

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**HUGO FURTADO DE OLIVEIRA**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE KIT DIDÁTICO PARA ESTUDO DO**  
**CONTROLE DE EQUILÍBRIO**

**Leopoldina**

**2026**

**HUGO FURTADO DE OLIVEIRA**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE KIT DIDÁTICO PARA ESTUDO DO  
CONTROLE DE EQUILÍBRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Leopoldina, como parte do requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Rodolfo Lacerda Valle

Coorientador: Luis Claudio Gambôa Lopes

**Leopoldina**

**2026**

Oliveira, Hugo Furtado de.  
O48p Projeto e desenvolvimento de kit didático para estudo do controle de equilíbrio. / Hugo Furtado de Oliveira. – 2026.  
94 f. : il., gráfs.; figs.  
Orientador: Rodolfo Lacerda Valle.  
Coorientador: Luis Claudio Gambôa Lopes.  
Bibliografia: f.73-74.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, *Campus* Leopoldina, apresentada a curso de Engenharia de Controle e Automação. Departamento de Eletroeletrônica, 2026.  
1. Controle automático. 2. Material didático. 3. Sistemas dinâmicos. 4. Controladores. 5. Pêndulo. 6. Aerodinâmica. I. Valle, Rodolfo Lacerda. II. Lopes, Luis Claudio Gambôa Lopes. III. Título.  
CDU: 681.5-047.82

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Luzia Adriana Damasceno,  
CRB 6º - 2305 / CEFET-MG *campus* Leopoldina.



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC N° 9/2026 - CECALP (11.51.20)

N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 18 de junho de 2026.

**HUGO FURTADO DE OLIVEIRA**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE KITS DIDÁTICOS PARA ESTUDO DO  
CONTROLE DE EQUILÍBRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Leopoldina, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em 19 de junho de 2026.

Banca Examinadora:

**Prof. D. Eng. Rodolfo Lacerda Valle (CEFET-MG) - Presidente**  
**Prof. D. Sc. Accacio Ferreira dos Santos Neto (CEFET-MG)**  
**Prof. D. Sc. Vinícius Barbosa Schettino, (CEFET-MG)**

**Leopoldina  
2026**

*(Assinado digitalmente em 21/06/2026 16:46)*  
**ACCACIO FERREIRA DOS SANTOS NETO**  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DEELP (11.61.04)  
Matrícula: ###317#7

*(Assinado digitalmente em 24/06/2026 14:35)*  
**RODOLFO LACERDA VALLE**  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DEELP (11.61.04)  
Matrícula: ###471#2

*(Assinado digitalmente em 23/06/2026 09:52)*

VINICIUS BARBOSA SCHETTINO

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DEELP (11.61.04)

Matrícula: ###138#3

**Processo Associado: 23062.031375/2026-30**

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **9**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **18/06/2026** e o código de verificação: **c404c151fc**

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais, Mário de Oliveira e Luciana Furtado, à minha noiva, Maria Julia Mariquito, e ao meu irmão, Rafael, que me proporcionaram apoio, incentivo e motivação para seguir até o fim, sempre buscando entregar o meu melhor.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus, por me abençoar e conceder a oportunidade de ingressar neste curso, pela saúde e resiliência durante toda essa jornada.

A minha noiva, Maria Julia, que esteve do meu lado em todo o processo, acreditando, suportando e apoiando em todas as situações.

Aos meus pais, Mário de Oliveira e Luciana Furtado, e ao meu irmão, Rafael, que sempre foram a minha base. Agradeço por todo o amor, cuidado, educação e valores que me transmitiram, bem como pelo apoio constante e pela motivação que me impulsionaram a seguir em frente.

Aos meus sogros, Sertório e Cassiana, e ao meu cunhado, pela acolhida, pelos conselhos, pelo incentivo e pela presença constante ao longo dessa caminhada. Sou grato pelo apoio e pelos ensinamentos que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus tios, em especial Gilberto, e ao meu primo Rogério, com quem tive a oportunidade de trabalhar desde muito cedo. Os conhecimentos, experiências e responsabilidades compartilhados ao longo desses anos foram fundamentais para minha formação e me prepararam para os desafios encontrados ao longo da vida.

Aos meus amigos Dércio Manique, Mateus Costa, Paloma Costa, Renan Rocha, Iago Rangel, Luis Felipe Santos, Raphael Britto, Roberta Berno, Júlia Rios, Elian Francis, Ana Luísa, Leandro Junior, Rogério Freitas e tantos outros que fizeram parte da minha trajetória. Agradeço pela amizade, companheirismo, incentivo e pelos inúmeros momentos compartilhados que tornaram essa caminhada mais leve e significativa.

Ao meu orientador, Rodolfo Lacerda, pela dedicação, profissionalismo, integridade e comprometimento demonstrados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sou grato pela orientação segura, pela disponibilidade em compartilhar conhecimentos e pelo apoio prestado em todas as etapas deste projeto.

Por fim, agradeço ao CEFET-MG Campus Leopoldina pela estrutura oferecida e a todos os seus colaboradores, desde os profissionais da zeladoria aos servidores, que contribuem diariamente para a excelência da instituição e para a formação de seus estudantes.

## RESUMO

O aprendizado prático e experimental desempenha um papel fundamental na educação em engenharia, complementando o ensino teórico tradicional. Nesse contexto, a cultura maker e a educação em STEAM destacam-se por incentivar a criação colaborativa, o faça você mesmo e a integração entre Artes, Ciências, Tecnologia, Engenharia e Matemática, favorecendo o engajamento dos estudantes e enriquecendo sua aprendizagem. Entretanto, a falta de recursos em instituições de ensino público e o alto custo de equipamentos didáticos limitam a implementação dessas práticas, comprometendo a formação completa dos estudantes. Diante disso, este trabalho teve como objetivo desenvolver um kit didático de baixo custo, baseado na dinâmica de um aeropêndulo sendo uma derivação do pêndulo invertido, para apoiar o estudo de controle. Para isso, foi desenvolvido um modelo experimental controlado por motores com hélices fixados na parte superior de sua estrutura, com o objetivo de equilibrar o protótipo em seu ponto crítico, correspondente à angulação de noventa graus em relação ao plano horizontal. Utilizando um controlador PID para rastrear o ângulo de referência. Os resultados experimentais mostraram que o sistema foi capaz de retornar à referência após perturbações, mesmo com limitação da ação de controle por saturação e da angulação de operação. Por utilizar um microcontrolador em sua estrutura, o sistema também permite a implementação de diferentes tipos de controladores. Além da finalidade didática, o kit pode ser utilizado em ações de divulgação científica e na divulgação do curso de Engenharia de Controle e Automação.

**Palavras-chave:** Aeropêndulo; Pêndulo invertido; Controle PID; Kit didático.

## ABSTRACT

Practical and experimental learning plays a fundamental role in engineering education by complementing traditional theoretical instruction. In this context, maker culture and STEAM education stand out for encouraging collaborative creation, do-it-yourself practices, and the integration of Arts, Science, Technology, Engineering, and Mathematics, thereby promoting student engagement and enriching the learning process. However, the lack of resources in public educational institutions and the high cost of instructional equipment limit the implementation of these practices, compromising students' comprehensive education.

Therefore, this work aimed to develop a low-cost educational kit based on the dynamics of an aeropendulum, a variation of the inverted pendulum, to support the study of control systems. For this purpose, an experimental model was developed and controlled by motors with propellers mounted at the top of its structure, with the objective of balancing the prototype at its critical point, corresponding to an angle of ninety degrees relative to the horizontal plane. A PID controller was used to track the reference angle. Experimental results showed that the system was able to return to the reference position after disturbances, even with limitations imposed by control-action saturation and the operating angular range. Since a microcontroller is integrated into its structure, the system also enables the implementation of different types of controllers. In addition to its educational purpose, the kit can be used in scientific outreach activities and to promote the Control and Automation Engineering program.

**Keywords:** Aeropendulum; Inverted pendulum; PID control; Educational kit.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E  
AUTOMAÇÃO - LP



TERMO DE RESPONSABILIDADE Nº 139/2026 - CECALP (11.51.20)

Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 18 de junho de 2026.

Eu, **HUGO FURTADO DE OLIVEIRA**, matrícula **20193013799**, discente do Curso de Engenharia de Controle e Automação, declaro para os devidos fins, que o presente Trabalho de Conclusão de Curso, de título **PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE KITS DIDÁTICOS PARA ESTUDO DO CONTROLE DE EQUILÍBRIO**, é de minha autoria e que estou ciente dos:

- Artigos 297 a 299 do Código Penal;
- Decreto-Lei n.º 2.848 de 7 de dezembro de 1940;
- Lei n.º 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, sobre os Direitos Autorais;
- Regulamento Disciplinar Discente do CEFET-MG;
- E que plágio consiste na reprodução de obra alheia e submissão dela como trabalho próprio ou na inclusão, em trabalho próprio, de ideias, textos, tabelas ou ilustrações (quadros, figuras, gráficos, fotografias, retratos, lâminas, desenhos, organogramas, fluxogramas, plantas, mapas e outros) transcritos de obras de terceiros sem a devida e correta citação da referência.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração, isentando o (a) professor(a) **D. Eng. Rodolfo Lacerda Valle** (orientador), o (a) professor(a) **D. Sc. Luis Cláudio Gamboa Lopes** (coorientador), os membros da banca examinadora e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Leopoldina, de qualquer responsabilidade.

*(Assinado digitalmente em 19/06/2026 12:27)*

HUGO FURTADO DE OLIVEIRA

DISCENTE

Matrícula: 2019#####9

Processo Associado: 23062.031375/2026-30

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **139**, ano: **2026**, tipo: **TERMO DE RESPONSABILIDADE**, data de emissão: **18/06/2026** e o código de verificação: **b15fb3425d**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Representação de sistema dinâmico: (a) translacional, (b) rotacional. . . .                          | 23 |
| Figura 2.2 – <i>Rotary Inverted Pendulum</i> (ROTPENT) . . . . .                                                  | 24 |
| Figura 2.3 – Ilustração das ligações elétricas e posicionamento dos componentes. . . .                            | 28 |
| Figura 2.4 – XIAO ESP 32 C3. . . . .                                                                              | 29 |
| Figura 2.5 – Sensor MPU6050. . . . .                                                                              | 30 |
| Figura 2.6 – Motor <i>Driver</i> CC MX1508. . . . .                                                               | 31 |
| Figura 2.7 – Regulador de tensão XL4015. . . . .                                                                  | 32 |
| Figura 2.8 – Regulador de tensão LM7805. . . . .                                                                  | 33 |
| Figura 2.9 – Optacoplador PC 817. . . . .                                                                         | 34 |
| Figura 2.10 – Motor CC 8520. . . . .                                                                              | 35 |
| Figura 3.1 – Protótipo montado: a) Vista lateral esquerda, b) Vista frontal, c) Vista lateral<br>direita. . . . . | 37 |
| Figura 3.2 – Modelagem 3D do apoio duplo. . . . .                                                                 | 38 |
| Figura 3.3 – Vistas técnicas do apoio duplo. . . . .                                                              | 38 |
| Figura 3.4 – Modelagem final do corpo principal. . . . .                                                          | 39 |
| Figura 3.5 – Vistas técnicas do corpo principal. . . . .                                                          | 39 |
| Figura 3.6 – Modelagem final da base inferior. . . . .                                                            | 40 |
| Figura 3.7 – Vistas técnicas da base inferior. . . . .                                                            | 40 |
| Figura 3.8 – Base superior da estrutura dos motores. . . . .                                                      | 41 |
| Figura 3.9 – Vistas da base superior da estrutura dos motores. . . . .                                            | 41 |
| Figura 3.10 – Suporte e proteção para motores e hélices. . . . .                                                  | 42 |
| Figura 3.11 – Vistas dos suporte e proteção para motores e hélices. . . . .                                       | 43 |
| Figura 3.12 – Modelo 3D montado no Software. . . . .                                                              | 44 |
| Figura 3.13 – Esquemático que constitui a PCI. . . . .                                                            | 45 |
| Figura 3.14 – Representação esquemática do microcontrolador. . . . .                                              | 45 |
| Figura 3.15 – Representação esquemática do sensor MPU6050. . . . .                                                | 46 |
| Figura 3.16 – Esquemático da ligação dos optacopladores PC817. . . . .                                            | 47 |
| Figura 3.17 – Esquemático da ligação do <i>driver</i> MX1508. . . . .                                             | 48 |
| Figura 3.18 – Esquemático da ligação do regulador de tensão LM7805. . . . .                                       | 49 |
| Figura 3.19 – Esquemático da ligação dos chicotes de 4 vias. . . . .                                              | 50 |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.20 – Esquemático da ligação do filtro capacitivo. . . . .                                                                        | 51 |
| Figura 3.21 – Layout da PCI contendo os componentes alocados e as ligações das trilhas. . . . .                                           | 52 |
| Figura 3.22 – Desenvolvimento: a) Placa usinada por fresadora CNC, b) Placa finalizada. . . . .                                           | 53 |
| Figura 3.23 – Sinais do optacoplador: a) entrada, b) saída. . . . .                                                                       | 54 |
| Figura 3.24 – Circuito optacoplador: a) antes da alteração dos resistores R1 e R2, b) depois da alteração dos resistores R1 e R2. . . . . | 55 |
| Figura 3.25 – Diagrama de corpo livre: a) representação simplificada, b) decomposição da força peso no centro de massa. . . . .           | 56 |
| Figura 3.26 – Malha do controle PID . . . . .                                                                                             | 60 |
| Figura 3.27 – Levantamento de custo de fabricação da placa com empresa terceira. . . . .                                                  | 63 |
| Figura 4.1 – Coleta de dados 01 com os ganhos $K_P=120$ , $K_I=10$ e $k_D=110$ . . . . .                                                  | 66 |
| Figura 4.2 – Coleta de dados 02 com os ganhos $K_P=120$ , $K_I=50$ e $k_D=110$ . . . . .                                                  | 67 |
| Figura 4.3 – Coleta de dados 03 com os ganhos $K_P=160$ , $K_I=50$ e $k_D=110$ . . . . .                                                  | 68 |
| Figura 4.4 – Vídeo com o funcionamento do pêndulo invertido: (a) Vídeo 1, (b) Vídeo 2. . . . .                                            | 69 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1.1 – Objetivos específicos. . . . .                                                                   | 20 |
| Tabela 3.1 – Custos dos componentes do protótipo. . . . .                                                     | 62 |
| Tabela 4.1 – Resumo dos índices de desempenho dos experimentos com banda de estabilização de 0,2 rad. . . . . | 65 |
| Tabela 4.2 – Índices de desempenho por perturbação com banda de estabilização de 0,2 rad.                     | 65 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**BLE** Bluetooth Low Energy

**CEFET-MG** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

**CC** Corrente contínua (em inglês, *Direct Current*)

**CNC** Controle Numérico Computadorizado

**GND** Terra (em inglês, *Ground*)

**I2C** Circuito Inter-Integrado (em inglês, *Inter-Integrated Circuit*)

**LED** Diodo emissor de luz (em inglês, *Light-Emitting Diode*)

**PCI** Placa de circuito impresso

**PID** Proporcional, Integral e Derivativo

**PWM** Modulação por largura de pulso (em inglês, *Pulse Width Modulation*)

**SCL** Clock serial (em inglês, *Serial Clock*)

**SDA** Dados seriais (em inglês, *Serial Data*)

**SRAM** Memória estática de acesso aleatório (em inglês, *Static Random Access Memory*)

**STEAM** Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática (em inglês, *Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics*)

**UART** Receptor/Transmissor Assíncrono Universal (em inglês, *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*)

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                    |                                                                                    |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $F$                | Força gerada pelo conjunto motor-hélice (N)                                        |
| $\tau_F$           | Torque gerado pela força de atuação (N·m)                                          |
| $\tau_g$           | Torque gravitacional (N·m)                                                         |
| $l_1$              | Distância entre o ponto de rotação e o centro de massa do protótipo (m)            |
| $l_2$              | Distância entre o ponto de rotação e o ponto de aplicação da força dos motores (m) |
| $m$                | Massa total do protótipo (kg)                                                      |
| $g$                | Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )                                                |
| $\theta(t)$        | Deslocamento angular do protótipo no domínio do tempo (rad)                        |
| $\dot{\theta}(t)$  | Velocidade angular do protótipo ( $rad/s$ )                                        |
| $\ddot{\theta}(t)$ | Aceleração angular do protótipo ( $rad/s^2$ )                                      |
| $J$                | Momento de inércia do sistema em relação ao eixo de rotação ( $kg \cdot m^2$ )     |
| $\sum \tau$        | Soma dos torques atuantes no sistema (N·m)                                         |
| $t$                | Tempo (s)                                                                          |
| $s$                | Variável complexa da Transformada de Laplace                                       |
| $\Theta(s)$        | Transformada de Laplace do deslocamento angular                                    |
| $F(s)$             | Transformada de Laplace da força aplicada                                          |
| $G(s)$             | Função de transferência da planta                                                  |
| $J_p$              | Momento de inércia equivalente do pêndulo ( $kg \cdot m^2$ )                       |
| $f$                | Frequência natural de oscilação do pêndulo (Hz)                                    |
| $N$                | Número de ciclos ou oscilações observadas                                          |
| $\Delta t$         | Intervalo de tempo correspondente às oscilações medidas (s)                        |
| $\pi$              | Constante matemática Pi                                                            |
| $K_f$              | Ganho experimental de conversão entre PWM e força gerada ( $N/PWM$ )               |
| $U_{PWM}(s)$       | Sinal de controle PWM no domínio de Laplace                                        |
| $\sin(\theta)$     | Função seno do deslocamento angular                                                |
| $\approx$          | Aproximadamente igual                                                              |

