

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (2024)

METODOLOGIA DE PROJETO DE UM PROTÓTIPO DIDÁTICO DE
PÊNDULO INVERTIDO UTILIZANDO IMPRESSÃO 3D

Diego Nascimento de Oliveira
Cecilio Martins de Sousa Neto

RESUMO

O ensino de sistemas de controle desempenha um papel essencial na formação acadêmica, exigindo ferramentas didáticas que proporcionem uma compreensão integrada dos conceitos teóricos e práticos. Bancadas experimentais e equipamentos didáticos permitem que os estudantes analisem a dinâmica dos sistemas sob diferentes perspectivas, como matemática, física e mecânica. Neste trabalho, apresenta-se o desenvolvimento de um protótipo didático de pêndulo invertido, utilizando impressão 3D, para auxiliar no ensino de sistemas de controle. O projeto incluiu a modelagem das peças no software Fusion 360, o fatiamento no Ultimaker Cura e a impressão em uma impressora GTMax3D. Os resultados indicam que a metodologia adotada viabiliza a construção de um equipamento funcional, proporcionando aos estudantes uma abordagem prática para a aprendizagem de técnicas de controle e estabilidade de sistemas dinâmicos.

Palavras-chave: pêndulo invertido; ensino de sistemas de controle; impressão 3D; protótipo didático.

1 INTRODUÇÃO

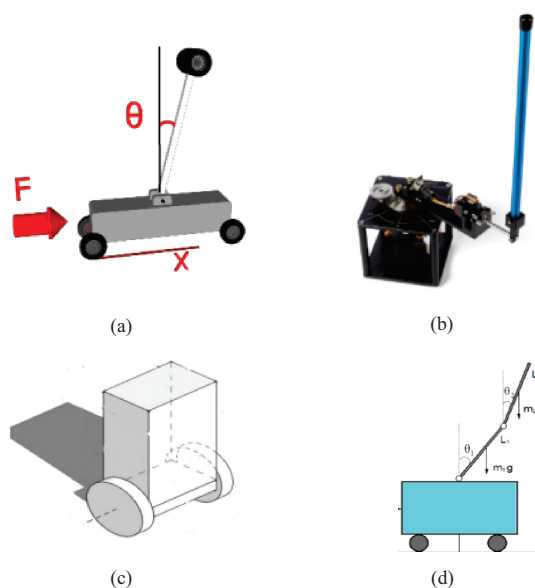
O ensino dos conceitos teóricos e práticos de sistemas de controle são essenciais na conquista de uma educação efetiva. Em geral, bancadas didáticas e equipamentos são utilizados como ferramentas didáticas no desenvolvimento ou fixação de conceitos científicos, permitindo aos estudantes realizarem análises da dinâmica do ponto de vista matemático, físico e mecânico. Desta forma, a utilização de metodologias de ensino que possam introduzir os conceitos teóricos e práticos ao estudante de sistemas de controle e

suas aplicabilidades consistem em elementos cruciais no processo de ensino-aprendizagem [9].

Na literatura são relatados a utilização de diversos sistemas robóticos que podem ser usados no ensino e na pesquisa da teoria de sistemas de controle, robótica e automação. Dentre estes, o pêndulo invertido é considerado um dos mais relevantes devido principalmente à sua estrutura relativamente simples, tendo aplicação em estudos nas áreas de controle de lançamento de foguetes espaciais, equilíbrio de robôs e estabilização de veículos autônomos. De um modo geral, o sistema de pêndulo invertido consiste em uma haste posicionada de forma perpendicular a uma base móvel, a gravidade faz a haste cair, provocando um deslocamento angular livre, sendo considerado como um sistema naturalmente instável. Entretanto, é possível alcançar a estabilidade aplicando uma força horizontal na base móvel, permitindo que o pêndulo se mantenha equilibrado na posição vertical [6, 5].

