

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

CONSTRUÇÃO DE UM PÊNDBULO INVERTIDO COM RODA DE REAÇÃO E CONTROLE DE SWING UP

Pedro H. S. Amorim¹, Leonardo A. Carniato²

¹Graduando em Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Presidente Epitácio, p.amorim@aluno.ifsp.edu.br

² Docente, IFSP, Câmpus Presidente Epitácio, leonardo@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.02.05-0 Sistemas Eletrônicos de Medida e de Controle

RESUMO: O trabalho detalha o processo de construção de um pêndulo invertido com roda de reação e a implementação do movimento de *swing-up*. O método adotado para o *swing-up* foi baseado na análise da aceleração do pêndulo. Quando o pêndulo começava a se movimentar e alcançava uma posição em que sua velocidade era zero, era necessário inverter o sentido de rotação. Inicialmente posicionado a 180°, o pêndulo deveria ser levado até a posição vertical de 0°. A estrutura do projeto compreende um suporte para o pêndulo, um encoder incremental para monitoramento do movimento, e um motor de corrente contínua (CC) que impulsiona o sistema. A roda de reação, acoplada ao motor, aumenta o momento de inércia, facilitando o movimento de *swing-up*. O controle do movimento é realizado por meio da biblioteca SIMPLE FOC, que monitora a velocidade do pêndulo e ajusta a rotação do motor conforme necessário. A placa Arduino Mega, equipada com o microcontrolador ATmega2560, é utilizada para processar os sinais provenientes do codificador, executar o algoritmo de controle, e enviar comandos ao driver da ponte H para controlar o movimento do sistema. A escolha do Arduino é vantajosa para prototipagem e desenvolvimento de sistemas de controle em tempo real, devido à sua facilidade de programação e à ampla disponibilidade de bibliotecas específicas, que asseguram precisão e eficiência na execução dos movimentos desejados. Atualmente, o projeto está em andamento, foi realizado um levantamento detalhado de equações a partir de datasheets, e um novo suporte para o pêndulo foi projetado e desenvolvido, visando aprimorar a estabilidade e o desempenho do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: engenharia; posição; sistema de controle.

CONSTRUCTION OF AN INVERTED PENDULUM WITH REACTION WHEEL AND SWING UP CONTROL

ABSTRACT: This paper details the construction process of an inverted pendulum with a reaction wheel and the implementation of the *swing-up* movement. The method adopted for the *swing-up* movement was based on the analysis of the pendulum acceleration. When the pendulum started to move and reached a position where its speed was zero, it was necessary to reverse the direction of rotation. Initially positioned at 180°, the pendulum should be brought to the vertical position of 0°. The project structure comprises a support for the pendulum, an incremental encoder to monitor the

movement, and a direct current (DC) motor that drives the system. The reaction wheel, coupled to the motor, increases the moment of inertia, facilitating the *swing-up* movement. The movement control is performed through the SIMPLE FOC library, which monitors the pendulum speed and adjusts the motor rotation as necessary. The Arduino Mega board, equipped with the ATmega2560 microcontroller, is used to process the signals from the encoder, execute the control algorithm, and send commands to the H-bridge driver to control the movement of the system. The choice of Arduino is advantageous for prototyping and developing real-time control systems, due to its ease of programming and the wide availability of specific libraries, which ensure precision and efficiency in executing the desired movements. Currently, the project is underway, a detailed survey of equations from relevant datasheets has been carried out, and a new support for the pendulum has been designed and developed, aiming to improve the stability and performance of the system.

KEYWORDS: engineering; position; control system.

