

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE PÊNDULO COM RODA DE REAÇÃO USANDO IMPRESSÃO 3D

**LUIZ EDUARDO PRESTES KOLOSQUE¹; LUCAS DUTRA CHAVES²; KEVIN FERREIRA DA SILVA³;
BERNARDO BARANCELLI SCHWEDERSKY⁴.**

¹*Universidade Federal de Pelotas – lkolosque@inf.ufpel.edu.br*

²*Universidade Federal de Pelotas – ldchaves@inf.ufpel.edu.br*

³*Universidade Federal de Pelotas – kfdsilva@inf.ufpel.edu.br*

⁴*Universidade Federal de Pelotas – bernardo.schwedersky@ufpel.edu.br*

1. INTRODUÇÃO

O controle de grandezas mecânicas, como a posição e o ângulo, é um desafio comum em diversos tipos de sistemas físicos. Um tipo de mecanismo, comum à vários processos, são os pêndulos invertidos, um tipo de processo em que o objetivo é equilibrar um objeto no topo em uma orientação vertical. Esse tipo de sistema pode ser implementado em diversas áreas, como veículos do tipo segway, nos quais são usados sensores, como acelerômetros e giroscópios para a medição do ângulo de inclinação do veículo. Quanto ao controle desse tipo de processo, técnicas clássicas de controle, como os controladores PID, podem ser aplicadas para estabilizar o sistema (MELO, 2017). Um tipo de atuador que pode ser utilizado para movimentar o pêndulo são as rodas de reação, atuadores amplamente usados em satélites para o controle de altitude. Segundo Fonseca (2011), essas rodas ajustam a orientação usando o princípio da conservação do momento angular, o que pode ser utilizado para atuar em um sistema de pêndulo (FONSECA, 2011).

Sistemas de pêndulo invertido que utilizam a roda de reação como atuador podem ser vistas, de um ponto de vista mecânico, como um pêndulo simples com uma roda giratória na ponta. A roda é fixada por um suporte acoplado ao corpo do pêndulo, sendo que o torque gerado pelo movimento da roda pode ser usado para controlar o movimento do sistema, com o uso de controladores (ASTRÖM, 2007). Segundo Santos (2020), esse mecanismo tem potencial para ser utilizado em pesquisas acadêmicas, sendo um ótimo exemplo para visualizar como o controle microcontrolado é efetivo, podendo ser usado como uma ferramenta de aprendizagem eficaz para os estudantes (SANTOS, 2020). Segundo Ribeiro (2007) para o projeto ser realizado é necessário passar por desafios, como equilibrá-lo em uma posição vertical, é importante ressaltar que essa posição é instável, pois o pêndulo tende a voltar para a posição de repouso, para conseguir equilibrar será utilizado como atuado uma roda de reação que irá gerar um torque suficiente para mantê-lo na posição desejada (RIBEIRO, 2007).

Com base nisto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo de um mecanismo de pêndulo invertido, utilizando manufatura aditiva (impressão 3D), permitindo que seja possível implementar controladores em um processo físico, sujeito a perturbações e possibilitando mudanças tanto no software quanto no hardware. Na seção 2 é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do protótipo. Por sua vez, na seção 3 são apresentados alguns

resultados preliminares do estudo, e na seção 4 são apresentadas conclusões acerca do trabalho.

2. METODOLOGIA

A metodologia para o desenvolvimento do protótipo consistiu em três etapas principais: o projeto da estrutura física do pêndulo com roda de reação, utilizando software de desenho assistido por computador (CAD); o desenvolvimento da instrumentação eletrônica que será usada para medição e atuação no pêndulo; e o desenvolvimento do software para medição de grandezas de interesse e atuação.

2.1. Projeto da estrutura física

O projeto da estrutura física foi dividido em cinco partes distintas, as quais são a base do pêndulo apresentado na Figura 2 (a), a qual foi projetada de forma a possibilitar a alteração da angulação máxima do pêndulo, a qual pode variar entre 20° e 40°. O mecanismo de encaixe entre a base e o corpo do pêndulo foi projetado com rolamentos e uma haste cilíndrica, a qual une o rolamento e o pêndulo, permitindo que o corpo do pêndulo se movimente de forma suave.

