

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. A metodologia é puramente experimental, abrangendo a construção de um protótipo com microcontrolador Arduino e sensor MPU-6050, e a sintonia empírica do controle. 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 hardware, demonstram a eficácia da técnica PID para estabilizar sistemas complexos, ao mesmo tempo que destacam os desafios da implementação física, como o tratamento de ruído do sensor e o atrito mecânico. 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 e o controle de braços robóticos.

O desafio deste trabalho é a implementação direta de um controlador em 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). Este trabalho aborda a seguinte questão central: Como projetar, construir e sintonizar empiricamente um controlador PID para estabilizar 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 utilizando um microcontrolador Arduino, um sensor de movimento MPU-6050 e atuadores adequados.

- Discutir a relevância do controlador PID na automação industrial e robótica, utilizando o pêndulo invertido como um caso de estudo prático.
- Analisar os desafios da implementação prática, como ruído de sensores, atrito mecânico e limitações de atuadores, documentando o processo de sintonia empírica.

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, utilizando termos como: "controlador PID" + "pêndulo invertido"; "MPU-6050 filter" + "inverted pendulum"; e "arduino PID control". A análise de artigos e documentações permitiu a construção de um robusto referencial teórico.
2. **Desenvolvimento Prático e Experimental:** O desenvolvimento do protótipo seguiu as seguintes etapas:
 - **Construção do Protótipo (Hardware):** Montagem de um protótipo físico composto por um microcontrolador Arduino, um sensor inercial MPU-6050 (acelerômetro e giroscópio) para medir a inclinação do pêndulo, um atuador (motor DC com driver Ponte H) e a estrutura mecânica do carro e do pêndulo.
 - **Processamento de Sinais do Sensor:** Desenvolvimento de um algoritmo de fusão de dados, como um filtro complementar, para combinar as leituras do acelerômetro e do giroscópio. Isso é crucial para obter uma medição de ângulo precisa e estável, corrigindo o *drift* do giroscópio e o ruído do acelerômetro.
 - **Implementação do Controle (Software):** O algoritmo de controle PID foi programado no ambiente Arduino. O software é responsável por ler o ângulo filtrado do sensor, calcular o erro, aplicar a lógica PID e enviar o sinal de controle (PWM) para o atuador.
 - **Testes e Sintonia Experimental:** Realização de testes iterativos com o protótipo para sintonizar empiricamente os ganhos PID (K_p , K_i , K_d)

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. O termo **Integral (I)** acumula o erro ao longo do tempo, atuando para eliminar o erro residual (*offset*). O termo **Derivativo (D)** atua sobre a taxa de variação do erro, provendo uma ação antecipatória que amortece oscilações (Åström & Hägglund, 2006). A sintonia desses ganhos é um compromisso: K_p alto acelera a resposta, mas pode causar instabilidade; K_i elimina o erro, mas pode aumentar o *overshoot*; K_d melhora a estabilidade, mas amplifica o ruído do sensor.
- **Sensor MPU-6050 e Fusão de Sensores:** O MPU-6050 é uma Unidade de Medição Inercial (IMU) que contém um acelerômetro e um giroscópio. O giroscópio mede a velocidade angular, sendo preciso para movimentos rápidos, mas sofre de *drift* (erro acumulativo) ao longo do tempo. O acelerômetro mede a aceleração (incluindo a gravidade), permitindo calcular o ângulo em condições estáticas, mas é suscetível a ruídos de vibração. Para obter uma estimativa de ângulo robusta, é essencial combinar ambos os sensores através de um **filtro complementar** ou de Kalman, que une a estabilidade de longo prazo do acelerômetro com a precisão de curto prazo do giroscópio.

5 RESULTADOS ESPERADOS E DISCUSSÃO

Espera-se que o protótipo físico do pêndulo invertido demonstre a estabilização bem-sucedida através do controlador PID implementado. O sucesso do controle será validado pela observação do comportamento do sistema e pela análise dos dados dos sensores, que devem indicar a convergência do ângulo do pêndulo para a posição vertical e a estabilização da base.

A discussão focará nos desafios práticos encontrados. Será discutido o trade-off durante a sintonia empírica 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 MPU-6050 será abordada como uma limitação crítica, destacando a importância fundamental da filtragem de sinais para o sucesso do controle. Os resultados obtidos validarão 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 demonstrado a viabilidade da estabilização de um sistema físico complexo e instável através de uma implementação prática, elucidando os desafios inerentes a este processo. 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.