Segundo [4], na literatura existem diferentes tipos de configurações do sistema pêndulo invertido, tais como: pêndulo invertido sobre um carro, pêndulo invertido rotacional, pêndulo invertido sobre duas rodas e pêndulo invertido duplo, conforme ilustrado na Figura 1. De acordo com a Figura 1, o pêndulo sobre um carro é composto por quatro rodas, geralmente acionadas por um motor de corrente de contínua, sendo a haste apoiada em um ponto de giro no centro do carro. Por outro lado, o pêndulo invertido rotacional é composto por um braço rotativo em que sua extremidade é acoplada ao pêndulo. O pêndulo invertido sobre duas rodas consiste em uma estrutura de duas rodas presa a uma haste fixa. Enquanto que, o pêndulo invertido duplo é composto por duas hastes acopladas uma na extremidade da outra.

Figura 1: Representação dos diferentes tipos de pêndulos invertidos.



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2013).

A construção das partes que constituem o sistema do pêndulo invertido pode ser desenvolvida por meio de diversas técnicas e materiais. Nos últimos anos a impressão tridimensional (3D) tem permitido a criação e o desenvolvimento de projetos em diversas áreas e com representações gráficas bastante detalhadas e realistas. A técnica de impressão 3D permite que o projetista possa criar objetos em três dimensões a partir de um modelo digital. O processo é aditivo, ou seja, o material é adicionado camada por camada para formar a estrutura desejada. Além disso, diferentemente do processo convencional, como por exemplo a usinagem que modelam o objeto removendo material, a impressão 3D constrói o objeto adicionando material com precisão, gerando pouco desperdício [1].

O processo de desenvolvimento de um projeto utilizando a impressão 3D inicia-se com a elaboração de rascunhos considerando as dimensões físicas do objeto a ser desenvolvido. Após essa etapa, é realizada a modelagem 3D do objeto utilizando *softwares* de desenho. Depois da modelagem do objeto é necessário realizar o fatiamento da peça por meio de um *software*. O software de fatiamento tem por finalidade cortar a peça em camadas e conectar o modelo 3D com a peça que será produzida pela impressora 3D. O *software* de fatiamento da peça também permite ao projetista escolher os padrões de densidade de preenchimento dinâmico, necessidade de suportes e tempo estimado de impressão da peça [1, 7, 2].

A peça é impressa por meio de um processo de deposição fundida em que um filamento, geralmente de plástico, parcialmente derretido é estrudado por um bico fino e em seguida é depositado em uma superfície plana formando assim a peça tridimensional. O processo de impressão 3D camada a camada utiliza vários tipos de materiais plásticos, sendo os mais utilizados o ABS (do inglês, *Acrylonitril Butadiene Styrene*) e o PLA (do inglês, *Polyactic Acid*). No final deste processo de impressão tem uma peça de excelente acabamento e bastante sólida [1, 7, 2].

Com base nesse contexto, nesse artigo é apresentada uma metodologia de projeto para desenvolvimento de um protótipo de pêndulo invertido, montado sobre um carro, utilizando impressão 3D. As partes que constituem o protótipo foram modeladas por meio da plataforma de *software* Fusion 360, sendo este amplamente utilizado em diversos projetos de engenharia e manufatura de produtos. O fatiamento das peças modeladas foram realizados pelo software *Ultimaker Cura* 3D, sendo este um software de código aberto e gratuito. Com base no protótipo de pêndulo invertido desenvolvido, a modelagem, impressão e montagem das partes constituintes demonstram a eficácia do projeto elaborado neste trabalho.