INTRODUÇÃO

A presença dos sistemas de controle e automação tem evidentemente crescido e estes tornaram-se parte integrante da sociedade (NISE, 2011). Pode-se citar inúmeras aplicações em diferentes áreas, como: foguetes e ônibus espaciais; peças metálicas usinadas automaticamente; veículos autônomos; robótica; modernos sistemas de manufatura e quaisquer operações industriais que envolvam o controle de temperatura, pressão, umidade, viscosidade, vazão etc... (OGATA, 2010). Com isso, vê-se que o controle automático é essencial em qualquer campo da engenharia e da ciência. A teoria de controle está sempre em desenvolvimento e evolução visando atender as demandas dos sistemas. Neste contexto algumas plantas de controle, como o pêndulo invertido, são tidos como objeto de estudo para compreensão dos conceitos de controle e desenvolvimento de técnicas mais eficientes e robustas (Souza, 2022). A construção e controle de um pêndulo invertido integra conhecimentos de diversas outras áreas como mecânica, elétrica e eletrônica. Ainda, essas plantas são não lineares, o que leva à busca por diferentes técnicas de controle para melhorar o desempenho. Embora haja uma abundância de análises e resultados de design para esse tipo de configuração na literatura, ainda está longe de ser simples e fácil para quem pretende desenvolver uma configuração física e implementar a maioria das estratégias de controle (JEPSEN, 2009).

Em Andreassa (2022) é possível verificar um exemplo de construção de um PIRR (pêndulo invertido com roda de reação), onde o autor utiliza um encoder incremental de 100 pulsos por revolução (encarregado de efetuar as leituras de posição e velocidade do pêndulo), um motor de corrente contínua (CHP-36GP-555-ABHL de 12 V) que já possui um encoder Holzer, uma placa de desenvolvimento "ESP32 Wroom Devkit" e uma ponte H do modelo L209N. A placa controladora permite a comunicação entre o computador e o sistema, possibilitando a leitura de dados e o controle do protótipo via softwares supervisórios.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 ilustra o diagrama geral de corpo livre do pêndulo invertido com roda de reação. Observa-se que para a construção do sistema, do ponto de vista mecânico, é necessário um suporte adequado, a roda de reação e uma haste. Do ponto de vista elétrico/eletrônico, necessita-se de um motor conectado à roda de reação, um *driver* para seu acionamento e um ao menos um *encoder* com

o objetivo de medir o ângulo do pêndulo (θ_p). Ainda, para processamento dos dados e controle do sistema, geralmente são aplicados microcontroladores.

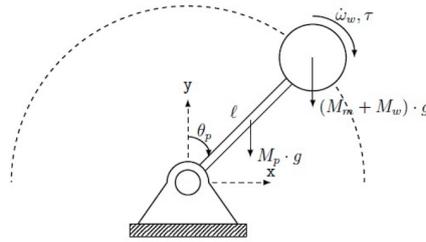


Figura 1: Diagrama de corpo livre

A escolha do formato do suporte é crucial para garantir a estabilidade e a eficiência do dispositivo durante o movimento de *swing-up*. Mais detalhes sobre a estratégia de *swing-up* podem ser encontrados em Wiklund (1993). Ao considerar diferentes configurações, um suporte em forma de torre pode parecer uma opção, mas apresenta desvantagens significativas. Devido ao movimento de *swing-up*, uma estrutura vertical tende a oscilar, resultando em perdas mecânicas que comprometem o desempenho do sistema. Para minimizar essas perdas e assegurar a estabilidade, foi construída uma base em formato de prancha, equipada com uma camada de borracha na parte inferior.

Essa configuração reduz a movimentação indesejada e garante uma fixação mais firme à superfície, evitando deslocamentos e perdas mecânicas ao longo do movimento do pêndulo. Para fixar o pêndulo invertido ao sistema, foi necessário criar um braço de sustentação adequado. Em uma das extremidades desse braço, foi conectado a um *encoder* incremental, permitindo o monitoramento preciso de seu movimento. Na outra extremidade, foi acoplado um motor de gimbal GM4108H-120T, responsável por fornecer energia ao sistema. Este motor trata-se de um BLDC (*Brushless DC*). Para implementar o controle de *swing up* do pêndulo invertido, faz-se necessário a utilização deste *encoder* incremental para medir o ângulo do pêndulo.

Para o controle do sistema, foi utilizado um Arduino Mega 2560, que permitiu a programação do projeto. Para o controle do motor, foi empregada a placa MKS DUAL FOC V3.1. Junto ao motor, foi instalada uma roda de reação para aumentar o momento de inércia como mostrado na Figura 2, assim, gerar o torque necessário para o controle do movimento do pêndulo.



Figura 2: Roda de Reação.