O corpo do pêndulo foi projetado utilizando módulos que podem ser repetidos, fazendo com que a altura máxima do mesmo possa ser alterada. Para possibilitar o encaixe do módulo MPU 6050, responsável pela medição do ângulo, e para permitir que futuros módulos possam ser adicionados, foram criados furos no módulo central do pêndulo o qual pode ser visto na Figura 2 (b). Na extremidade superior foi projetado um módulo de encaixe, de forma a possibilitar a mudança do mecanismo de acoplamento entre o motor e o corpo do pêndulo de acordo com a Figura 2 (d). Já para o acoplamento do motor com o restante do pêndulo foi projetado um suporte de motor, mostrado na Figura 2 (e), que facilita a substituição do motor sem a necessidade da troca da parte superior do pêndulo.

A roda de reação, apresentada na Figura 2 (c) foi projetada com dimensões 22 cm x 6 cm de espessura, sendo que foram adicionados conjuntos de furos, de forma que possibilita a colocação de parafusos com o intuito de aumentar a massa. Para permitir o acoplamento entre a roda e o motor foi projetado uma peça com quatro encaixes apresentado na Figura 2 (f).

2.2. Desenvolvimento da eletrônica embarcada

O projeto da eletrônica a ser embarcada no pêndulo envolve três elementos distintos. Uma placa microcontrolada, responsável por processar as informações dos sensores e atuar no motor, um módulo sensor de ângulo e um sistema de acionamento para o motor. A plataforma microcontrolada utilizada consiste em um Arduino Uno associado com um módulo MPU 6050, o qual contém um giroscópio, responsável pela medição do ângulo do pêndulo. Para o acionamento do motor, foi utilizada uma ponte H L298n a qual é responsável por receber um sinal PWM e fornece ao motor uma tensão proporcional à razão do PWM. O motor utilizado é de corrente contínua com caixa de redução, operando em uma tensão máxima de 6 V, na qual opera em 100 RPM. Um diagrama esquemático da montagem eletrônica desenvolvida é apresentado na Figura 1.

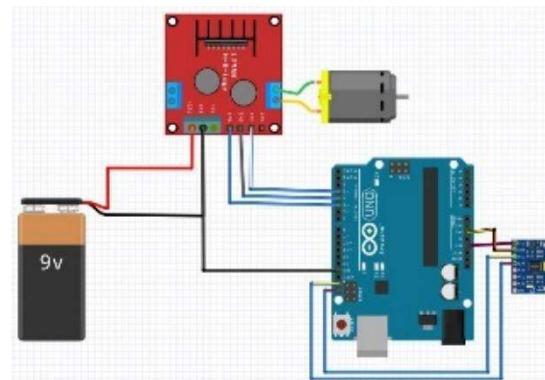


Figura 1. Diagrama esquemático da montagem eletrônica.

2.3. Programação utilizando Arduino

A programação do acionamento do sistema foi realizada utilizando a plataforma Arduino. Foram programados um sistema para aquisição das medições do ângulo, realizando a leitura das informações fornecidas pelo módulo MPU 6050, sendo que as medições de ângulo foram filtradas usando um filtro de médias móveis. O controle do sistema será realizado utilizando um controlador do tipo proporcional, integral e derivativo (PID), o qual utiliza informações do ângulo medido e do valor de referência desejado para encontrar qual a tensão que deve ser aplicada no motor pelo módulo de acionamento.