## SUMÁRIO

|          |                                                            |           |
|----------|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>                                | <b>16</b> |
| 1.1      | Contextualização . . . . .                                 | 17        |
| 1.2      | Proposta . . . . .                                         | 18        |
| 1.3      | Objetivo Geral . . . . .                                   | 19        |
| 1.4      | Objetivos Específicos . . . . .                            | 19        |
| 1.5      | Estrutura do Trabalho . . . . .                            | 19        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E RECURSOS UTILIZADOS . . . .</b> | <b>21</b> |
| 2.1      | Sistemas dinâmicos . . . . .                               | 21        |
| 2.2      | Modelagem Matemática de Sistemas Mecânicos . . . . .       | 22        |
| 2.3      | Aeropêndulo . . . . .                                      | 23        |
| 2.4      | Estrutura para desenvolvimento de um aeropêndulo . . . . . | 26        |
| 2.5      | Recursos utilizados . . . . .                              | 27        |
| 2.5.1    | ESP32 C3 . . . . .                                         | 28        |
| 2.5.2    | Sensor MPU6050 . . . . .                                   | 29        |
| 2.5.3    | Ponte H e Módulo MX1508 . . . . .                          | 30        |
| 2.5.4    | Reguladores de Tensão LM7805 e XL4015 . . . . .            | 31        |
| 2.5.4.1  | XL4015 . . . . .                                           | 31        |
| 2.5.4.2  | LM7805 . . . . .                                           | 32        |
| 2.5.5    | Optacoplador PC817 . . . . .                               | 33        |
| 2.5.5.1  | Motor CC 8520 . . . . .                                    | 34        |
| 2.6      | Considerações Parciais . . . . .                           | 35        |
| <b>3</b> | <b>DESENVOLVIMENTO . . . . .</b>                           | <b>36</b> |
| 3.1      | Estrutura do corpo principal . . . . .                     | 36        |
| 3.2      | Placa de circuito impresso . . . . .                       | 44        |
| 3.3      | Desafios encontrados . . . . .                             | 53        |
| 3.3.1    | Alimentação . . . . .                                      | 53        |
| 3.3.2    | Envio do sinal PWM . . . . .                               | 54        |
| 3.4      | Modelagem dinâmica do sistema . . . . .                    | 55        |
| 3.5      | Controlador . . . . .                                      | 60        |
| 3.6      | Estimativa de custo do protótipo . . . . .                 | 61        |

|          |                                                                         |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS . . . . .</b>                                             | <b>64</b> |
| 4.1      | Experimento 01 . . . . .                                                | 65        |
| 4.2      | Experimento 02 . . . . .                                                | 66        |
| 4.3      | Experimento 03 . . . . .                                                | 67        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>                         | <b>70</b> |
| 5.1      | Conclusões . . . . .                                                    | 70        |
| 5.2      | Trabalhos futuros . . . . .                                             | 71        |
|          | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>                                            | <b>72</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – CÓDIGO DO CONTROLE ANGULAR DO AEROPÊNDULO . . . . .</b> | <b>74</b> |
|          | <b>APÊNDICE B – CÓDIGO DE CONEXÃO E ENVIO DE DADOS VIA BLE. . . . .</b> | <b>86</b> |
|          | <b>APÊNDICE C – CÓDIGO DE GERAÇÃO DOS GRÁFICOS EMPILHADOS. . . . .</b>  | <b>90</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Um cenário preocupante para a educação brasileira é o baixo desempenho de parte dos estudantes em Leitura, Matemática e Ciências, de acordo com o Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA). O estudo apresenta que 43% dos alunos obtiveram pontuação abaixo do nível mínimo de proficiência nas três disciplinas avaliadas pelo PISA. Esses resultados evidenciam dificuldades na consolidação de conhecimentos e habilidades essenciais para a compreensão de conteúdos, para o raciocínio lógico e para a resolução de problemas, o que impacta diretamente a continuidade da formação escolar e o desenvolvimento profissional (MAIA; CARVALHO; APPELT, 2021).

Diante desse contexto, a abordagem Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática (em inglês, *Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics*) (STEAM) surge como uma alternativa pedagógica relevante por integrar Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática em atividades interdisciplinares e voltadas à investigação. Essa abordagem favorece práticas de tentativa, ajuste e análise de resultados, contribuindo para o desenvolvimento da autonomia, da criatividade e do pensamento crítico, além de favorecer uma aprendizagem mais significativa e alinhada às demandas do processo de ensino (MAIA; CARVALHO; APPELT, 2021).

A educação prática e experimental, muitas vezes chamada de aprendizado "mão na massa", é uma parte importante da formação em engenharia, pois ajuda a aproximar a teoria vista em sala de aula em situações reais. Nesse cenário, manter o engajamento e a motivação dos estudantes ao longo do processo de aprendizagem se torna um desafio, o que reforça a importância de estratégias didáticas mais participativas (OLIVEIRA; MELO; RODRIGUEZ, 2023). Nesse sentido, a cultura *maker*, associada ao "Faça Você Mesmo" (*Do It Yourself*), tem ganhado espaço por incentivar um ensino em que o estudante aprende construindo, testando e melhorando soluções (BARROS, 2025).

A inclusão de atividades práticas ao processo de ensino tem sido apontada como um fator importante para o desenvolvimento de competências relacionadas à resolução de problemas, compreensão de sistemas e aplicação do conhecimento teórico. Estudos na área de educação em engenharia indicam que metodologias baseadas em aprendizagem ativa, quando comparadas a abordagens exclusivamente expositivas, tendem a favorecer o engajamento dos estudantes e podem contribuir para melhorias no aprendizado conceitual e em outros resultados de

aprendizagem, aproximando a formação das demandas técnicas e profissionais contemporâneas (PRINCE, 2004).

Dentro dessa lógica, o movimento *maker* tem sido associado a práticas de aprendizagem baseadas no “fazer”, em que a construção de objetos e a experimentação podem favorecer a colaboração, o engajamento dos estudantes e a articulação entre conhecimentos formais e informais, aproximando-se de princípios de aprendizagem ativa quando adaptadas ao ensino. Assim, a combinação do “mão na massa” com a cultura *maker* formam uma abordagem consistente para a educação em engenharia, pois favorece o desenvolvimento de habilidades técnicas e a compreensão do conteúdo a partir da experimentação e do ciclo de testar, ajustar e aprender (HALVERSON; SHERIDAN, 2014; PRINCE, 2004).

Assim, a proposta deste trabalho é desenvolver uma ferramenta didática de baixo custo, baseada em um pêndulo invertido, para apoiar o estudo de sistemas de controle não lineares ao longo de atividades práticas (montagem, instrumentação, implementação do controle e análise dos resultados), utilizando os conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia de Controle e Automação. Além da finalidade didática, o kit pode ser utilizado para divulgação tecnológica, bem como para a divulgação do curso de engenharia de controle e automação nas escolas da região e em mostras de cursos.

## **1.1 Contextualização**

No contexto nacional, observa-se uma desconexão persistente entre metodologias de ensino tradicionais e as necessidades atuais dos estudantes, tanto no ensino médio quanto no ensino superior. Em muitos casos, os educandos são submetidos a práticas pedagógicas centradas na memorização e na repetição, o que tende a favorecer uma postura passiva no processo de aprendizagem. Nesse cenário, abordagens baseadas em metodologias ativas e em princípios da cultura *maker* têm sido apontadas como alternativas capazes de ampliar o protagonismo discente e tornar a aprendizagem mais significativa (OLIVEIRA; MELO; RODRIGUEZ, 2023; BARROS, 2025).

No ensino de engenharia, e particularmente no estudo de sistemas dinâmicos e controle, essas abordagens mostram-se especialmente relevantes por aproximarem teoria e prática. Embora simulações computacionais sejam amplamente utilizadas como ferramenta de apoio ao ensino, atividades experimentais com protótipos físicos podem favorecer a consolidação dos conceitos e aproximar os estudantes dos desafios encontrados em sistemas reais, como limitações físicas,

incertezas e restrições dos componentes (REVOREDO, 2016).

Entre as plantas clássicas utilizadas nesse contexto, o pêndulo invertido destaca-se por permitir o estudo de equilíbrio e dinâmica em um sistema naturalmente instável e com comportamento não linear, sendo amplamente adotado em projetos e laboratórios de controle (OGATA, 2010). Além disso, variações dessa planta, como o Acrobot, têm sido exploradas em pesquisas voltadas ao desenvolvimento e ao teste de estratégias de controle não linear (SPONG, 1995).

Apesar de sua relevância didática, a implementação de práticas experimentais dessa natureza ainda enfrenta limitações importantes, especialmente em instituições públicas de ensino. A criação e a manutenção de laboratórios especializados, bem como a aquisição de equipamentos didáticos, exigem investimentos significativos em infraestrutura e materiais, o que muitas vezes restringe o acesso dos estudantes a experiências práticas mais completas (GIRÓN-SIERRA; CHERKI; CRUZ, 2001; REVOREDO, 2016). Diante disso, torna-se pertinente o desenvolvimento de ferramentas didáticas de baixo custo, capazes de aproximar o estudante da realidade experimental do controle de sistemas dinâmicos e não lineares.

## 1.2 Proposta

A proposta deste trabalho é desenvolver um kit didático prático e acessível para apoiar o ensino de controle e estabilidade de sistemas dinâmicos, com foco no controle de equilíbrio do pêndulo invertido.

A ideia é que o kit funcione como um complemento ao conteúdo teórico, permitindo que os alunos aprendam de forma mais ativa, testando na prática conceitos de modelagem, instrumentação e controle em um sistema físico real. Além disso, por seguir uma lógica de aprendizagem “mão na massa” próxima à cultura *maker*, o projeto busca estimular tanto *soft skills* (como criatividade, autonomia e pensamento crítico) quanto *hard skills* ligadas ao desenvolvimento do protótipo, como modelagem e impressão 3D, montagem de circuitos, programação de microcontroladores, integração de sensores/atuadores, eletrônica básica (incluindo solda, quando aplicável), sistema de alimentação, e a implementação e análise de estratégias de controle.

### **1.3 Objetivo Geral**

Desenvolver um kit didático de baixo custo, baseado em um pêndulo invertido aeropropelido, para apoiar a compreensão e a prática do controle de equilíbrio em sistemas dinâmicos.

### **1.4 Objetivos Específicos**

Na Tabela 1.1 são mostrados os objetivos específicos e uma breve descrição de maneira a atingir o objetivo geral deste trabalho.

### **1.5 Estrutura do Trabalho**

Inicialmente, apresenta-se a estrutura do trabalho, com uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica necessária a compreensão deste trabalho, com uma breve descrição de sistemas dinâmicos e do aeropêndulo. Em seguida são apresentados os recursos de hardware selecionados para o desenvolvimento do trabalho.

Na sequência, com base nesses fundamentos teóricos e nos recursos definidos, o Capítulo 3 descreve as etapas de desenvolvimento do protótipo. Inicialmente é descrita a modelagem 3D e a execução por meio da impressão 3D e montagem da estrutura. Posteriormente, são descritos os circuitos de sensoramento, processamento e atuação, bem como a placa de circuito impresso desenvolvida.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos para diferentes ganhos do controlador PID. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como sugestões de trabalhos futuros.

Tabela 1.1 – Objetivos específicos.

| <b>Objetivos específicos</b>                                            | <b>Método</b>                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Revisão bibliográfica                                                   | Pesquisa de artigos científicos acerca do tema.                                                            |
| Desenvolvimento da modelagem 3D do protótipo                            | Criar modelos tridimensionais precisos para a fabricação do kit didático.                                  |
| Impressão 3D do protótipo                                               | Utilizar tecnologias de impressão 3D para produzir componentes do kit de forma acessível e personalizável. |
| Seleção do microcontrolador                                             | Escolher o microcontrolador adequado para o controle do sistema dinâmico.                                  |
| Desenvolvimento da Placa de circuito impresso (PCI)                     | Projetar a PCI e modelar os componentes necessários utilizando o software Proteus.                         |
| Usinagem da PCI                                                         | Realizar a usinagem da placa para garantir a precisão e a funcionalidade dos circuitos.                    |
| Sistema de alimentação do protótipo                                     | Definição de um sistema de alimentação eficaz e seguro para o protótipo.                                   |
| Modelagem da dinâmica estudada                                          | Elaborar modelo matemático da dinâmica do sistema para estudo e controle.                                  |
| Desenvolver a malha de controle                                         | Projetar e implementar a malha de controle necessária para estabilizar o protótipo.                        |
| Desenvolver o código para implementação do controle no microcontrolador | Implementar o algoritmo de controle desenvolvido no microcontrolador selecionado.                          |
| Resultados experimentais                                                | Obter resultados experimentais do protótipo desenvolvido.                                                  |

Fonte: Próprio Autor.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E RECURSOS UTILIZADOS**

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são discutidos conceitos relacionados aos sistemas dinâmicos, por se tratar da base teórica necessária para a análise de sistemas com comportamento não linear, como o aeropêndulo. Em seguida, são abordadas plantas didáticas aplicadas ao ensino de controle, com destaque para dispositivos experimentais de baixo custo voltados à formação em engenharia. Por fim, são apresentados aspectos relacionados ao pêndulo invertido e ao aeropêndulo, enfatizando suas características dinâmicas, sua relevância no estudo de sistemas de controle e sua aplicação como plataforma experimental.

### **2.1 Sistemas dinâmicos**

De acordo com (OGATA, 2010), os sistemas dinâmicos constituem a base para a análise e a modelagem em engenharia de controle, pois descrevem fenômenos cujo comportamento evolui ao longo do tempo. Muitos sistemas físicos podem ser representados por equações matemáticas obtidas a partir das leis que regem sua dinâmica, como as leis de Newton em sistemas mecânicos e as leis de Kirchhoff em sistemas elétricos. Em (OGATA, 2010) define-se que um sistema dinâmico pode ser entendido como um sistema cujo comportamento varia no tempo onde a resposta depende não apenas das excitações aplicadas, mas também de sua condição interna. Assim, um modelo matemático de um sistema dinâmico é um conjunto de equações que representa sua dinâmica com exatidão ou, ao menos, de forma suficientemente aproximada para fins de análise.

Além disso, um mesmo sistema físico pode admitir diferentes modelos matemáticos, dependendo da perspectiva adotada e do objetivo da análise. Em razão disso, a modelagem exige um compromisso entre simplicidade e precisão, já que modelos mais simples facilitam a análise, enquanto modelos mais completos tendem a representar melhor o comportamento real do sistema. A representação matemática de sistemas físicos pode ser feita por diferentes formas, conforme a natureza do problema e o tipo de análise desejada. Entre as formas mais usuais estão as equações diferenciais, a função de transferência e a representação no espaço de estados.

Assim, a modelagem matemática fornece a base necessária para a análise do comportamento dinâmico e para o desenvolvimento posterior de técnicas de controle aplicadas ao sistema estudado.

## 2.2 Modelagem Matemática de Sistemas Mecânicos

Esta seção foi baseada em (NISE, 2013), que destaca a modelagem matemática de sistemas mecânicos como uma etapa importante na análise de sistemas dinâmicos, pois permite descrever o comportamento de grandezas físicas por meio de equações. Na engenharia de controle, essa modelagem é utilizada para representar a dinâmica do sistema e servir de base para análises posteriores, como estabilidade, resposta dinâmica e projeto de controladores.

De acordo com Nise, os sistemas mecânicos podem ser estudados a partir das leis de Newton, considerando os elementos que compõem o sistema e as interações entre eles. Nos sistemas translacionais, essa formulação é feita pela relação entre força e deslocamento linear, envolvendo elementos como massa, mola e amortecedor viscoso, como o apresentado na Figura 2.1(a).