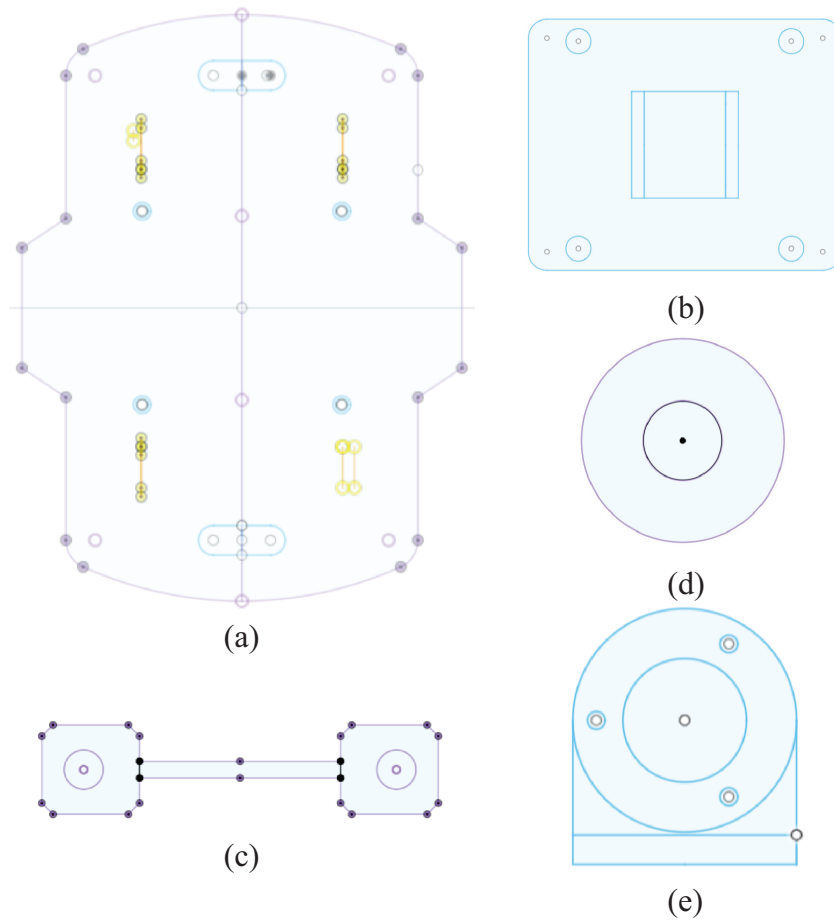
2 METODOLOGIA DE PROJETO

O sistema pêndulo invertido é uma importante ferramenta utilizada no ensino de disciplinas de sistemas de controle, sendo utilizado na análise de teorias de sistemas de controle clássicas e modernas, técnicas de controle contínua e discreta. Com base, neste contexto, neste trabalho um protótipo de pêndulo invertido foi desenvolvido considerando as seguintes etapas: modelagem das partes constituintes, impressão das peças, componentes eletrônicos e montagem do protótipo.

2.1 Modelagem das partes do projeto

A modelagem das partes que constituem o protótipo de pêndulo invertido, apresentado neste trabalho, foi desenvolvida por meio do *software Fusion 360*. Com a utilização do *Fusion 360* o projetista poderá modelar e montar as partes do projeto. Além disso, o mesmo fornece ferramentas que possibilitam a criação de vistas ortográficas, testes de estresse e sincronização de projetos em nuvem. O pêndulo desenvolvido neste trabalho é composto das seguintes partes: um chassi, uma base superior, um suporte para os rolamentos, um eixo e um suporte para o encoder. A modelagem das partes no *Fusion 360* podem ser realizadas a partir de desenhos das vistas ortogonais criadas em 2D. As vistas ortogonais em 2D permitem ao projetista definir as dimensões e geometrias de seus modelos. Para isso, o *Fusion 360* dispõe de diversas ferramentas de projeto, como por exemplo: ferramenta de linha, círculo, retângulo, arco, restrições e dimensões. Desta forma, o projeto pode ser desenvolvido considerando partes individuais ou em uma montagem completa. Na Figura 2 são apresentados os desenhos em 2D das partes modeladas para o desenvolvimento do projeto de pêndulo invertido. De acordo com a Figura 2, as partes do protótipo de pêndulo invertido foram desenvolvidas com base nos desenhos individuais das vistas ortogonais em 2D do projeto.