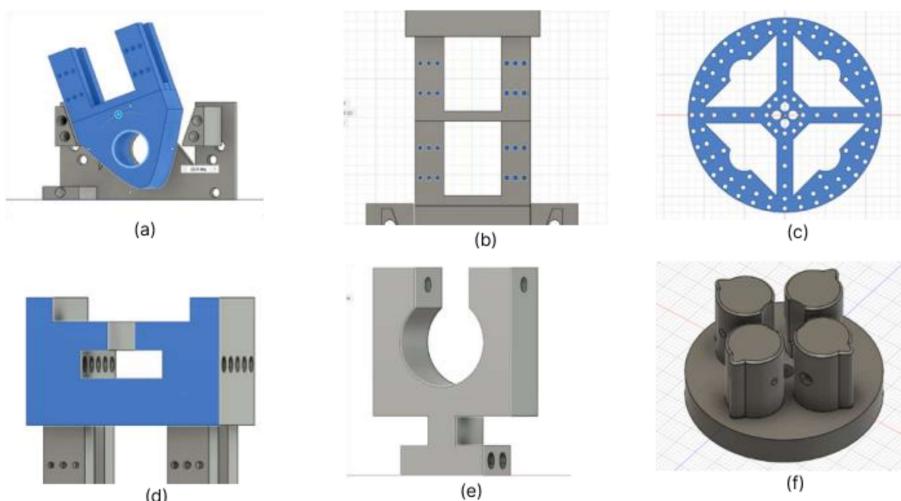


Figura 2. Modelagem 3d das peças da estrutura do pêndulo. (a) base; (b) encaixe corpo; (c) roda de reação; (d) parte superior; (e) suporte motor; (f) acoplamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo do pêndulo foi projetado utilizando o software AUTODESK FUSION e impresso em uma impressora Sethi3D S4X. O modelo foi reforçado com uma haste de alumínio com rosca, para melhorar a rigidez melhorando a estabilidade da estrutura do pêndulo, onde as mesmas podem ser vistas na figura 3 (a) e Figura 3 (b) respectivamente.

Após a montagem foram obtidos alguns resultados parciais, os quais são apresentados na Figura 4, na qual é apresentada a medição do ângulo, em preto, recebida utilizando o módulo MPU 6050, e o valor filtrado com o filtro de média móvel, em azul.



Figura 3. Estrutura do protótipo do pêndulo. (a) projeto da estrutura do pêndulo; (b) estrutura do pêndulo impresso em 3D.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um protótipo de um pêndulo invertido com roda de reação o qual foi projetado utilizando CAD. Adicionalmente, foi projetado um sistema embarcado, empregando a plataforma Arduino, associada à um acelerômetro e um sistema de atuação, responsável por controlar a velocidade do motor CC. O protótipo foi impresso utilizando manufatura aditiva, e a eletrônica embarcada foi validada experimentalmente. Os resultados deste estudo indicam que o protótipo desenvolvido está apto à realização de atividades relacionadas à síntese de controladores, podendo sofrer modificações, tanto na estrutura física, quanto na programação, de forma simples e flexível. Em estudos futuros, é almejado o desenvolvido do controle em malha fechada do pêndulo, utilizando técnicas de controle clássico.

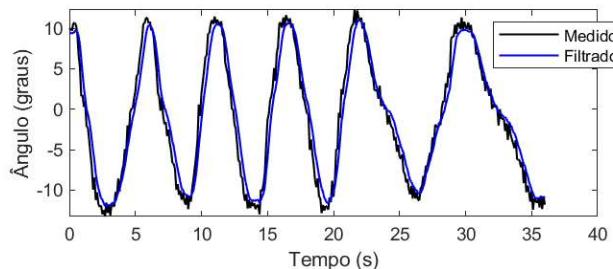


Figura 3. Gráfico da medição do ângulo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÅSTRÖM, K J. **The Reaction Wheel Pendulum**. Lund: Studentlitteratur, 2007.
- MELO, José V. **Identificação e controle de um veículo Segway para fins educativos**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 1-4 de out. 2017, Porto Alegre, RS. Anais[...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Automação, 2017. P. 1856-1861.
- FONSECA, Jesus Bravo de Sousa da. **Estudo da aplicação de rodas de reação no sistema de controle de satélites**. Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE). São José dos Campos: INPE, 2011. 47 p.
- RIBEIRO, Ricardo. **Implementação de um sistema de controle de um pêndulo invertido**. 2007. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- SANTOS, Lizandra Meire. **Controle de um pêndulo invertido utilizando um controlador PID**. 2020. 38 f. il. Monografia (Graduação em Engenharia de Computação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2020.