Para um sistema massa-mola-amortecedor, uma forma clássica de representação é dada por:

$$m\ddot{y}(t) + b\dot{y}(t) + ky(t) = u(t),$$

onde  $m$  representa a massa,  $b$  o coeficiente de amortecimento viscoso,  $k$  a constante elástica da mola,  $y(t)$  o deslocamento e  $u(t)$  a força aplicada ao sistema.

De forma semelhante, os sistemas mecânicos rotacionais são modelados trocando-se a força pelo torque e o deslocamento linear pelo deslocamento angular. Nessa abordagem, a inércia desempenha papel análogo ao da massa, enquanto a mola torsional e o amortecimento viscoso rotacional representam os efeitos restaurador e dissipativo do sistema, como o apresentado na Figura 2.1(b).

Assim, uma forma geral de representação de um sistema rotacional de um grau de liberdade pode ser escrita como:

$$J\ddot{\theta}(t) + D\dot{\theta}(t) + K\theta(t) = T(t),$$

sendo  $J$  o momento de inércia,  $D$  o coeficiente de amortecimento viscoso rotacional,  $K$  a constante elástica torsional,  $\theta(t)$  o deslocamento angular e  $T(t)$  o torque aplicado.

Além disso, Nise destaca que a obtenção das equações de movimento pode ser feita a partir de diagramas de corpo livre, tanto para sistemas translacionais quanto rotacionais. Em sistemas com mais de um grau de liberdade, essa modelagem pode levar a equações simultâneas, evidenciando o acoplamento entre os elementos mecânicos.

Figura 2.1 – Representação de sistema dinâmico: (a) translacional, (b) rotacional.



Fonte: Próprio Autor.

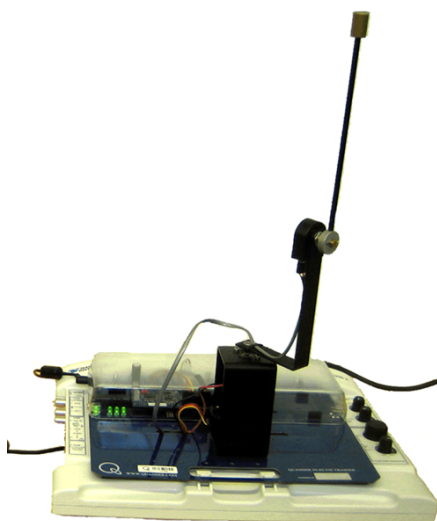
No contexto deste trabalho, essa discussão é importante porque o aeropêndulo pode ser interpretado como um sistema mecânico rotacional acionado por torque de motor e sujeito à ação da gravidade e de perturbações externas.

### 2.3 Aeropêndulo

Como referência para este trabalho, considera-se o experimento *Rotary Inverted Pendulum* (ROTPENT), apresentado no guia prático trazido em (Quanser Inc., 2009). Esse equipamento é utilizado como plataforma didática para o estudo de sistemas de controle, por reunir em um mesmo arranjo a atuação do motor, a medição do movimento e o desafio de estabilização de um sistema naturalmente instável.

De forma geral, o kit didático é composto por um motor montado verticalmente, um braço em formato de L acoplado ao eixo do motor e um pêndulo suspenso na extremidade desse braço, conforme mostrado na Figura 2.2. O ângulo do pêndulo é medido por um *encoder*, enquanto o acionamento do motor é realizado por meio de um sinal Modulação por largura de pulso (em inglês, *Pulse Width Modulation*) (PWM). Dessa maneira, o experimento permite observar, na prática, como o controle atua sobre o movimento do sistema.

Figura 2.2 – *Rotary Inverted Pendulum (ROTPENT)*



Fonte: Adaptado de (Quanser Inc., 2009).

O guia também apresenta o pêndulo como um exemplo de problema clássico de controle, semelhante ao de um guindaste, no qual o objetivo é reduzir oscilações e manter a carga sob controle durante o movimento. Além disso, o material destaca a importância da modelagem do sistema e da análise do seu comportamento para a definição de estratégias de controle.

O ROTPENT se mostra uma referência relevante para este trabalho por reunir conceitos de estabilidade, movimentação e controle em uma aplicação didática e experimental, servindo como base comparativa para o desenvolvimento do aeropêndulo proposto.

No trabalho (NETO et al., 2023), foi desenvolvida uma plataforma didática de baixo custo baseada em um aeropêndulo para aplicação em disciplinas de Engenharia de Controle. A estrutura proposta pelos autores é composta por uma haste de fibra de carbono, um motor CC do tipo *coreless* com hélice, um potenciômetro multivoltas para medição da posição angular e uma estrutura mecânica construída em acrílico. O acionamento do motor é realizado por modulação por largura de pulso, permitindo controlar a tensão média aplicada ao atuador.

A modelagem do aeropêndulo foi desenvolvida a partir da dinâmica rotacional do sistema, considerando a ação da gravidade, o momento de inércia e a força de empuxo produzida pelo conjunto motor-hélice. Os autores também realizaram a caracterização experimental da relação entre a tensão aplicada ao motor e a força produzida pela hélice, identificando regiões de zona morta, comportamento aproximadamente linear e saturação. Essa análise evidencia que, embora

seja possível utilizar modelos simplificados para o projeto de controladores, características não lineares do atuador devem ser consideradas durante a implementação prática.

A plataforma foi validada experimentalmente com um controlador proporcional-integral implementado por circuitos com amplificadores operacionais. Além da validação do protótipo, os autores propõem práticas envolvendo identificação de sistemas, projeto e sintonia de controladores clássicos, comparação entre respostas subamortecidas e superamortecidas e análise experimental de não linearidades. Dessa forma, o trabalho demonstra o potencial do aeropêndulo como recurso didático para aproximar conteúdos teóricos de situações práticas de controle.

Outro exemplo de aeropêndulo de baixo custo é apresentado por Fernandes, Sartin e Melo (FERNANDES; SARTIN; MELO, 2025). Os autores desenvolveram um protótipo formado por uma base fixa e um braço rotativo acionado por um motor CC com hélice acoplada. A posição angular é medida por um potenciômetro rotativo, enquanto a estratégia de controle é implementada em um Arduino Uno, que envia o sinal PWM para uma ponte H responsável pelo acionamento do motor.

A estrutura mecânica do protótipo foi projetada em ambiente CAD e fabricada por impressão 3D utilizando filamento PLA. A modelagem matemática foi obtida a partir da Segunda Lei de Newton aplicada ao movimento rotacional e, em seguida, linearizada para permitir a obtenção de uma função de transferência de segunda ordem. Com base nesse modelo, os autores ajustaram um controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID) em ambiente MATLAB/Simulink e o implementaram experimentalmente no protótipo.

Nos testes realizados por Fernandes, Sartin e Melo (FERNANDES; SARTIN; MELO, 2025), o sistema foi submetido a referências angulares de 30, 60 e 90 graus. Os resultados indicaram que o controlador PID foi capaz de estabilizar o aeropêndulo com tempo de subida inferior a 3 segundos e erro em regime permanente próximo de zero. O trabalho reforça a viabilidade da utilização de componentes acessíveis, impressão 3D e microcontroladores no desenvolvimento de plantas didáticas para o estudo de sistemas de controle.

Os exemplos apresentados demonstram que os aeropêndulos podem assumir diferentes configurações mecânicas, de sensoriamento e de atuação, mantendo como característica comum a utilização de uma força de empuxo para controlar a posição angular de uma haste. Nesse contexto, o protótipo desenvolvido neste trabalho se insere como uma alternativa de baixo custo voltada ao ensino de controle, utilizando motores CC com hélices, acionamento por PWM, microcontrolador e sensor inercial para a medição da posição angular. Além disso, a estrutura

proposta permite relacionar conceitos de modelagem dinâmica, identificação de parâmetros, projeto de controladores e validação experimental em uma mesma plataforma.

## **2.4 Estrutura para desenvolvimento de um aeropêndulo**

A partir dos trabalhos apresentados na seção 2.3, a descrição geral de quais elementos são necessários para a construção de um protótipo do tipo aeropêndulo se tornou relevante. Essa visão inicial permite compreender o sistema como um conjunto integrado de subsistemas mecânicos, eletrônicos e computacionais, que precisam atuar de maneira coordenada para viabilizar o protótipo proposto.

De modo geral, um aeropêndulo didático deve possuir uma estrutura mecânica capaz de sustentar o corpo e permitir sua rotação em torno de um eixo ou ponto de apoio. Essa estrutura precisa garantir rigidez suficiente para suportar os esforços gerados durante o funcionamento. No caso de protótipos com finalidade educacional, essa etapa também deve considerar aspectos como baixo custo, facilidade de fabricação, montagem e manutenção, especialmente quando se busca uma solução acessível para uso em atividades de ensino.

Além da estrutura física, o sistema necessita de um mecanismo de atuação responsável por gerar o torque capaz de se contrapor ao movimento do protótipo. No aeropêndulo, essa atuação pode ser realizada por motores com hélices, cuja força produzida permite aplicar o esforço necessário para deslocar o sistema e buscar sua estabilização em torno da posição de equilíbrio. Esse arranjo torna o experimento particularmente interessante do ponto de vista didático, pois permite observar, de forma prática, a relação entre comando, resposta dinâmica e ação de controle em um sistema naturalmente instável.

Outro elemento essencial é o sistema de sensoriamento, responsável por fornecer ao controlador informações sobre o posicionamento angular em tempo real. Em aplicações como esta, a medição do ângulo de inclinação é fundamental, uma vez que o objetivo do controle está diretamente ligado à correção da angulação buscando o equilíbrio do protótipo em uma determinada posição de referência. A qualidade dessa medição influencia diretamente o desempenho do sistema, já que ruídos, atrasos ou desvios acumulados podem comprometer a resposta dinâmica e dificultar a estabilização.

Para que os sinais medidos possam ser utilizados adequadamente, também é necessária uma unidade de processamento capaz de realizar a leitura dos sensores, executar o algoritmo de

controle e enviar os sinais de acionamento aos atuadores. Nesse contexto, o microcontrolador assume esse papel no funcionamento do protótipo, pois é nele que se concentra a lógica do controlador do sistema.

Da mesma forma, a construção do protótipo exige uma etapa eletrônica de acionamento e fornecimento de energia para os componentes utilizados. Isso inclui o uso de circuitos de potência para acionamento dos motores e fontes ou reguladores capazes de fornecer os níveis de tensão adequados para sensores, microcontrolador e atuadores.

Assim, o desenvolvimento de um aeropêndulo didático depende apenas da escolha coerente entre estrutura mecânica, atuação, sensoramento, processamento e alimentação. No caso deste trabalho, essa organização serviu como base para o desenvolvimento do protótipo proposto, permitindo definir os recursos necessários para sua implementação e para a posterior realização dos ensaios experimentais. A partir dessa visão geral, a próxima seção apresenta os componentes e recursos utilizados no desenvolvimento do sistema.

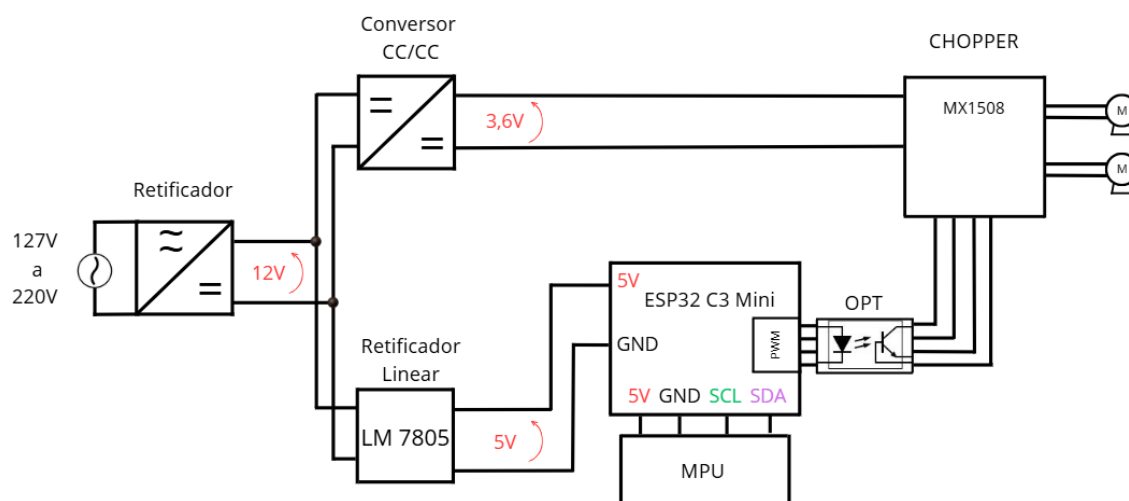
## **2.5 Recursos utilizados**

Nesta seção está sendo apresentado os componentes utilizados, bem como suas características e funcionalidade. A Figura 2.3 apresenta uma configuração ilustrativa do posicionamento dos componentes e de suas ligações elétricas básicas, apenas para facilitar a interpretação do protótipo. É importante destacar que essa representação não corresponde ao circuito completo, já que a montagem real depende de outros componentes de apoio. O circuito detalhado está apresentado na seção 3.4.

O circuito é alimentado em 127 V em corrente alternada. Um retificador converte para 12 V em corrente contínua. Os 12 V cc são convertidos para 3,6 V cc, que irá alimentar o Chopper, sendo ele um conversor CC-CC utilizado para controlar o acionamento dos motores por meio de chaveamento em alta frequência, a partir dos sinais PWM aplicados ao sistema. A tensão de 12 V cc também é convertida por um regulador linear (LM 7805) para alimentar em 5 V o microcontrolador (ESP32 C3 Mini) e o sensor de ângulo (MPU). Os sinais para acionamento dos motores são isolados opticamente pelo uso do circuito integrado PC817. Cabe destacar que o projeto permite a conexão de até quatro motores, isto se torna especialmente interessante caso o kit seja adaptado para possuir apenas um ponto de apoio (atualmente são dois), aumentando o grau de liberdade do movimento do pêndulo.

Nas próximas seções serão apresentados separadamente os elementos descritos no parágrafo anterior.

Figura 2.3 – Ilustração das ligações elétricas e posicionamento dos componentes.



Obs.: A placa comporta o acionamento de até 4 motores. No protótipo foram utilizados 2.

Fonte: Próprio Autor.

### 2.5.1 ESP32 C3

O microcontrolador utilizado para leitura do sensor, processamento e atuação no protótipo é o XIAO ESP32C3, da *Seeed Studio*. Consiste em uma placa de desenvolvimento compacta voltada a aplicações embarcadas e projetos de Internet das Coisas, conforme exibido na Figura 2.4. Baseado no microcontrolador ESP32-C3, o dispositivo possui processador RISC-V de 32 bits, operando em até 160 MHz, além de conectividade Wi-Fi 2,4 GHz e Bluetooth Low Energy (BLE) 5.0, características que o tornam adequado a sistemas que demandam comunicação sem fio e baixo consumo de energia. A placa dispõe ainda de 400 KB de Memória estática de acesso aleatório (em inglês, *Static Random Access Memory*) (SRAM), 4 MB de memória Flash, 11 pinos digitais (GPIO), 4 pinos analógicos e interfaces como Receptor/Transmissor Assíncrono Universal (em inglês, *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) (UART) e Circuito Inter-Integrado (em inglês, *Inter-Integrated Circuit*) (I2C), oferecendo flexibilidade para integração com sensores e demais periféricos. Seu tamanho reduzido e sua eficiência energética fazem do XIAO ESP32C3 uma solução apropriada para projetos compactos, portáteis e com necessidade de processamento embarcado (Seeed Studio, 2024).

Figura 2.4 – XIAO ESP 32 C3.



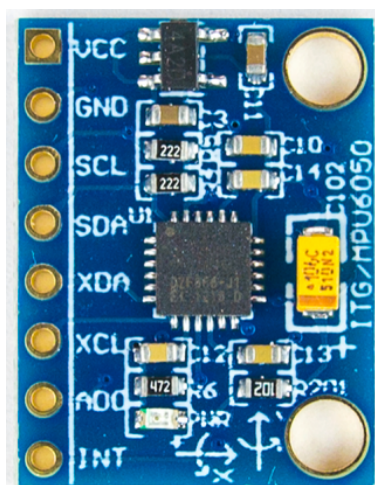
Fonte: (Seeed Studio, 2024)

### 2.5.2 Sensor MPU6050

O MPU6050 é um sensor inercial que permite medição de movimento e orientação angular por integrar, em um único chip, um acelerômetro e um giroscópio com medição em três eixos ( $X, Y, Z$ ). Uma fotografia do MPU6050 é exibida na Figura 2.5. Além disso, sua comunicação com o microcontrolador pode ser realizada por meio do protocolo I2C, o que facilita sua integração em projetos de controle e automação.