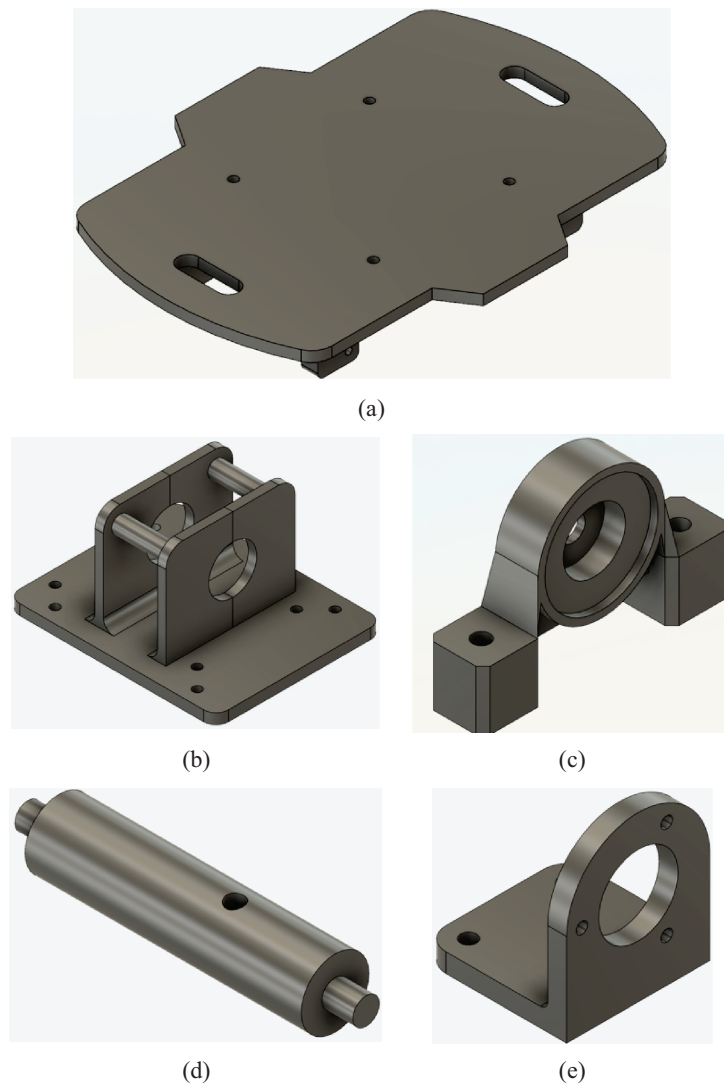
Figura 2: Desenhos das partes em 2D: (a) chassi; (b) base superior; (c) suporte para os rolamentos; (d) eixo; (e) suporte para o encoder.



Fonte: Autor (2024).

Após a criação das vistas ortogonais em 2D das partes, o projetista poderá realizar a criação de superfícies e sólidos 3D a partir da geometria 2D por meio da ferramenta de extrusão. Neste caso, o projetista deverá selecionar os objetos ou subobjetos de arestas que receberão a extrusão, qual tipo de extrusão será realizada, o plano de perfil, qual o deslocamento realizado em relação ao plano de perfil, a direção que pode ser de um lado, dois lados ou simétrica e o tipo de extrusão especificada ou se a extrusão irá ocorrer em relação a um corpo, face ou plano selecionado. Na Figura 3 são apresentadas as partes do protótipo de pêndulo invertido após a extrusão dos desenhos ilustrados na Figura 2.

Figura 3: Partes do pendulo invertido: (a) chassi; (b) base superior; (c) suporte para os rolamentos; (d) eixo; (e) suporte para o encoder.



Fonte: Autor (2024).

Com os componentes que constituem o projeto desenvolvido, após a realização do processo de extrusão, o projetista poderá realizar a montagem com todos os componentes internos, externos ou a mistura de ambos. Para isso, será utilizada a ferramenta *Assemble* que consiste em uma coleção de vários componentes que funcionam como um único projeto. A realização dessa montagem tem por objetivo demonstrar ao projetista a disposição dos componentes e uma prévia de como ficará a montagem física das partes do projeto. Com base nisso, na Figura 4 é apresentada a montagem prévia das partes do protótipo de pêndulo desenvolvido nesse trabalho. De acordo com a Figura 4, além das partes modeladas também foram incluídas na montagem o conjunto de motores e rodas e a haste do pêndulo.

Figura 4: Montagem das partes do pêndulo invertido.