Durante os testes, observou-se que, ao atingir a posição mais alta, o pêndulo fazia com que o motor não funcionasse corretamente, devido ao torque necessário para inverter o movimento. Compreendeu-se que este problema residia devido ao fato de que para que o motor gire no sentido horário, ele precisa seguir uma sequência de fase específica, como "A, B e C", "B, C e A" ou "C, A e B", entre outras possíveis combinações. Para inverter o sentido de giro, se a bobina "C" estiver energizada, o

motor deve seguir a sequência de fase “C, B e A”. Para que o controlador identificasse qual bobina estava energizada, era necessário fechar a malha com o uso de um sensor ou *encoder*, permitindo que o sistema ajustasse automaticamente até corrigir completamente os erros. Do ponto de vista de controle, observa-se a seguinte afirmação: “Os sistemas de malha fechada monitoram a saída e a comparam com a entrada. Se um erro for detectado, o sistema corrige a saída e, portanto, corrige os efeitos dos distúrbios” (NISE, 2015, p. 21).

Diante disso, optou-se por utilizar um encoder rotativo com vinte pulsos por resolução. Devido à baixa resolução do encoder, não foi possível alinhá-lo adequadamente com o motor, nem identificar a bobina energizada. Em função disso, decidiu-se substituir o motor por um motor CC. Com a substituição, foi necessário refazer a programação, reaproveitando apenas algumas partes do código anterior. O controlador MKS DUAL FOC V3.1 foi substituído por uma ponte H L298N, que possui uma estrutura mais simplificada. Com a substituição do controlador e do motor, tornou-se necessário projetar um novo braço para o pêndulo, adotando uma abordagem inovadora: a adição de uma extremidade ao braço para funcionar como contrapeso. Essa modificação visou facilitar o equilíbrio do pêndulo.

O modelo linear para o motor CC (1) e (2) foi obtido a partir do trabalho de Alves et al. (2018)

$$\tau = n \cdot K_t \cdot i_a - B_{motor} \cdot \omega_n \quad (1)$$

$$V_{in} = R_a \cdot i_a + n \cdot K_v \cdot \omega \quad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros do sistema foram determinados com o intuito de compreender de maneira abrangente seu comportamento dinâmico. As medições foram realizadas utilizando uma balança para análise da massa e uma fita métrica para mensuração das dimensões. As demais informações foram obtidas a partir da análise de datasheets. Os dados coletados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros e variáveis da modelagem mecânica e elétrica

Simb.	Parâmetro	Valor
M_p	Massa pêndulo [Kg]	0,0066
M_m	Massa Motor [Kg]	0,05
M_r	Massa Roda [Kg]	0,062
J_p	Mom. inérc. pêndulo [$Kg \cdot m^2$]	2.6460e-04
J_r	Mom. inérc. roda [$Kg \cdot m^2$]	0,0103
l	Comprimento pêndulo [m]	0,152
g	Aceleração da gravidade [$m \cdot s^{-2}$]	9,81
d	Distância do centro de massa ao eixo [m]	0,1285
R_a	Resistência de Armadura [Ω]	26
K_v	Constante f.c.e.m[V/(rad/s)]	0,4093
K_t	Constante de torque[N_m/A]	0,5313
B_{motor}	Coef atrito [$N_m/(rad/s)$]	0,0221
n	Redução motor	21,3
i_a	Corrente de Armadura [A]	-
τ	Torque Motor[N_m]	0,5099
V_{in}	Tensão de Armadura [V]	-

Foi desenvolvida uma nova estrutura que apresenta uma melhoria significativa em relação à anterior. A principal modificação é a ausência de um “pilar”, o que foi decidido após observar que o balanço da estrutura estava comprometendo o controle do sistema. Com essa modificação, foi possível reduzir substancialmente as perdas mecânicas, resultando em um desempenho mais eficiente do sistema. A

Figura 4 mostra a configuração final do projeto do PIRR.

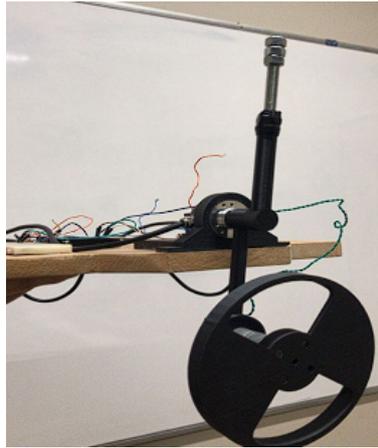


Figura 4: Projeto Final PIRR.