De acordo com (VARASCHIM et al., 2022), o MPU6050 é um dos sensores mais populares para detecção de ângulo de inclinação e velocidade angular, sendo empregado em aplicações que demandam monitoramento de movimento e posição. Os autores destacam que o acelerômetro fornece informações sujeitas a ruídos, enquanto o giroscópio apresenta tendência ao acúmulo de desvio ao longo do tempo, o que deve ser considerado no processamento dos dados do sensor.

Figura 2.5 – Sensor MPU6050.



Fonte: Próprio Autor.

No protótipo desenvolvido, o MPU6050 é utilizado para realizar a leitura da inclinação e da movimentação do sistema, fornecendo as variáveis necessárias para a lógica de controle implementada no microcontrolador. Dessa forma, o sensor exerce papel fundamental na obtenção dos dados de orientação, que são processados para apoiar a atuação do sistema sobre os motores.

### 2.5.3 Ponte H e Módulo MX1508

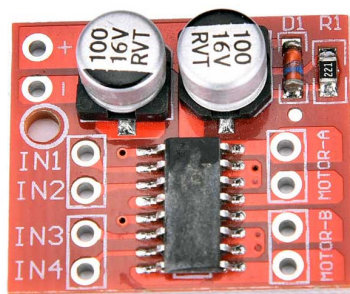
A ponte H é uma topologia eletrônica amplamente empregada no acionamento de motores de corrente contínua, pois permite controlar o sentido de rotação por meio da inversão da polaridade aplicada aos terminais do motor. Além disso, esse tipo de circuito pode ser utilizado no controle de velocidade por PWM, constituindo uma solução recorrente em sistemas de controle de motores de Corrente contínua (em inglês, *Direct Current*) (CC) (CHEN; LIN, 2013).

A placa MX1508, um módulo *driver* baseado em ponte H dupla, indicado para o acionamento de motores CC de pequeno porte. De acordo com (DroneBot Workshop, 2023), a MX1508 possui quatro entradas de controle, duas para cada canal, permitindo o acionamento de dois motores e a aplicação de sinais PWM diretamente nas entradas do módulo. A mesma referência destaca ainda que esse *driver* é voltado a motores pequenos, inclusive em faixas de tensão reduzidas, o que o torna apropriado para aplicações compactas e embarcadas. Uma fotografia do módulo MX1508 é exibida na Figura 2.6.

A folha de dados (Components101, 2021) indica que o módulo opera, em geral, com tensão de alimentação entre 2 V e 10 V e suporta corrente típica de aproximadamente 1,5 A por canal, podendo atingir valores de pico próximos de 2,5 A em determinadas condições de operação. Outra característica relevante é sua construção compacta, que favorece a aplicação em placas e protótipos com restrição de espaço físico. Além disso, o módulo permite controle bidirecional dos motores, bem como ajuste de velocidade por sinais PWM, atuando como interface entre os sinais lógicos do microcontrolador e a potência exigida pelos atuadores eletromecânicos.

Neste trabalho os motores manterão um único sentido de giro, ou seja, sem reversão. Nesta configuração é possível acionar até 4 motores com um único módulo.

Figura 2.6 – Motor *Driver* CC MX1508.



Fonte: (Components101, 2021)

## 2.5.4 Reguladores de Tensão LM7805 e XL4015

Reguladores de tensão são circuitos montados para manter a tensão de saída em um valor adequado para a carga, mesmo diante de variações na tensão de entrada e nas condições de operação. No caso dos conversores CC-CC do tipo buck, essa regulação é obtida por comutação eletrônica, sendo essa topologia amplamente utilizada em aplicações industriais, sistemas embarcados, microcontroladores e telecomunicações devido à sua elevada eficiência, baixo custo, confiabilidade e simplicidade estrutural (MOHAMMED; KHALAF, 2024). Há ainda os reguladores lineares, na qual a eficiência é reduzida com o aumento da corrente, ou quando a diferença de potência entre entrada e saída se eleva.

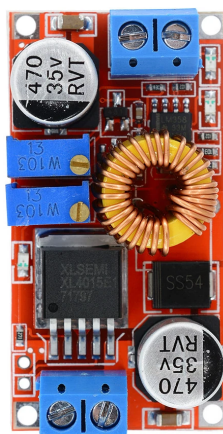
### 2.5.4.1 XL4015

Segundo (MOHAMMED; KHALAF, 2024), o conversor buck é um regulador chaveado do tipo abaixador de tensão, isto é, fornece à carga uma tensão de saída inferior à tensão de

entrada, podendo manter a regulação por meio de uma malha de controle apropriada. Em sua configuração básica, esse tipo de regulador é composto por uma chave eletrônica, indutor, capacitor e diodo, sendo o indutor e o capacitor responsáveis pelo armazenamento de energia e pela redução de ondulações na saída. Além disso, o funcionamento do conversor está associado ao chaveamento periódico do transistor com determinada razão cíclica, de modo que o valor médio da tensão de saída possa ser ajustado conforme a necessidade da aplicação.

No presente trabalho, foi utilizado o módulo XL4015 de 5 A, ajustado para fornecer 3 V à parte de potência do sistema, podendo ser alimentado por bateria externa ou por fonte de tensão contínua. De acordo com a folha de dados do componente, o XL4015 é um conversor buck com frequência fixa de 180 kHz, faixa de entrada de 8 V a 36 V e tensão de saída ajustável entre 1,25 V e 32 V (dependendo da tensão de alimentação), sendo capaz de fornecer corrente de saída de até 5 A (XLSEMI, 2015). A documentação também informa que o módulo apresenta eficiência de até 96%, baixa ondulação de saída, proteção térmica interna, limitação de corrente e proteção contra curto-circuito, características relevantes para aplicações que exigem alimentação regulada com boa capacidade de corrente.

Figura 2.7 – Regulador de tensão XL4015.



Fonte: Próprio Autor.

#### 2.5.4.2 LM7805

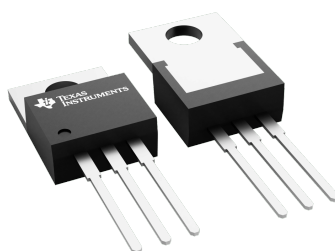
Complementando o circuito de alimentação, foi utilizado o regulador de tensão LM7805 com tensão de entrada tipicamente na faixa de 7 V a 20 V e corrente de saída de até 1,5 A. No presente trabalho, o LM7805 recebe 12 V cc na entrada e disponibiliza 5 V cc regulados na saída para o microcontrolador e sensor. Diferentemente do XL4015, que trabalha como

conversor chaveado do tipo buck, o LM7805 é um regulador linear de três terminais, empregado em aplicações que exigem simplicidade de implementação e tensão de saída estável (Texas Instruments, 2023).

De acordo com a documentação esse regulador fornece tensão fixa de 5 V e possui recursos internos de proteção, como limitação de corrente e desligamento por sobretemperatura, o que aumenta sua confiabilidade em aplicações. Como, neste trabalho, sua utilização é destinada apenas à alimentação de um sensor e de um microcontrolador, concluiu-se que esse regulador atende de forma satisfatória às necessidades do projeto

A escolha do circuito de alimentação ser diferente para o LM7805 e XL4015 se deve ao fato da tensão de alimentação dos motores ser diferente da tensão de alimentação do ESP32 C3. Além disso, os motores drenam uma corrente elevada fazendo com que haja um afundamento da tensão de alimentação de 5 V, levando o ESP32 C3 a reiniciar. Devido a isso, optou-se por circuitos distintos de alimentação na forma paralela.

Figura 2.8 – Regulador de tensão LM7805.



Fonte: (Texas Instruments, 2024)

### 2.5.5 Optacoplador PC817

O PC817 é um optacoplador utilizado para isolar eletricamente dois circuitos, permitindo a transferência de sinal sem contato elétrico direto entre entrada e saída (Sharp Corporation, 2023). Como mostra sua folha de dados, o funcionamento baseia-se em um diodo emissor de infravermelho e um fototransistor encapsulados no mesmo componente. Onde a corrente que flui pelo Diodo emissor de luz (em inglês, *Light-Emitting Diode*) (LED) interno, emite uma luz que sensibiliza a base do fototransistor, fazendo com que o fototransistor conduza, promovendo isolamento ótico entre as partes. Esse princípio é útil em aplicações nas quais se deseja proteger circuitos de controle contra ruídos, surtos ou diferenças de potencial provenientes da etapa de potência.

Do ponto de vista técnico, o PC817 é um optacoplador de 4 pinos com tensão de isolamento entre entrada e saída da ordem de 5 kV RMS, tensão coletor-emissor de até 80 V e razão de transferência de corrente tipicamente especificada em faixas a partir de 50% para corrente de entrada de 5 mA, a depender da classe do dispositivo. Essas características tornam o componente adequado para interfaces entre sinais lógicos e circuitos submetidos a maiores níveis de tensão ou interferência, preservando a integridade do estágio de controle (Sharp Corporation, 2023).

Figura 2.9 – Optacoplador PC 817.



Fonte: (Sharp Corporation, 2023)

#### 2.5.5.1 Motor CC 8520

O motor CC 8520-Q-2 utilizado neste trabalho é um motor de corrente contínua do tipo *coreless*, caracterizado por dimensões reduzidas e baixa massa, o que o torna adequado para aplicações compactas e embarcadas (TRONSUN MOTOR, s.d.). De acordo com a folha de dados do fabricante, esse modelo opera na faixa de 1,5 V a 4,0 V, possui tensão nominal de 3,7 V, velocidade sem carga de 52 000 rpm e corrente sem carga de 0,18 A. Na condição de máxima eficiência, o documento informa velocidade de 45 150 rpm, corrente de 1,18 A, torque de 0,51 mN·m e potência de saída de 2,41 W, enquanto em condição de travamento o torque chega a 3,88 mN·m com corrente de 7,8 A.

Além do desempenho elétrico e mecânico, a folha de dados informa que o motor pertence à família de motores *coreless* de 8 mm, apresentando massa aproximada de 5,1 g e dimensões compatíveis com aplicações em dispositivos leves e de pequeno porte (TRONSUN MOTOR, s.d.). Esse tipo de motor é frequentemente empregado em modelos controlados remotamente, brinquedos eletrônicos e pequenos produtos eletrônicos, o que reforça sua adequação a sistemas em que há restrição de espaço e massa (TRONSUN MOTOR, s.d.).

Figura 2.10 – Motor CC 8520.



Fonte: Próprio Autor.

## 2.6 Considerações Parciais

Com base nos conceitos apresentados ao longo deste capítulo, observa-se que o desenvolvimento do protótipo exige não apenas a compreensão da dinâmica do sistema e da estrutura física e eletrônica empregada, mas também a definição de uma estratégia de controle capaz de atuar sobre o erro de inclinação do aeropêndulo. Nesse contexto, destaca-se o controlador PID, amplamente utilizado em aplicações de controle por combinar ações proporcional, integral e derivativa, permitindo atuar sobre a resposta transitória e sobre o erro em regime. No presente trabalho, essa estratégia foi adotada para o rastreamento do ângulo de referência e para a estabilização do protótipo em torno do ponto de equilíbrio. Assim, os fundamentos discutidos neste capítulo servem de base para a etapa de desenvolvimento apresentada no capítulo seguinte, bem como para a análise dos resultados experimentais obtidos com diferentes ajustes dos ganhos do controlador.

### 3 DESENVOLVIMENTO

O trabalho realizado consiste no desenvolvimento de um protótipo para estudo de controle de equilíbrio de um sistema instável, utilizando o modelo de aeropêndulo como inspiração, a dinâmica fundamental segue o princípio de funcionamento de pêndulo invertido. A estrutura e o funcionamento básico estão descritos a seguir.

#### 3.1 Estrutura do corpo principal

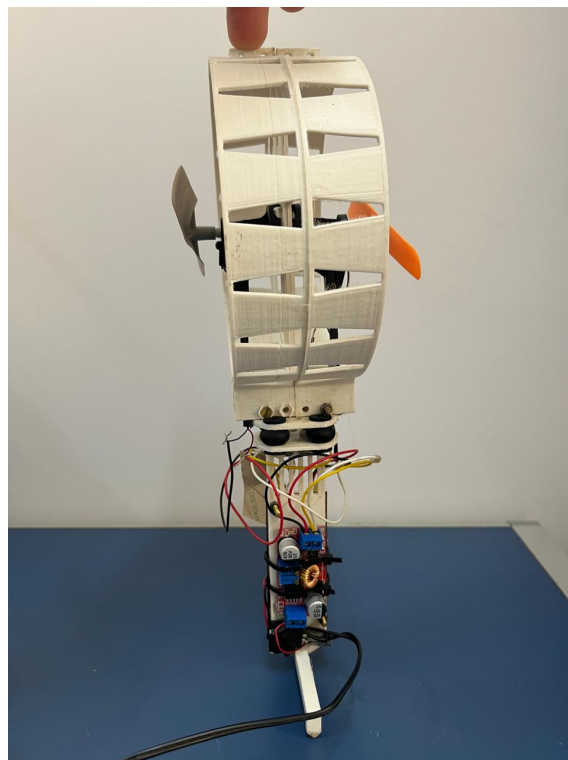
Toda a estrutura foi modelada no formato 3D utilizando o software Inventor pertencente a Autodesk com licença para estudante, e a estrutura foi fabricada por uma impressora 3D no material ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) disponível no laboratório de pesquisa do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) Campus Leopoldina. Como mostra a Figura ??, o corpo do projeto da parte mais inferior (pé) ao suporte que é posicionado as borrachas anti-vibração possui 13,7 cm de altura, 3 cm de largura na parte central onde são acoplados a placa de circuito impresso e o regulador de tensão e a espessura desse corpo é de 0,9 cm. Além disso, o pé foi projetado com dois pontos de apoio, dotados de pontas emborrachadas, a fim de garantir apenas um grau de liberdade ao movimento do sistema. A parte superior foi projetada para receber o suporte de fixação dos motores, um raio suficiente para que o diâmetro de giro das hélices não seja interrompido por esbarrar na parede do suporte.

Na imagem, é possível observar uma hélice em cada extremidade do eixo, posicionadas em sentidos opostos. O giro dos motores fazem com que a massa de ar seja empurrada contra pêndulo, ou seja, para fora do pêndulo empurrando ele contra o sentido de sua "queda". O único detalhe estrutural que não foi projetado e fabricado pelo estudante foi o suporte de fixação dos motores e hélice, bem como seu jogo de engrenagens de 0,3 cm no eixo do motor e 1,8 cm na engrenagem acoplada com a hélice. A fixação entre a parte superior, onde estão instalados os motores, e a parte inferior, que constitui o corpo principal, é realizada por meio de borrachas antivibração. A seguir, são apresentadas as modelagens das partes que compõem a estrutura física, seguidas de suas respectivas vistas técnicas com as dimensões cotadas.

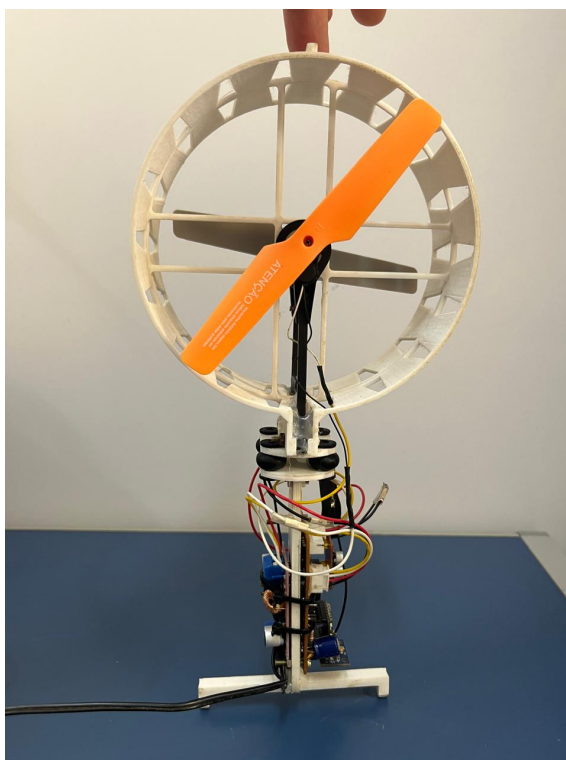
Figura 3.1 – Protótipo montado: a) Vista lateral esquerda, b) Vista frontal, c) Vista lateral direita.



a)



b)



c)

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 3.2 ilustra a modelagem final do apoio utilizado para suportar toda a planta desenvolvida, além de permitir que a dinâmica do movimento seja apenas em um grau de

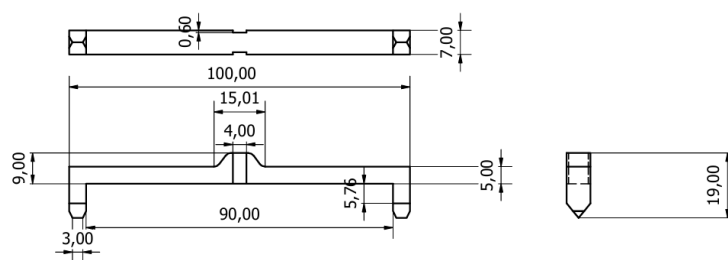
liberdade. Posteriormente, a Figura 3.3 trás as vistas técnicas e suas cotas e unidade de medida em milímetros.