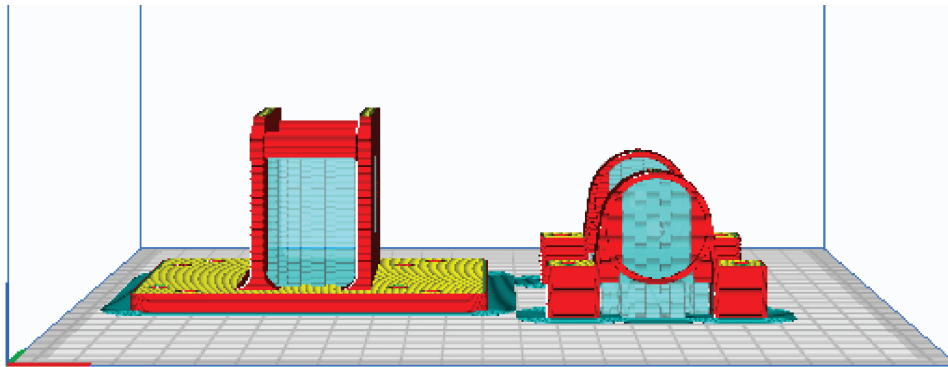
Fonte: Autor (2024).

2.2 Impressão das partes do projeto

Após a realização da modelagem 3D das partes do projeto o projetista deverá realizar o processo de fatiamento. Neste caso, um *software* de fatiamento irá fatiar o modelo informando à máquina de impressão quais camadas deverão ser criadas. Portanto, o *software* de fatiamento utiliza o arquivo 3D, geralmente na extensão *Standard Triangle Language* (STL), gerando o arquivo para o formato g-code. O código g-code consiste em uma linguagem de programação utilizada em máquinas de comando numérico computadorizado (CNC), tendo como objetivo a realização de operações de movimento, corte e perfurações.

O fatiamento das partes que compõem o protótipo de pêndulo invertido desenvolvido neste trabalho foi realizado utilizando o *software Ultimaker Cura*, um fatiador de código aberto desenvolvido tanto por uma equipe interna quanto por contribuições da comunidade de usuários. Essa ferramenta possui integração simples com diversos softwares CAD e suporta múltiplos formatos de arquivos. Por meio dela, o projetista pode definir as configurações da impressora utilizada, os parâmetros de impressão e o tipo de filamento empregado. No fatiamento, foram consideradas as seguintes configurações: impressora GTMax3D, filamento ABS de 1,75 mm, preenchimento de 50% em padrão de linhas, temperatura do bico da extrusora em 230°C, temperatura da mesa de impressão em 80°C, velocidade de 60 mm/s, colocação de suportes onde necessário e espessura de parede de 0,8 mm. Na Figura 5, é apresentado o processo de fatiamento da base superior e dos suportes dos rolamentos.

Figura 5: Processo de fatiamento das partes.



Fonte: Autor (2024).

O modelo de máquina de impressão utilizado para a fabricação das partes do protótipo foi a GTMax3D ProCore A2V2, uma impressora robusta e compacta, com área de impressão de 220x220x240 mm. Além disso, o equipamento oferece detecção e troca automática de filamentos, velocidade de deslocamento de até 300 mm/s e qualidade de impressão variando de 0,05 mm a 0,32 mm. Seu bico atinge uma temperatura máxima de 295°C, e o *software Ultimaker Cura* é o recomendado para o fatiamento dos modelos. A mesa, feita de alumínio com tampo de vidro, pode operar a uma temperatura máxima de 135°C. Na Figura 6, é apresentada a impressora em funcionamento, realizando a impressão de uma das peças que compõem o protótipo de pêndulo invertido desenvolvido neste trabalho.

Figura 6: Processo de impressão utilizando a GTMax3D ProCore A2V2.



Fonte: Autor (2024).

2.3 Componentes eletrônicos e montagem do protótipo

O protótipo de pêndulo invertido desenvolvido nesse trabalho é composto pelos seguintes componentes eletrônicos: conjunto motor de corrente contínua e roda, ponte H L298n, encoder incremental e placa de desenvolvimento Wemos D1 esp32.

