residual (offset). O termo **Integral (I)** acumula o erro ao longo do tempo, atuando para eliminar o offset e garantir que o sistema atinja o setpoint. O termo **Derivativo (D)** atua sobre a taxa de variação do erro, provendo uma ação antecipatória que amortece oscilações e reduz o *overshoot* (Åström & Hägglund, 2006). A sintonia desses três ganhos é um compromisso: K_p alto acelera a resposta, mas pode causar instabilidade; K_i alto elimina o erro, mas pode aumentar o *overshoot*; K_d alto melhora a estabilidade, mas amplifica o ruído do sensor.
- **Sistema Pêndulo Invertido:** É um sistema não linear e de fase não mínima, sendo um benchmark clássico em engenharia de controle. Sua modelagem, como visto em Kuczmanski (2020) e Ponce et al. (2014), envolve a derivação de equações diferenciais que descrevem tanto o movimento angular do pêndulo quanto o movimento linear do carro (ou base). Para o projeto de controladores lineares como o PID, o modelo é tipicamente linearizado em torno do ponto de equilíbrio instável (posição vertical). A literatura também explora controladores mais avançados, como Lógica Fuzzy e Redes Neurais (Ponce et al., 2014), que servem como contraponto e indicam caminhos para estudos futuros.

5 RESULTADOS ESPERADOS E DISCUSSÃO

Espera-se que o protótipo físico do pêndulo invertido demonstre a estabilização bem-sucedida através do controlador PID implementado. Os resultados serão apresentados por meio de gráficos gerados a partir de dados coletados dos sensores em tempo real, ilustrando a convergência do ângulo do pêndulo para a posição vertical e a estabilização da base.

A discussão focará nas discrepâncias entre o modelo simulado e o comportamento do sistema real, analisando os desafios práticos encontrados. Será discutido o *trade-off* durante a sintonia dos ganhos no protótipo, considerando efeitos não modelados como atrito, folgas mecânicas, atrasos no sistema e a saturação do atuador. A sensibilidade do termo derivativo ao ruído do sensor será abordada como uma limitação prática, destacando a importância da filtragem de sinais. Os resultados obtidos serão comparados com os da simulação e com os apresentados na literatura, validando a eficácia da abordagem metodológica adotada.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho se propõe a oferecer uma análise completa e didática do projeto e aplicação de um controlador PID, utilizando o pêndulo invertido como um estudo de caso desafiador e representativo. Ao final do estudo, espera-se ter consolidado a compreensão teórica do controle PID, demonstrado sua viabilidade na estabilização de um sistema físico complexo e instável, e elucidado os desafios inerentes ao processo de implementação prática. O projeto cumpre seus objetivos ao conectar a teoria de controle com uma implementação física e funcional, servindo como um recurso valioso para estudantes e profissionais da área de automação e controle, e como uma base sólida para futuras explorações em técnicas de controle avançado.

7 REFERÊNCIAS

ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *Advanced PID Control*. Research Triangle Park, NC: ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.

CZECH, A. S. Estudo do sistema pêndulo invertido e implementação de um controlador PID para um robô de duas rodas. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2024.

KUCZMANN, M. A Comparative Study of Different Control Strategies for Inverted Pendulum Systems. *ACTA Technica Jaurinensis*, v. 13, n. 2, p. 142-158, 2020.

MOREIRA, A. et al. Controlador PID aplicado ao controle de um pêndulo invertido. In: SEMINÁRIO INTEGRADO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DO GEM, 2021, São Carlos. Anais... São Carlos: EESC-USP, 2021.

PONCE, P.; MOLINA, A.; ALVAREZ, E. A Review of Intelligent Control Systems Applied to an Inverted Pendulum Problem. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, v. 3, n. 5, 2014.