Figura 3.2 – Modelagem 3D do apoio duplo.



Fonte: Próprio Autor.

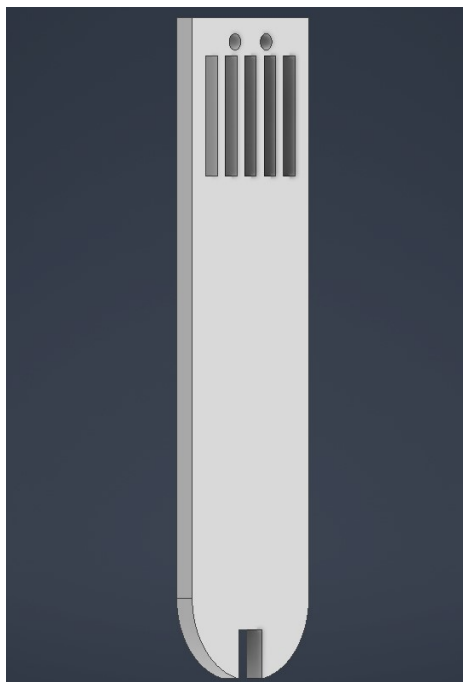
Figura 3.3 – Vistas técnicas do apoio duplo.



Fonte: Próprio Autor.

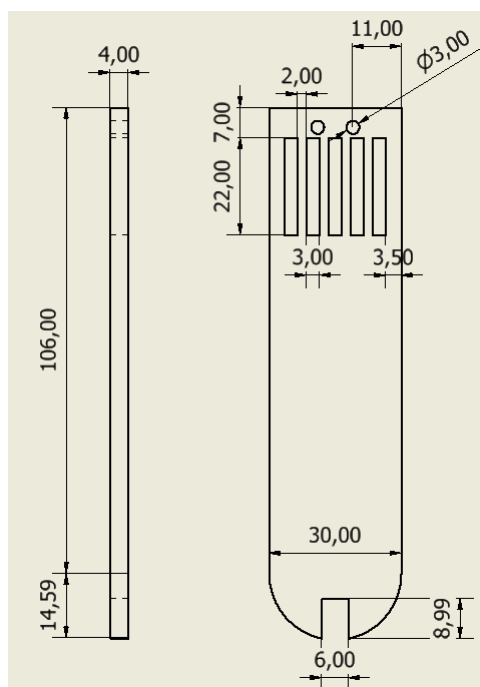
A Figura 3.4 mostra a estrutura 3D finalizada e pronta para impressão. Nesta parte do protótipo ficam alocados a placa de circuitos impressa de um dos lados, e os reguladores de tensão do outro, buscando sempre o equilíbrio das massas. A Figura 3.5 apresenta as vistas deste corpo principal, contendo suas cotas. É importante ressaltar que o modelo é simétrico, e essa consideração deve ser levada em consideração em caso de futuras reproduções desta planta de estudo.

Figura 3.4 – Modelagem final do corpo principal.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 3.5 – Vistas técnicas do corpo principal.

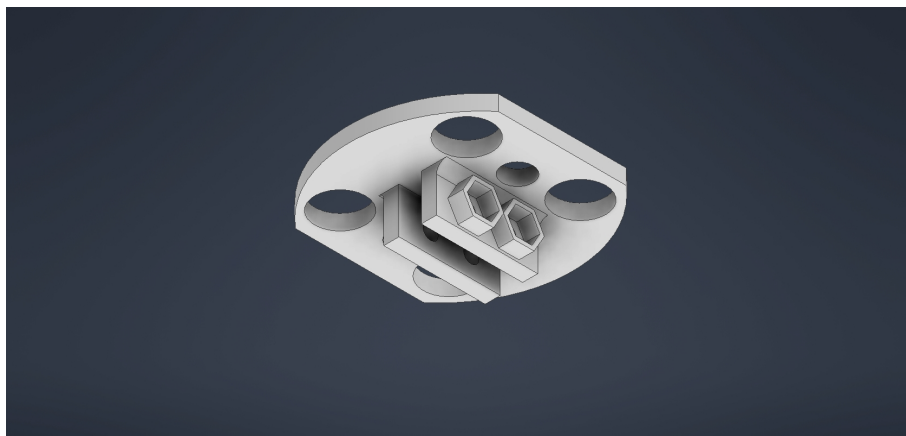


Fonte: Próprio Autor.

A Figura 3.6 apresenta o suporte inferior responsável por unir o corpo principal ao

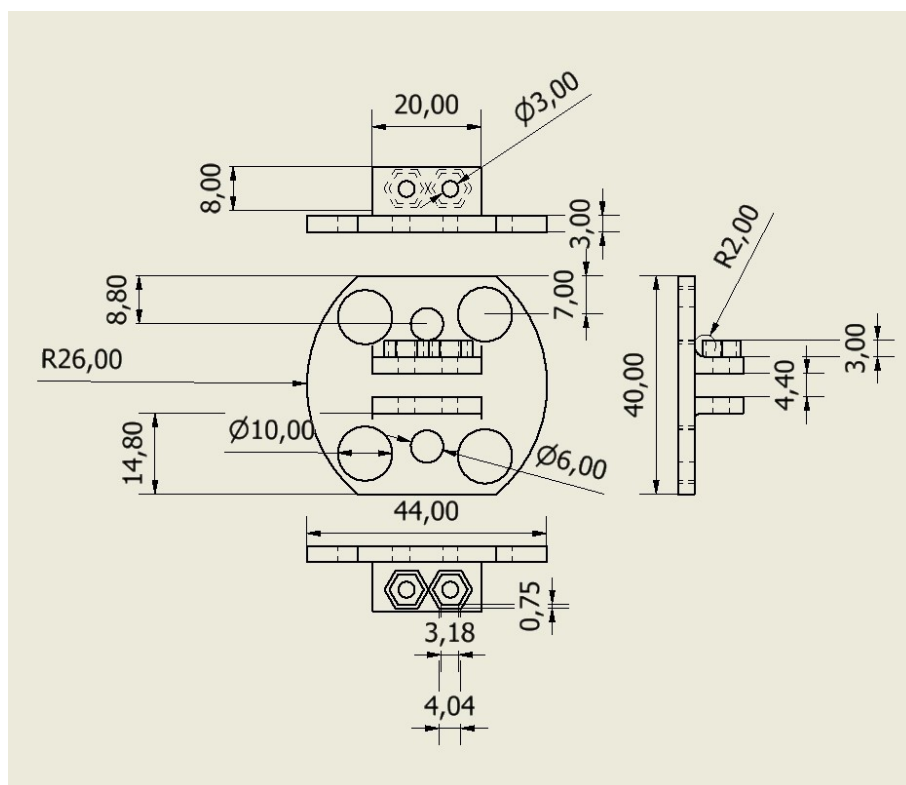
suporte dos motores e hélices, realizando essa função por meio do acoplamento da parte superior do conjunto à borracha antivibração. A Figura 3.7 apresenta suas vistas técnicas, incluindo as respectivas cotas. Ressalta-se que se trata de uma peça simétrica.

Figura 3.6 – Modelagem final da base inferior.



Fonte: Próprio Autor.

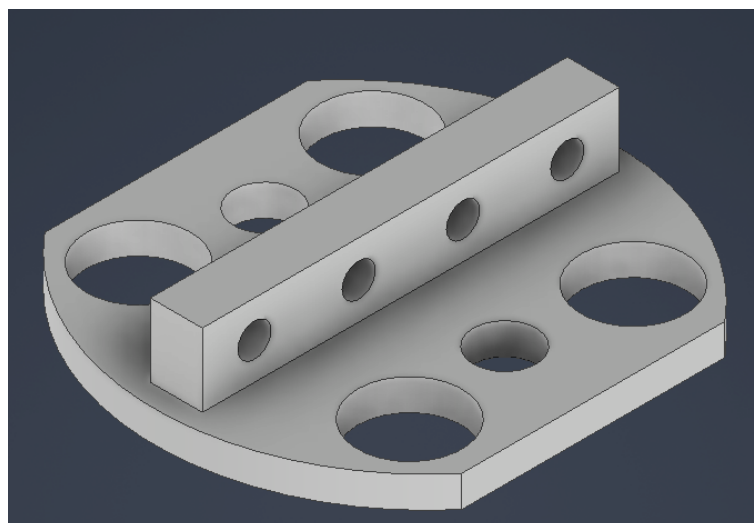
Figura 3.7 – Vistas técnicas da base inferior.



Fonte: Próprio Autor.

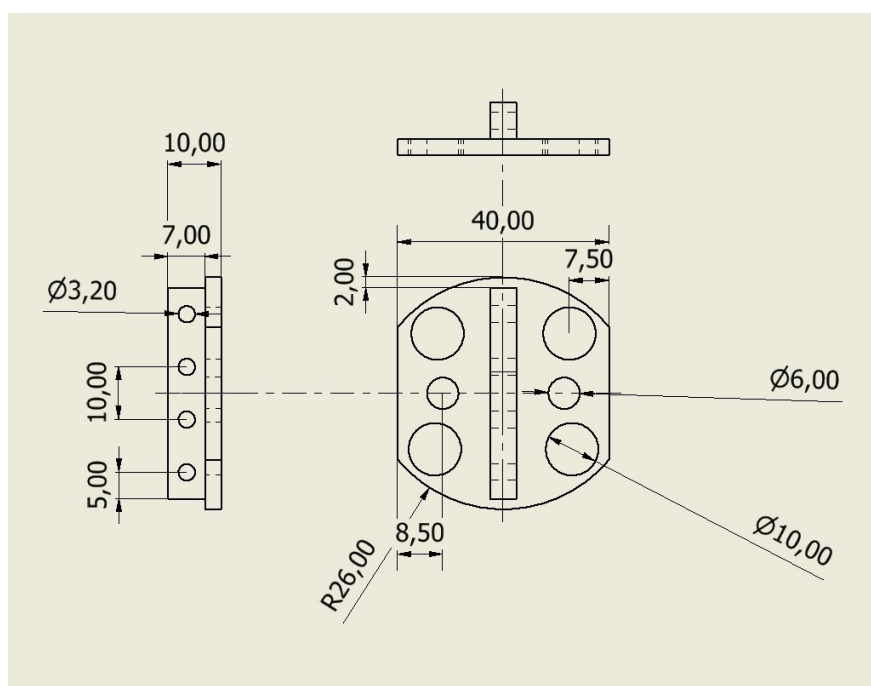
A peça responsável pela conexão entre a estrutura de suporte dos atuadores, a borracha antivibração e o restante do corpo é apresentada na Figura 3.8, que ilustra o suporte superior. A Figura 3.9 apresenta suas vistas técnicas, incluindo as respectivas cotas. Ressalta-se que se trata, também, de uma peça simétrica.

Figura 3.8 – Base superior da estrutura dos motores.



Fonte: Próprio Autor

Figura 3.9 – Vistas da base superior da estrutura dos motores.



Fonte: Próprio Autor

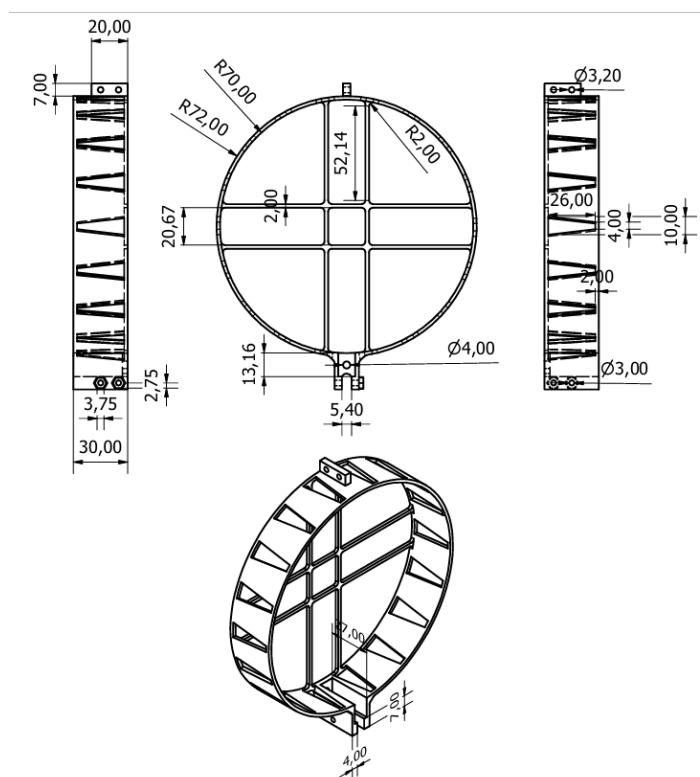
Para a fixação dos suportes dos motores e hélices, bem como para a proteção do usuário, a peça mostrada na Figura 3.8 foi projetada para ser fixada, por sua parte inferior. Foram utilizadas duas peças desse suporte, uma para cada atuador do sistema.

Figura 3.10 – Suporte e proteção para motores e hélices.



Fonte: Próprio Autor

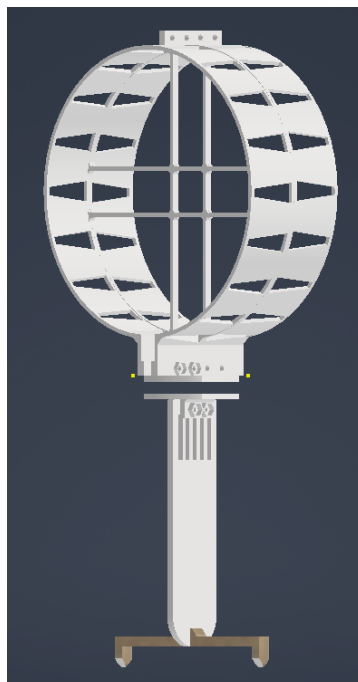
Figura 3.11 – Vistas dos suporte e proteção para motores e hélices.



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 3.12 é exibida a montagem do sistema de areopêndulo. O kit foi projetado para ser modular, de forma que novas hélices podem ser adicionadas a estrutura de forma a promover mais graus de liberdade ao sistema. Entretanto, este trabalho estará limitado ao acionamento de duas hélices.

Figura 3.12 – Modelo 3D montado no Software.



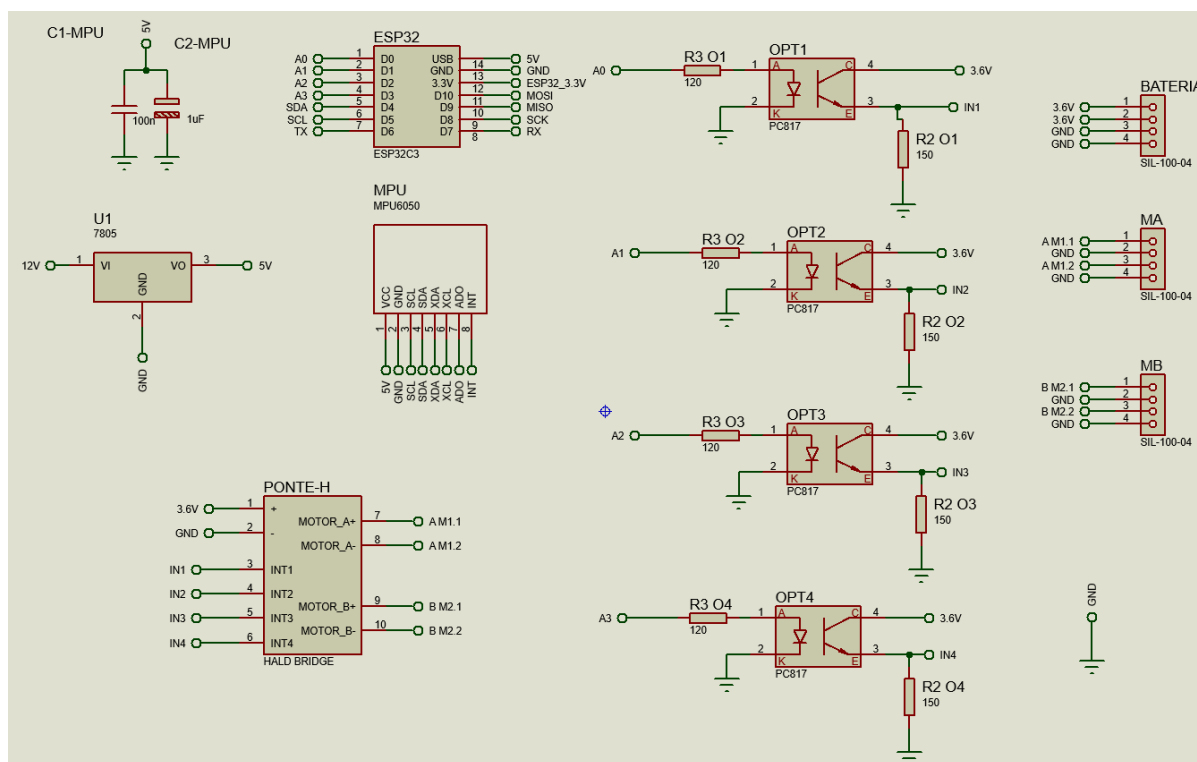
Fonte: Próprio Autor.