2.3.1 Conjunto motor de corrente contínua e roda

O conjunto motor de corrente contínua e roda, apresentado na Figura 7, é bastante utilizado na construção de diversos modelos de robôs. O motor de corrente contínua é bem leve, possui um alto conjugado, baixa rotações por minuto, pode ser alimentado por uma tensão de 3 a 6V, corrente nominal de 70mA e máxima de 250mA e uma caixa de redução de 1:48. A roda possui um diâmetro 66mm e pode ser montada de qualquer lado do motor devido ao eixo estendido nas duas direções [13].

Figura 7: Conjunto motor de corrente contínua e roda.

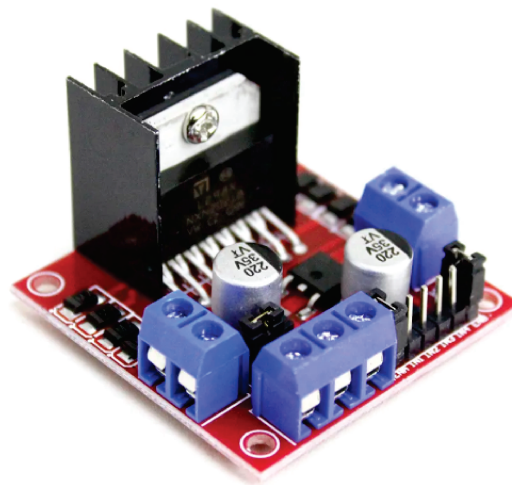


Fonte: Eletrogate (2024).

2.3.2 Ponte H L298n

A ponte H L298n, ilustrada na Figura 8, utilizada no acionamento dos motores CC é baseada no chip L298n, sendo indicada no controle de solenóides, motores CC, motores de passo e cargas indutivas como relés. Além disso, possui uma tensão de operação de 4 a 35V, corrente de operação máxima de 2A por canal, potência máxima de 25W e pode controlar velocidade e sentido de rotação de até dois motores CC simultaneamente ou um motor de passo [10].

Figura 8: Ponte H L298n.



Fonte: Mercado livre (2024).

2.3.3 Encoder incremental

O encoder incremental rotativo, modelo E38S6G5-600B-G24N, apresentado na Figura 9 é capaz de determinar com precisão a posição angular de um eixo acoplado ao seu sistema. A posição angular é obtida com base no número de pulsos fornecido, neste caso são 600 pulsos por revolução. Este modelo possui uma fácil instalação por ser bastante leve e pequeno. Além disso, pode operar normalmente a 2000 RPM, sendo 5000 RPM a velocidade máxima de operação por um curto período de tempo, possui um codificador óptico com seleção em 360 graus, saída em coletor aberto NPN com leitura precisa em duas fases, consumo baixo de até 400 mA, frequência de resposta de 0 a 100KHz e alimentação de 5 a 24 V em corrente contínua [11].

Figura 9: *Encoder* incremental.



Fonte: Walmart (2024).

2.3.4 Placa de desenvolvimento Wemos D1 esp32

A placa de desenvolvimento Wemos D1 esp32, ilustrada na Figura 10, é baseada no *chip* ESP8266 e combina a conectividade *bluetooth* 5 e protocolo *wifi* IEEE 802.11 que permite ao desenvolvedor a elaboração de projetos de internet das coisas e automação residencial. A placa é equipada com um processador RISC-V de 32 *bits* a 120 MHz, controlador PWM de *LED* com até seis canais e interfaces SPI, UART e I2C. Além disso, possui uma memória *flash* de 2 MB, SRAM de 272 KB e ROM de 576 KB, tensão de alimentação de 5 a 12V em corrente contínua, velocidade de *clock* de 240 MHz, tensão de operação dos pinos de entrada e saída de 3,3V, conector micro usb para alimentação e programação e pode ser programada utilizando a IDE do arduino [12].

Figura 10: Placa de desenvolvimento Wemos D1 esp32.



Fonte: Walmart (2024).