A Figura 5 exibe o gráfico que representa a variação do ângulo do pêndulo ao longo do processo de *swing up*. Inicialmente, o pêndulo está em repouso na posição de 180° , conforme programado. Com o avanço do tempo, o pêndulo começa a girar em uma direção específica. Quando sua velocidade atinge zero, o pêndulo inverte a direção de rotação e continua até alcançar a posição de 0° , correspondendo à vertical para cima.

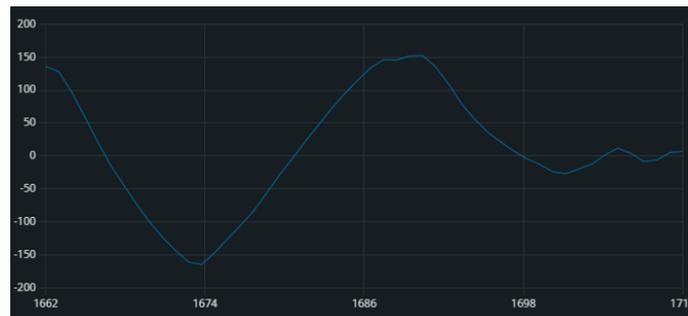


Figura 5: Gráfico movimento de *swing up*

Após a conclusão do processo de *swing up*, foram testadas técnicas de controle com o objetivo de estabilizar o pêndulo na sua posição mais elevada. Diversas abordagens de controle, incluindo PID e LQR, foram aplicadas, baseando-se nos parâmetros apresentados na Tabela 1. Na configuração inicial do experimento, o PIRR foi posicionado a 180° , estabelecendo o ponto de partida do sistema. A posição alvo para o controle foi definida como zero graus, com o intuito de estabilizar e manter o pêndulo na posição vertical. Esse procedimento foi realizado para ambos os controladores. A obtenção dos resultados dessa etapa de controle ainda está em curso.

CONCLUSÕES

A construção da estrutura do pêndulo invertido com roda de reação foi realizada com sucesso, assim como a implementação da técnica de *swing-up*. Os resultados obtidos demonstram que a abordagem adotada para o *swing-up* foi bem-sucedida, validando o projeto. O sistema mostrou-se eficiente na execução do algoritmo de *swing-up*, comprovando a viabilidade da solução proposta e a eficácia dos componentes e metodologias empregados.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

P.H.S.A Programação, desenvolvimento de software; criação de programas de computador; implementação de código de computador e algoritmos de suporte; teste de componentes de código existentes (ID: f89c5233-01b0-4778-93e9-cc7d107aa2c8).

L.A.C contribuiu com a orientação no trabalho e revisão textual do artigo (ID: d3aead86-f2a2-47f7-bb99-79de6421164d) .

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFSP – campus Presidente Epitácio (IFSP/PEP) pela infraestrutura e suporte fornecidos, bem como ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações.

REFERÊNCIAS

ALVES, Rodrigo Magalhães Rodrigues; NEVES, Gabriel Pereira das; ANGÉLICO, Bruno Augusto. Modelagem construção e controle de um pêndulo invertido com roda de reação. In: Congresso Brasileiro de Automatica - CBA, 2018, João Pessoa. **Anais [...]** . João Pessoa: SBA, 2018.

ANDREASSA, Marcio Maesta. **Construção, modelagem e controle de um pêndulo com roda de reação utilizando técnicas modernas**. 2022. 72 f., Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Faculdade de Ilha Solteira - UNESP - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.

JEPSEN, F.; SOBORG, A.; PEDERSEN R; Z. YANG, Z. Development and control of an inverted pendulum driven by a reaction wheel. 2009 **International Conference on Mechatronics and Automation**, Changchun, China, 2009, pp. 2829-2834, doi: 10.1109/ICMA.2009.5246460

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.

SOUZA, Thiago Francisco Ferreira de. **Projeto de sistema de controle de um pêndulo invertido com roda de reação**. 2022. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022

WIKLUND, M.; KRISTENSON, A.; ÅSTRÖM, K. J. A new strategy for swinging up an inverted pendulum. **IFAC World Congress**, Sydney, Australia, 1993.