### 3.2 Placa de circuito impresso

Para a eletrônica que compõe o protótipo, foi projetada e desenvolvida uma placa de circuito impresso capaz de integrar as funcionalidades: aquisição de dados por meio do sensor MPU6050, o soquete para o microcontrolador XIAO ESP32 C3 Mini, responsável pela leitura, processamento e controle dos atuadores, o circuito para o optoacoplador PC817, o circuito para a ponte H MX1508, destinada ao controle de até quatro motores, além das demais conexões elétricas do sistema.

A PCI foi desenvolvida utilizando o software Proteus v8.13, com licença institucional, no qual foi elaborado o esquemático completo do circuito, conforme apresentado a Figura 3.13.

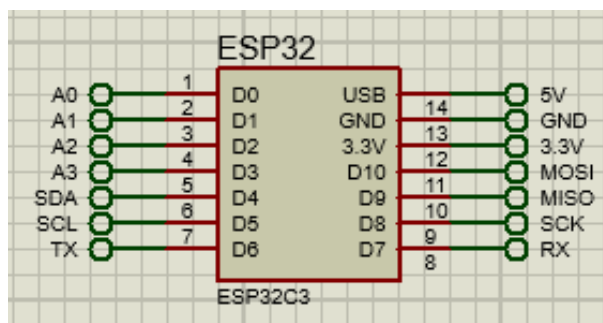
Figura 3.13 – Esquemático que constitui a PCI.



Fonte: Próprio Autor.

Entrando nos detalhes do esquemático apresentado na Figura 3.13, a representação do microcontrolador XIAO ESP32 C3 Mini é mostrada na Figura 3.14, onde estão indicadas as pinagens e suas respectivas referências, utilizadas nas demais partes do circuito.

Figura 3.14 – Representação esquemática do microcontrolador.

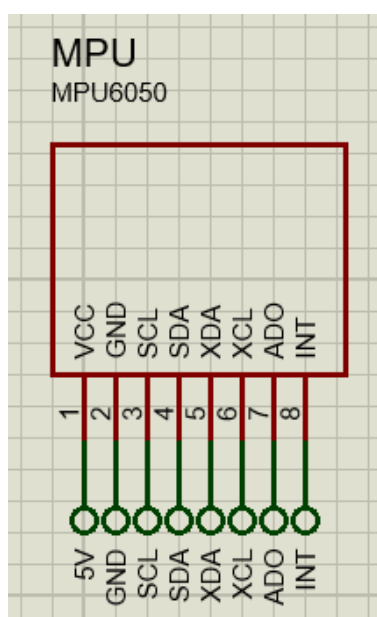


Fonte: Próprio Autor.

Para a leitura do MPU6050, a ligação entre o sensor e o microcontrolador é feita por quatro pinos dos oito disponíveis no módulo: 5V, Terra (em inglês, *Ground*) (GND), Clock

serial (em inglês, *Serial Clock*) (SCL) e Dados seriais (em inglês, *Serial Data*) (SDA), como pode ser observado na Figura 3.15. Esses pinos são comuns ao ESP32 C3 Mini, ou seja, a comunicação acontece por meio do barramento I<sup>2</sup>C. Dessa forma, a alimentação, o GND e as linhas SCL e SDA são interligados na própria placa. Dessa forma, o ESP32 atua como mestre, sendo responsável por gerar o *clock* na linha SCL e solicitar as informações do sensor. Já o MPU6050 atua como escravo, sincronizando a comunicação e enviando ao microcontrolador os dados de aceleração e giroscópio por meio da linha SDA.

Figura 3.15 – Representação esquemática do sensor MPU6050.



Fonte: Próprio Autor.

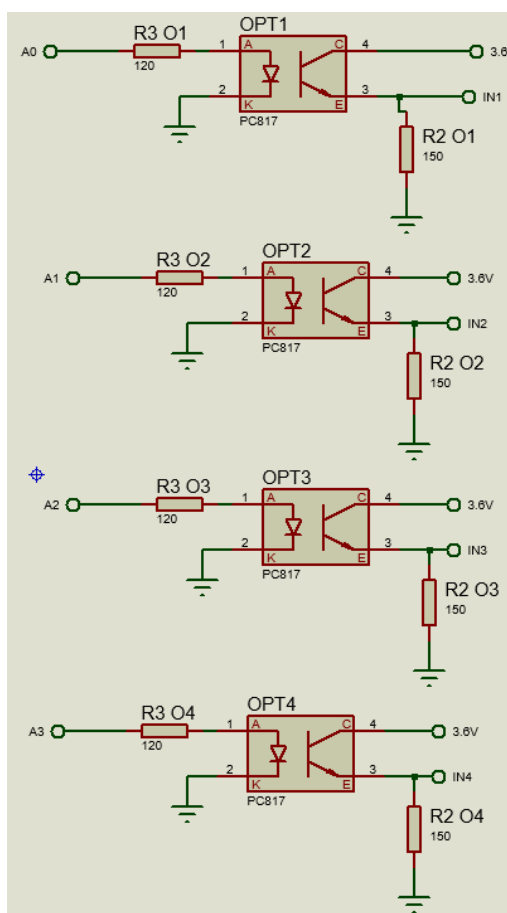
Para o controle da velocidade de rotação dos motores CC, foram utilizados sinais PWM, por meio do ajuste razão cíclica do sinal. Em termos simples, o controle é feito pela largura do tempo em que o sinal lógico permanece em nível alto em cada ciclo. Quanto maior essa largura, maior é a tensão média aplicada ao motor.

Neste trabalho, optou-se por isolar o sinal de PWM do circuito de potência, que envolve a ponte H e o acionamento dos motores. Para isso, foram utilizados quatro optocopladores PC817 na PCI, um para cada canal de acionamento, embora neste trabalho sejam utilizados apenas dois motores. Como é possível visualizar na Figura 3.16, para cada circuito dos optacopladores, o sinal PWM que é emitido pelo controle do ESP32 C3 Mini pelas portas A0, A1, A2 e A3 passam por resistores de 120  $\Omega$  (R3), ligados ao ânodo do LED interno do optocoplador. Os cátodos

desses LEDs estão conectados ao GND, fechando o circuito emissor de luz dentro do PC817.

Na parte de saída do optocoplador, o coletor é ligado ao 3,6 V da PCI. Já o emissor está conectado às entradas da ponte H, IN1, IN2, IN3 e IN4, além de um resistor de 150  $\Omega$  (R2) ligado ao GND. Dessa forma, o optocoplador faz a separação entre o sinal de controle vindo do microcontrolador e a etapa de potência, aumentando a proteção do circuito.

Figura 3.16 – Esquemático da ligação dos optacopladores PC817.



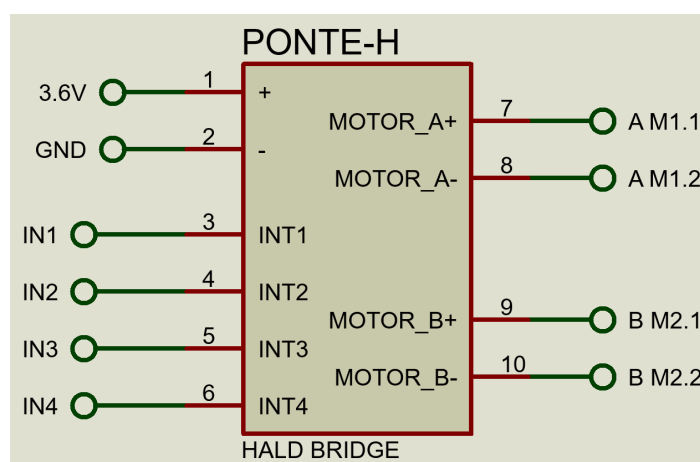
Fonte: Próprio Autor.

O esquemático apresentado na Figura 3.17 é referente ao circuito e às ligações diretamente relacionadas ao *driver* MX1508. Nessa figura, é possível visualizar os pinos de sinais PWM que saem dos optocopladores mencionados anteriormente, conectados aos pinos IN1, IN2, IN3 e IN4, bem como a tensão regulada em 3,6 V e a referência de aterramento comum a todos os circuitos da placa, todos localizados no lado esquerdo da imagem que caracterizam as entradas do *driver*.

Na parte direita da Figura 3.17, estão as saídas do *driver*, por meio das quais é possível realizar o acionamento de até quatro motores (sem reversão de sentido de rotação), utilizando as

entradas como controle de velocidade. Neste trabalho, porém, são utilizadas apenas as saídas indicadas como B M2.1 e B M2.2, uma vez que o sistema opera em apenas um sentido, sem inversão do giro da hélice. É possível ainda fazer a reversão do sentido de rotação dos motores, porém, devido à inércia do conjunto motor-hélice, esse processo introduziria um atraso na resposta do atuador e acrescentaria uma dinâmica associada à reversão de rotação, podendo comprometer a rapidez de atuação necessária para a estabilização do pêndulo. Dessa forma, o número de motores empregados neste trabalho foi limitado a dois, sendo um destinado à atuação em cada sentido de movimento do sistema.

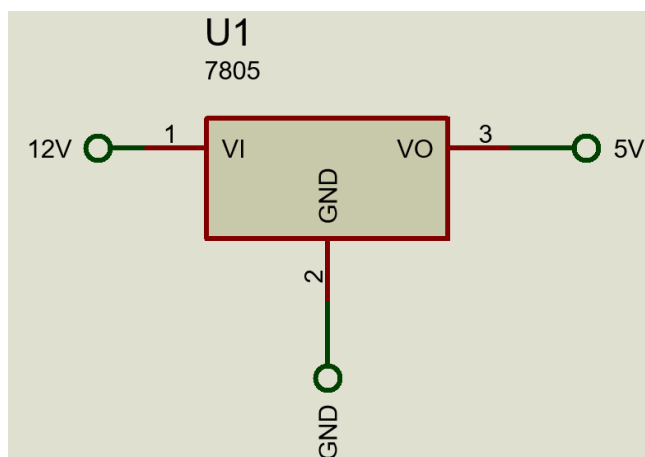
Figura 3.17 – Esquemático da ligação do *driver* MX1508.



Fonte: Próprio Autor.

Se tratando das ligações do regulador LM 7805, a Figura 3.18 mostra como o componente é conectado eletricamente. Em sua entrada ( $V_I$ ), são aplicados os 12 V CC fornecido pela saída da fonte regulável, além do GND comum ao circuito, que também está fisicamente ligado à fonte. Já na saída ( $V_O$ ), se encontra os 5 V CC regulados, e que são fornecidos ao ESP32 C3 Mini e ao MPU6050. Ressalta-se que esse componente ficou alocado fora da PCI, pois foi inserido após alterações decorrentes de desafios que serão apresentadas na Seção 3.2.1.

Figura 3.18 – Esquemático da ligação do regulador de tensão LM7805.

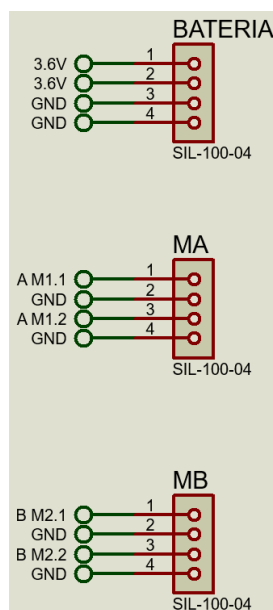


Fonte: Próprio Autor.

A Figura 3.19 representa os três chicotes de quatro vias utilizados no protótipo. Um deles, identificado como BATERIA, é utilizado como entrada e recebe a tensão de alimentação de 3,6 V fornecida pelo regulador de tensão XL4015, com dois pinos destinados à alimentação e dois ao GND. Os outros dois chicotes são utilizados como saída para os motores, identificados como MA e MB.

Dessa forma, a conexão dos motores e da alimentação de 3,6 V da placa tornou-se mais prática e intuitiva, já que esses componentes possuem apenas uma forma de encaixe. Com isso, evitam-se ligações incorretas, curto-circuitos e possíveis danos à placa e aos demais componentes.

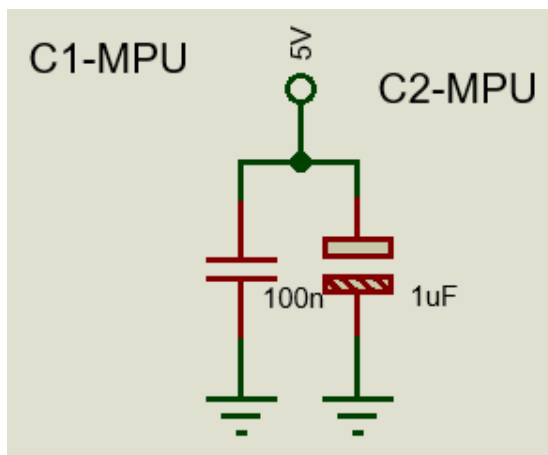
Figura 3.19 – Esquemático da ligação dos chicotes de 4 vias.



Fonte: Próprio Autor.

Por fim, a Figura 3.20 apresenta o esquemático do circuito utilizado como filtro para a aquisição de dados do MPU6050 em altas e baixas frequências. Nesse arranjo, o capacitor cerâmico atua como filtro para altas frequências, que podem comprometer o funcionamento do circuito. Estas componentes de alta frequência pode surgir em função do chaveamento do conversor buck ou do *driver*. Enquanto o capacitor eletrolítico é responsável pelo comportamento em baixas frequências e pela compensação de pequenas variações na tensão causadas pelo aumento rápido da corrente do motor.

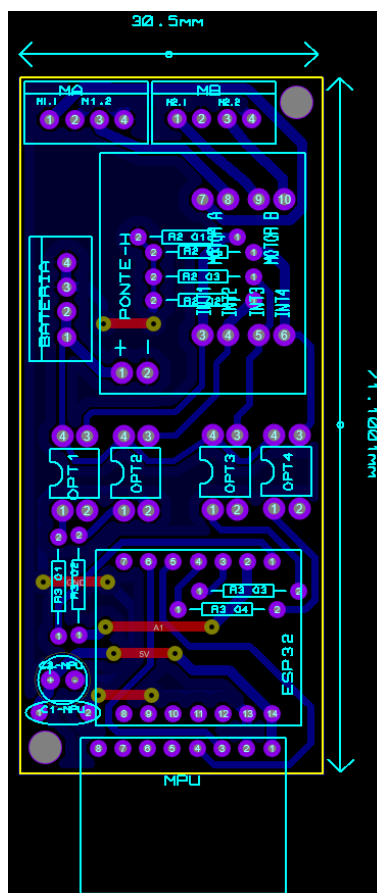
Figura 3.20 – Esquemático da ligação do filtro capacitivo.



Fonte: Próprio Autor.

A etapa que sucede ao esquemático é a do layout da PCI, na qual todos os componentes foram posicionados e as trilhas foram roteadas de acordo com as ligações definidas anteriormente. Essa etapa é especialmente importante quando a placa possui limitações de espaço, como foi o caso deste projeto, cujas dimensões são de 3,0 cm x 7,1 cm, de forma a respeitar a parte central da base inferior do protótipo. A Figura 3.21 apresenta o layout com a alocação dos componentes e o roteamento das trilhas em face simples.