Na Figura 11 é apresentado o protótipo de pêndulo invertido desenvolvido nesse trabalho. De acordo com a Figura 11, a montagem dos conjuntos motores de corrente contínua e roda foram conectados ao chassi com a utilização de parafusos e porcas com rosca de 3mm. O encoder foi conectado ao eixo por meio de um acoplamento de 6mm. A ponte H e a placa de desenvolvimento foram fixadas ao chassi por meio de parafusos de 3mm. O processo de montagem da base superior ao chassi foi realizado por meio de parafusos e porcas de 4 mm. Na conexão da base superior ao chassi foram utilizados parafusos e porcas no intuito de utilizar o chassi em outras aplicações, como por exemplo: um robô seguidor de linha e um robô autônomo.

Figura 11: Protótipo de pêndulo invertido desenvolvido.



Fonte: Autor (2024).

3 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um protótipo didático de pêndulo invertido para auxiliar no ensino de sistemas de controle. A utilização da impressão 3D possibilitou a fabricação de um modelo funcional e acessível, demonstrando sua viabilidade para aplicações educacionais. A metodologia empregada, desde a modelagem das peças até a montagem dos componentes eletrônicos, revelou-se eficiente, permitindo a construção de um protótipo robusto e de fácil replicação. Além disso, a implementação do sistema de controle utilizando um microcontrolador ESP reforçou a aplicabilidade do projeto no ensino prático, abrindo caminho para experimentações e ajustes em diferentes estratégias de controle. Como trabalhos futuros, sugere-se a realização da modelagem matemática do sistema, análise da resposta do sistema sem controle, implementação e análise de técnicas de controle, realização de testes experimentais para aprimorar a estabilidade e a resposta do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] AGUIAR, L. C. D. **Um processo para utilizar a tecnologia de impressão 3D na construção de instrumentos didáticos para o ensino de ciências**. 2016. Dissertação (Mestrado em Educação para a Ciência) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, 2016.
- [2] AZEVEDO, Fábio Mariotto de. **Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/e06b9a3a-986c-45dc-8228-797043c30b37/Azevedo_Fabio_Mariotto.pdf. Acesso em: 16 out. 2024.
- [3] DEURSEN, F. VAN. **A revolução das impressoras 3D**. 2018. Disponível em: <https://3ddesignersm.wordpress.com/2018/07/14/a-revolucao-das-impressoras-3d/>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- [4] PIRES, Laio da Silva. **Técnicas de controle para robôs tipo pêndulo invertido**. 2023. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2023.
- [5] SANTOS, A. B. et al. **Desenvolvimento de um robô móvel dicitelo de auto balanceamento**. 2015. Relatório Final (Graduação em Engenharia de Computação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2015.

- [6] SILVA, Hugo José Duarte et al. **Estudo comparativo entre os controladores fuzzy e PID aplicados ao controle de um pêndulo invertido utilizando plataforma Lego Mindstorms NXT**. 2013. Trabalho acadêmico.
- [7] CAVALCANTE, Alexandre Araripe. **Correlação entre parâmetros de impressão 3D e a resistência mecânica anisotrópica de peças impressas em PLA**. 2022. Trabalho acadêmico.
- [8] TORRES, Daniel Vicente Orozco. **Diseño e implementación de un péndulo invertido auto balanceado montado en un carro móvil para el análisis de distintas técnicas de control automático**. 2022. Trabalho acadêmico – Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2022.
- [9] BREGANON, R. A. et al. **Desenvolvimento de sistemas de pêndulos invertidos como ferramentas didáticas em cursos de engenharia de controle e automação**. HOLOS, v. 5, p. 1–14, 2021.
- [10] STMicroelectronics. **Dual full-bridge driver L298N**. 2023. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2025.
- [11] SHARVIELECTRONICS. **E38S6G5-600B-G24N – Photoelectric Incremental Rotary Encoder**. Disponível em: <https://sharvielectronics.com>. Acesso em: 19 fev. 2025.
- [12] HANDSONTEC. **Placa WeMos D1 R32 ESP32 WiFi - Bluetooth**. Disponível em: <https://handsontec.com/dataspecs/module/ESP/WeMos>. Acesso em: 19 fev. 2025.
- [13] ELETROGATE. **Conjunto Motor de Corrente Contínua e Roda**. Disponível em: <https://www.eletrogate.com>. Acesso em: 19 fev. 2025.