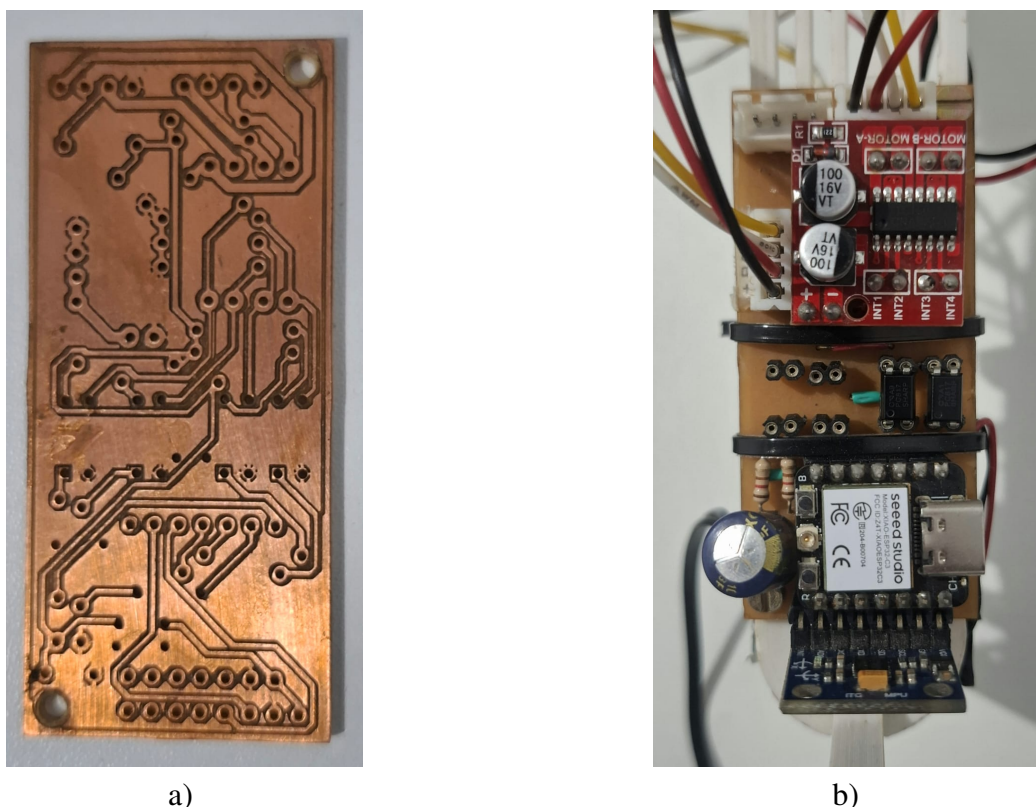
Figura 3.21 – Layout da PCI contendo os componentes alocados e as ligações das trilhas.



Fonte: Próprio Autor.

Após a distribuição dos componentes, o roteamento das trilhas e a aplicação do plano de terra no layout da PCI, foi gerado um código G, utilizado neste caso para a operação de uma fresadora com tecnologia de Controle Numérico Computadorizado (CNC) disponibilizada na estrutura do NRL (Núcleo de Robótica de Leopoldina). Além da fresadora, o núcleo também disponibilizou as ferramentas necessárias para a usinagem, como fresas, brocas e verniz, utilizado como acabamento após a usinagem, evitando a oxidação da placa. A Figura 3.22 mostra a placa usinada e envernizada, pronta para receber os componentes e seguir para a soldagem. Na Figura 3.22 é mostrado os componentes devidamente soldados, posicionados e com a placa pronta para testes.

Figura 3.22 – Desenvolvimento: a) Placa usinada por fresadora CNC, b) Placa finalizada.



Fonte: Próprio Autor.

### 3.3 Desafios encontrados

O desenvolvimento do projeto contou com dois desafios principais, identificados nas etapas de testes de acionamento dos motores e de controle dos mesmos por meio de PWM.

#### 3.3.1 Alimentação

Após o desenvolvimento do projeto, a usinagem da placa de circuito impresso e a soldagem dos componentes, foram realizados testes e validações iniciais, verificando-se pontos como tensão, continuidade, ausência de curto-circuito e aterramento comum entre todos os componentes do circuito. Em seguida, os dispositivos removíveis da placa, como o ESP32 C3 Mini, o *driver* MX1508, o sensor MPU6050 e os optocopladores, foram inseridos progressivamente, um a um, para validação da alimentação e do funcionamento inicial.

Inicialmente, o protótipo foi projetado para ser alimentado por duas baterias de 3,7 V ligadas em série, de modo a suprir tanto o circuito de controle, composto pelo ESP32 C3 Mini e pelo MPU6050, quanto o circuito de potência, formado pelos optocopladores e pelos motores. Com essa configuração, foram iniciados os testes preliminares com acionamento em degrau dos

motores. No entanto, observou-se que, à medida que a rotação aumentava, o acionamento não se mantinha estável e era interrompido durante a aceleração.

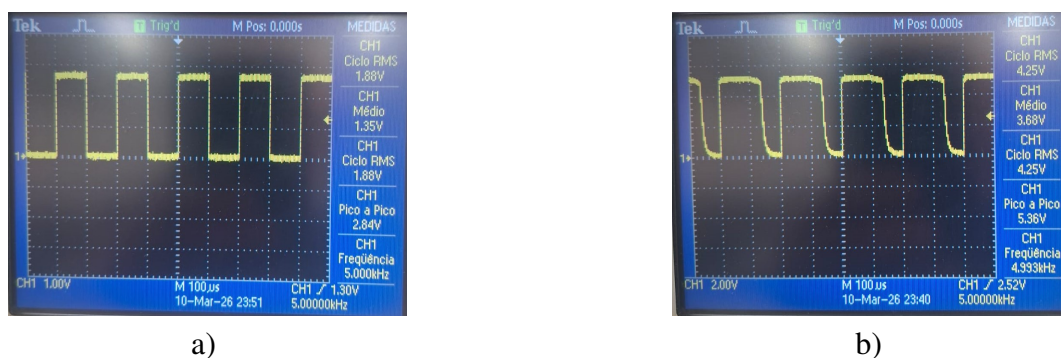
O problema foi investigado e, durante os testes, verificou-se que o LED indicador de funcionamento do ESP32 se apagava gradualmente conforme os motores aceleravam, até o desligamento completo do sistema. Concluiu-se, então, que o acionamento dos motores provocava queda de tensão no terminal de alimentação do ESP32 C3 Mini.

Como solução, adotou-se a estrutura atual, composta por dois reguladores de tensão. Para o circuito de potência, foi utilizado o módulo MX1508, e para o circuito de controle, o regulador LM7805. Para que essa configuração funcionasse corretamente, a trilha que mantinha a alimentação única da placa foi removida, separando-se a alimentação dos circuitos. Dessa forma, atualmente o LM7805 fornece 5 V para o circuito de controle, enquanto o MX1508 fornece 3,6 V para o circuito de potência.

### 3.3.2 Envio do sinal PWM

Antes da implementação do controle dos motores, ainda na fase de testes, realizou-se a validação do acionamento por PWM com o objetivo de controlar a velocidade. Nesse teste, foram aplicadas diferentes valores de razão cíclica, porém não foi observada alteração significativa na rotação dos motores. A partir disso, concluiu-se que o sinal PWM enviado pelo ESP32 estava sendo interpretado como nível lógico alto, e não como um sinal modulado de controle. Esse comportamento é apresentado na Figura 3.23, onde em (a) se trata do sinal que sai do ESP32 C3 mini entra no optacoplador PC817 e (b) apresenta o sinal de saída do optacoplador.

Figura 3.23 – Sinais do optacoplador: a) entrada, b) saída.



Fonte: Próprio Autor.

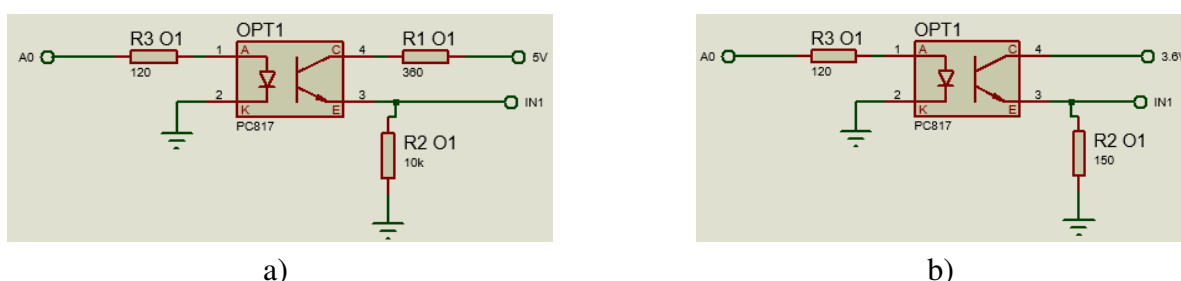
A investigação do problema foi conduzida com o auxílio de um osciloscópio, tendo como pontos de análise a saída dos pinos do ESP32, a entrada e a saída dos optocopladores e, também,

as entradas e saídas do MX1508 (utilizado como um chopper para o acionamento). Durante as medições, foi identificado que o sinal PWM na saída do optocoplador PC817 apresentava comportamento divergente em relação ao sinal de entrada, o que poderia indicar defeito no componente, erro de montagem do circuito ou, ainda, influência da interface com o MX1508.

Como primeira medida, o optocoplador foi substituído, porém o comportamento observado permaneceu. Em seguida, foram analisados os circuitos internos da placa do MX1508 em busca de algum elemento que pudesse justificar essa resposta, mas não foi identificada a presença de componentes capacitivos associados a esse comportamento.

Ao prosseguir com as análises, foi levantado a possibilidade de acúmulo de carga no emissor causada pela alta resistência no pino imposta pelo resistor R2 de 10 k $\Omega$  que poderia estar atrasando a descarga durante o chaveamento. Como solução, a configuração do circuito auxiliar do optocoplador foi revista e alterada, conforme mostrado na Figura 3.24. Nessa nova configuração, o resistor R1 foi removido e o resistor R2, inicialmente com valor de 10 k $\Omega$ , foi reduzido para 150  $\Omega$  como é mostrado na Figura 3.24. Com a realização dos testes, o funcionamento dos motores respondeu como esperado, ficando apto para ser controlado.

Figura 3.24 – Circuito optacoplador: a) antes da alteração dos resistores R1 e R2, b) depois da alteração dos resistores R1 e R2.



Fonte: Próprio Autor.

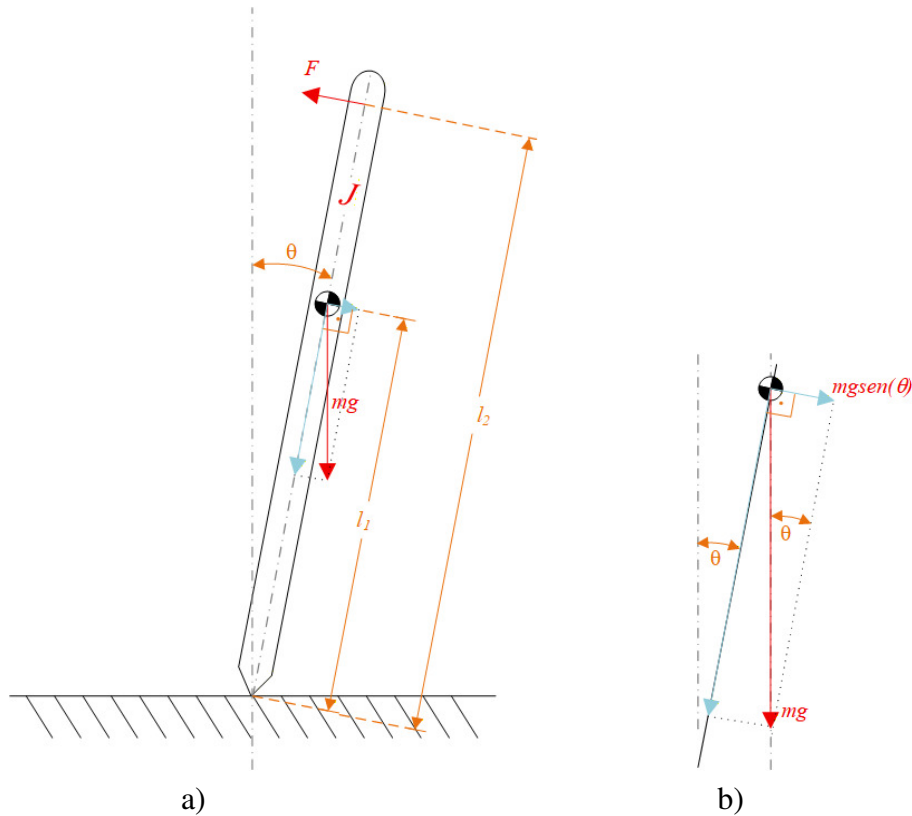
### 3.4 Modelagem dinâmica do sistema

Nesta seção, é apresentada a modelagem dinâmica do protótipo, com base no diagrama de corpo livre mostrado na Figura 3.25. A partir dessa representação, é possível identificar as forças atuantes sobre o sistema e relacioná-las com a posição angular do sistema.

Para simplificar a análise, o centro de massa foi determinado de forma manual, por meio do balanceamento estático do protótipo em diferentes pontos do corpo, até que fosse encontrada a posição de equilíbrio. Com isso, foi obtido o centro de massa, permitindo considerar parâmetros concentrados para uma representação mais simplificada da dinâmica.

A Figura 3.25 mostra a decomposição da força gravitacional aplicada ao centro de massa, evidenciando a componente responsável pelo torque em torno do ponto de apoio. A partir dessa análise, foi possível chegar à função de transferência do modelo, conforme é apresentado nas equações desta seção.

Figura 3.25 – Diagrama de corpo livre: a) representação simplificada, b) decomposição da força peso no centro de massa.



Fonte: Próprio Autor.

A partir do diagrama de corpo livre apresentado, foi considerado que a força  $F$ , exercida pela atuação dos motores e hélices, atua na extremidade superior do protótipo, a uma distância  $l_2$  do ponto de rotação. Assim, o torque gerado por essa força em relação a base é descrito da seguinte forma:

$$\tau_F = F \cdot l_2, \quad (3.1)$$

já a força peso do sistema atua no centro de massa, localizado a uma distância  $l_1$  do ponto de apoio. Como o movimento ocorre em torno de um eixo de rotação, ou seja, a dinâmica ocorre em um grau de liberdade, apenas a componente  $mg \cdot \sin(\theta(t))$  contribui para o torque que provoca

rotação no protótipo, sendo  $m$  a massa do protótipo em kg,  $g$  a aceleração da gravidade  $m/s^2$  e  $\theta(t)$  é medido perpendicular ao solo e seu valor é em radianos (rad). Assim, define-se que:

$$\tau_g = mg \cdot l_1 \sin(\theta(t)). \quad (3.2)$$

Considerando a dinâmica rotacional do sistema, a soma dos torques em relação ao ponto de rotação é igual ao produto do momento de inércia  $J$  pela aceleração angular  $\ddot{\theta}(t)$  onde a unidade de medida de  $J$  é  $\frac{N \cdot m \cdot s^2}{\text{rad}} = kg \cdot m^2$ .

Com isso, a equação fundamental do movimento pôde ser escrita como:

$$\sum \tau = J \cdot \ddot{\theta}(t). \quad (3.3)$$

Substituindo os torques atuantes no protótipo na equação anterior (3.3), obtém-se a relação entre a força de atuação e o torque devido a força gravitacional seja:

$$F(t) \cdot l_2 - m \cdot g \cdot l_1 \cdot \sin(\theta(t)) = J \cdot \ddot{\theta}(t). \quad (3.4)$$

Observa-se que (3.4) apresenta um termo não linear devido a função seno. Buscando obter um modelo linear para o sistema, assumiu-se que o ângulo  $\theta$  é tão pequeno, que possa ser considerado como  $\sin(\theta(t)) \approx \theta(t)$ , sendo que esta aproximação pode ser considerada razoável uma vez que o sistema será controlado próximo ao intervalo em torno do ângulo de 0 rad. Com essa aproximação, a equação dinâmica passa a ser:

$$J \cdot \ddot{\theta}(t) + m \cdot g \cdot l_1 \cdot \theta(t) = F(t) \cdot l_2, \quad (3.5)$$

aplicando a transformada de Laplace, a equação no domínio do tempo é convertida para o domínio complexo de Laplace, resultando em:

$$J \cdot s^2 \cdot \Theta(s) + m \cdot g \cdot l_1 \cdot \Theta(s) = l_2 \cdot F(s). \quad (3.6)$$

Por fim, isolando a razão entre saída e entrada, obtém-se a função de transferência do sistema:

$$\frac{\Theta(s)}{F(s)} = \frac{l_2}{J \cdot s^2 + m \cdot g \cdot l_1}. \quad (3.7)$$

Após a definição da função de transferência, foram realizadas as medições necessárias para a obtenção das grandezas físicas  $l_1$ ,  $l_2$ , massa  $m$  e aceleração da gravidade  $g$ , considerada como  $9,81 \text{ m/s}^2$ . A distância  $l_1$ , que corresponde ao comprimento entre o ponto de apoio e o centro de massa do protótipo, é de  $150 \text{ mm}$ . Já a distância  $l_2$  corresponde ao comprimento entre o ponto de apoio e o ponto de aplicação da força gerada pelos motores, com valor de  $240 \text{ mm}$ . A massa total do sistema foi obtida por meio de uma balança de precisão, resultando em  $160 \text{ g}$ .

De acordo com (Quanser Inc., 2009), o momento de inércia de um pêndulo pode se calculada da seguinte forma:

$$J_p = \frac{1}{4} \cdot \frac{m \cdot g \cdot l_2}{\pi^2 \cdot f^2}, \quad (3.8)$$

onde  $f$  representa a frequência natural do pêndulo a qual foi obtida de forma experimental. Para isso, o protótipo foi posicionado de modo que o pêndulo ficasse invertido, permitindo que a parte superior buscasse naturalmente a posição de equilíbrio em  $180$  graus devido à ação da gravidade. Em seguida, o sistema foi deslocado angularmente em um determinado ângulo e solto, passando a oscilar livremente em torno do ponto de equilíbrio. A cronometragem foi realizada para cinco oscilações completas, desconsiderando o atrito no apoio do pivô. Nesse ensaio, o tempo total obtido foi de  $4,4 \text{ s}$ , valor utilizado posteriormente para o cálculo da frequência de oscilação do pêndulo. Para o cálculo e obtenção da frequência, foi utilizada a equação (3.9) também utilizada por (Quanser Inc., 2009) onde:

$$f = \frac{N}{\Delta t}, \quad (3.9)$$

sendo:

- $N$  = Número de ciclos
- $\Delta t$  = Variação do tempo

Substituindo os valores obtidos na experimentação mencionada anteriormente, temos:

$$f = \frac{5}{4,4} \approx 1,13636 \text{ Hz}. \quad (3.10)$$

Reescrevendo a equação (3.8) e substituindo os valores, obtém-se o valor do momento de inércia ( $J_p$ ):

$$J_p = \frac{1}{4} \cdot \frac{0,16 \cdot 9,81 \cdot 0,24}{\pi^2 \cdot 1,13636^2} = 0,00739 \text{ kg} \cdot \text{m}^2. \quad (3.11)$$

Sabendo o valor do momento de inércia do pêndulo, a equação( 3.7) pode ser reescrita com a substituição dos valores das constantes medidas e calculadas, conforme segue

$$\frac{\Theta(s)}{F(s)} = \frac{0,240}{0,00793s^2 + 0,16 \cdot 9,81 \cdot 0,150} = \frac{0,240}{0,00793s^2 + 0,23544} \quad (3.12)$$

$$\frac{\Theta(s)}{F(s)} = G(s) = \frac{36,26}{s^2 + 29,69}. \quad (3.13)$$

De forma experimental, foi possível obter um ganho estático que relaciona o sinal de PWM aplicado com a força gerada. Nesse procedimento, o pêndulo foi acionado contra uma balança fixa em uma parede, utilizando-se um sinal de comando PWM igual a 900, o que resultou em uma leitura de aproximadamente 12 g. Como a leitura da balança corresponde à força peso exercida sobre o sensor, essa medida equivale a cerca de 0,118 N, adotando-se a conversão  $1 \text{ gf} = 0,00980665 \text{ N}$ .

Dessa forma, além do modelo dinâmico obtido para a relação entre a força aplicada e o deslocamento angular do pêndulo, foi considerado um ganho experimental  $K_f$  para representar a conversão entre o sinal de controle em PWM e a força real gerada pelo sistema. Assim, a função de transferência dada em (3.13) pode ser reescrita. Considerando-se agora que a força de entrada é dada por:

$$F(s) = K_f U_{PWM}(s), \quad (3.14)$$

logo, a relação entre a posição angular e o sinal de controle PWM passa a ser expressa por:

$$\frac{\Theta(s)}{U_{PWM}(s)} = K_f \frac{36,26}{s^2 + 29,69}. \quad (3.15)$$

A partir da calibração experimental realizada, obtém-se o ganho aproximado:

$$K_f \approx \frac{0,118}{900} = 1,31 \times 10^{-4} \text{ N/PWM}. \quad (3.16)$$

Substituindo esse valor na expressão anterior, chega-se ao modelo ajustado do sistema em função do PWM:

$$\frac{\Theta(s)}{U_{PWM}(s)} \approx \frac{36,26 \cdot 1,31 \times 10^{-4}}{s^2 + 29,69} \approx \frac{4,75 \times 10^{-3}}{s^2 + 29,69}.$$

Assim é possível representar de maneira mais realista a planta física, pois o modelo passa a considerar não apenas a dinâmica mecânica do pêndulo, mas também a característica experimental de conversão entre o comando elétrico aplicado e a força efetivamente produzida pelo atuador.

### 3.5 Controlador

A escolha do controlador PID neste trabalho não se deu apenas por sua ampla utilização em aplicações de controle, mas principalmente por sua adequação às características e aos objetivos do protótipo desenvolvido. O aeropêndulo proposto consiste em uma planta naturalmente instável, operando em torno de um ponto de equilíbrio, para a qual foi obtido um modelo linearizado válido para pequenas variações angulares em torno de 0 rad. Nessas condições, a adoção de um controlador de estrutura simples, baixo custo computacional e implementação embarcada direta mostrou-se coerente com a proposta do trabalho, especialmente por se tratar de um kit didático voltado ao estudo experimental do controle de equilíbrio.

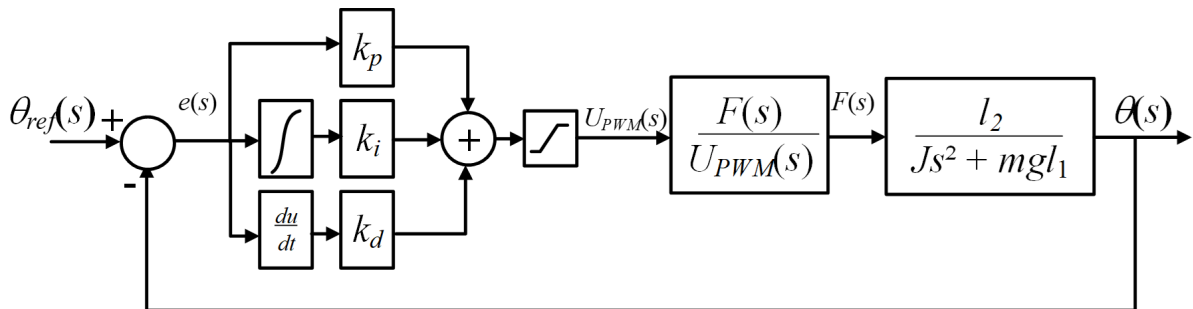


Figura 3.26 – Malha do controle PID

Na implementação realizada no ESP32C3, apresentada no Apêndice A, o ângulo utilizado na realimentação da malha de controle é obtido a partir do MPU6050 por meio de processamento digital dos sinais medidos. Inicialmente, é realizada a calibração do offset do giroscópio com base na média de 1000 amostras. Em seguida, o ângulo calculado a partir do acelerômetro é suavizado por dois filtros passa-baixa em cascata com frequência de corte em 10Hz e, posteriormente, combinado com a integração da velocidade angular do giroscópio por meio de um filtro complementar. Dessa forma, obtém-se uma estimativa angular mais estável e adequada para uso na malha de controle. O termo derivativo do controlador não foi obtido por derivação numérica direta do erro, mas pela própria velocidade angular medida pelo giroscópio, implementada no código como derivada = -gyroX.

Como mecanismo adicional de segurança, o controlador é desabilitado quando a inclinação ultrapassa a faixa de operação de 8 graus definida no código. Esse limite foi estabelecido experimentalmente, a partir de testes com valores fixos de PWM aplicados em diferentes posições angulares iniciais, buscando verificar até que ponto o sistema era capaz de gerar torque suficiente para vencer a inércia do protótipo e reconduzi-lo à região de equilíbrio.

A definição dos ganhos foi realizada de forma empírica, sem a aplicação de um método formal de sintonia. Inicialmente, o ganho proporcional foi estimado com base na relação entre a faixa angular de operação e a ação máxima de controle disponível. Considerando um limite operacional de 8 graus e uma ação máxima de controle de 1000, obteve-se uma estimativa inicial para o ganho proporcional, conforme mostrado a seguir:

$$K_p = \frac{1000}{8} = 125.$$

A partir desse valor inicial, foram realizados ajustes experimentais nos demais ganhos até se obter um desempenho satisfatório do sistema. O ganho integral foi introduzido para reduzir o erro em regime, enquanto o ganho derivativo foi empregado para suavizar a resposta e contribuir para a estabilidade durante as correções do movimento.

Após os testes, o conjunto de ganhos que apresentou o melhor resultado foi  $K_p = 120$ ,  $K_i = 50$  e  $K_d = 110$ . Esses valores foram definidos com base no comportamento observado do protótipo durante os ensaios, considerando a necessidade de resposta rápida, redução de oscilações e manutenção do equilíbrio em operação.

### 3.6 Estimativa de custo do protótipo

Após todo o desenvolvimento do trabalho, incluindo alterações, correções e a definição do protótipo, foi realizada uma estimativa dos custos, com o objetivo de chegar o mais perto possível do valor gasto na construção. Vale ressaltar que alguns componentes foram fornecidos por professores e também pelo laboratório de pesquisa do CEFET-MG, Campus Leopoldina. Dessa forma, a estimativa apresentada considera apenas os materiais adquiridos, sem incluir mão de obra, tempo de máquina em operação, consumo de energia ou desgaste dos equipamentos. Com isso, o valor total final chegou a aproximadamente R\$ 253,12, disponibilizado posteriormente na Tabela 3.1. Os valores apresentados foram obtidos a partir de consultas em sites de venda e fornecedores, considerando os preços disponíveis no período de elaboração deste trabalho.

Tabela 3.1 – Custos dos componentes do protótipo.

| <b>Componente</b>    | <b>Quantidade</b> | <b>Preço</b> | <b>Total</b>      |
|----------------------|-------------------|--------------|-------------------|
| XIAO ESP32 C3 mini   | 1 un              | R\$ 24,65    | R\$ 24,65         |
| MPU6050              | 1 un              | R\$ 22,00    | R\$ 22,00         |
| XL4015               | 1 un              | R\$ 27,90    | R\$ 27,90         |
| LM7805               | 1 un              | R\$ 1,90     | R\$ 1,90          |
| PC817                | 2 un              | R\$ 0,60     | R\$ 1,20          |
| Filamento ABS        | 132 g             | R\$ 0,08     | R\$ 10,16         |
| Borrachas anti-ruído | 4 un              | R\$ 11,96    | R\$ 47,84         |
| MX1508               | 1 un              | R\$ 4,90     | R\$ 4,90          |
| Resistores variados  | 8 un              | R\$ 0,72     | R\$ 5,76          |
| Capacitor 1000uF     | 1 un              | R\$ 0,83     | R\$ 0,83          |
| Ligação a 4 fios     | 3 un              | R\$ 12,76    | R\$ 38,28         |
| Placa de Fenolite    | 1 un              | R\$ 3,50     | R\$ 3,50          |
| Motor CC 8520        | 2 un              | R\$ 32,10    | R\$ 64,20         |
| <b>Custo Total</b>   |                   |              | <b>R\$ 253,12</b> |

Fonte: Próprio Autor.

Como mencionado anteriormente, para a fabricação da placa do protótipo foram utilizados os recursos disponíveis no CEFET-MG, Campus Leopoldina, incluindo a fresadora CNC e a mão de obra própria para parametrização, acompanhamento e operação da máquina. Nesse cenário, o custo se restringe basicamente à aquisição da placa fenolite, no valor de R\$ 3,50, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Como forma de comparação, foi realizada uma simulação de produção da PCI por uma empresa terceirizada, neste caso a JLCPCB, apresentada da Figura 3.27. Para uma fabricação mínima de 5 unidades, com dimensão de 10 cm x 10 cm, a cotação indicou um valor total de US\$ 5,30, ou aproximadamente R\$ 26,23 na cotação atual da elaboração desse trabalho, já incluindo o frete, como mostra a Figura 3.27. Nesse caso, o custo individual de cada placa ficaria em torno de R\$ 1,75, considerando que seria possível inserir 3 placas e cada uma das 5 unidades.

Figura 3.27 – Levantamento de custo de fabricação da placa com empresa terceira.

←

https://cart.jlcpb.com/quote?stencilLayer=1&stencilWidth=100&stencilLength=100&stencilCounts=5&plateType=1&spm=jlcpb.Homepage.1010

🔍

🛒

🇺🇸 USD

Sign In

JLCPCB

⌵

Online PCB Quote

Instructions For Ordering> Upload History ▾

📁 Add gerber file

Only accept zip or rar, Max 100 MB, View example >

🔒 All uploads are secure and confidential.

Base Material

FR-4

Flex

Aluminum

Copper Core

Rogers

PTFE Teflon

Layers

1

2

4

High Precision PCB

6

8

10

12

14

16

More ▾

Dimensions

30

\*

70

mm ▾

PCB Qty

5 ▾

Product Type

Industrial/Consumer electronics

Aerospace

Medical

PCB Specifications

⌵

Charge Details

⌵

Special Offer

\$2.00

Via Covering

\$0.00

Surface Finish

\$0.00

Deburring/Edge rounding

\$0.10

PCB Build Time

?

☒ 3 days

\$0.00

☐ 24 hours

\$8.20

☐ 24 hours

PCBA Only

\$0.00

Calculated Price

\$2.10

Additional charges may apply for special cases

SAVE TO CART

Shipping Estimate

\$3.12

Global Standard Direct Li...

8-13 business days

Weight

0.16kg

JLCPCB

Fonte: Próprio Autor.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados com o controlador PID aplicado ao aeropêndulo. Foram avaliadas três configurações de ganhos, cada uma com duração aproximada de 30 segundos. Durante os testes, perturbações manuais foram aplicadas ao protótipo para verificar sua capacidade de retornar à condição de equilíbrio.

Os dados foram registrados durante os ensaios e posteriormente processados por meio de um script desenvolvido em linguagem Python, apresentado no Apêndice C. A partir desses dados, foram obtidos indicadores como erro RMS, erro máximo absoluto, tempo em saturação, erro em regime, tempo de pico e tempo de estabilização.

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 foram organizadas em curvas contendo três gráficos cada. No eixo horizontal, tem-se o tempo, variando de 0 a 30 segundos sendo coletando 6000 amostras. No gráfico superior é apresentado o ângulo medido do protótipo (Roll) e a respectiva referência ao longo do tempo. O gráfico central mostra o erro de controle, correspondente à diferença entre a referência e o ângulo medido. Por fim, o gráfico inferior apresenta o sinal de controle aplicado aos motores.

Também é possível observar que a ação de controle permaneceu limitada em aproximadamente  $\pm 1000$  de PWM, evidenciando a presença de saturação no atuador. Esse aspecto é relevante, pois a saturação influencia diretamente a resposta transitória do sistema e pode comprometer o desempenho do controlador quando ocorrem perturbações mais intensas. Ainda assim, os resultados mostram que, mesmo diante dessas limitações, o sistema conseguiu retornar à referência, demonstrando capacidade de rejeição a distúrbios.

Para a análise quantitativa, o tempo de estabilização foi definido como o intervalo necessário para que o erro entrasse e permanecesse dentro de uma banda de  $\pm 0,2$  rad em torno da referência. O erro em regime foi calculado pela média do valor absoluto do erro nos cinco segundos finais de cada ensaio. Já a sobrelevação máxima foi calculada como o maior desvio angular após cada perturbação.

A Tabela 4.1 apresenta os indicadores globais obtidos em cada ensaio. Esses valores permitem comparar o comportamento geral do sistema para os diferentes ganhos utilizados.

Tabela 4.1 – Resumo dos índices de desempenho dos experimentos com banda de estabilização de 0,2 rad.

| Métrica                           | Experimento 1 | Experimento 2 | Experimento 3 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Erro RMS (rad)                    | 0,5385        | 0,4605        | 0,4738        |
| Erro máximo absoluto (rad)        | 3,3780        | 2,5820        | 3,4420        |
| Tempo em saturação (s)            | 0,210         | 0,265         | 0,300         |
| Erro em regime (rad)              | 0,0757        | 0,0203        | 0,0435        |
| Número de perturbações analisadas | 1             | 2             | 2             |

Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 4.2 detalha a resposta do sistema após cada perturbação aplicada, trazendo a indicação da perturbação, o instante em que ela ocorreu, tempo de pico, o percentual de sobrelevação máxima e o tempo de estabilização do sistema após essas perturbações.

Tabela 4.2 – Índices de desempenho por perturbação com banda de estabilização de 0,2 rad.

| Experimento   | Perturbação | Instante (s) | Erro máximo (rad) | Tempo de pico (s) | Tempo de estabilização (s) |
|---------------|-------------|--------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| Experimento 1 | P1          | 7,900        | 3,378             | 0,299             | 11,394                     |
| Experimento 2 | P1          | 4,500        | 1,543             | 0,245             | 4,035                      |
|               | P2          | 16,600       | 2,502             | 0,300             | 4,600                      |
| Experimento 3 | P1          | 7,300        | 1,247             | 0,250             | 0,810                      |
|               | P2          | 17,500       | 3,442             | 0,340             | 4,645                      |

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.1 Experimento 01

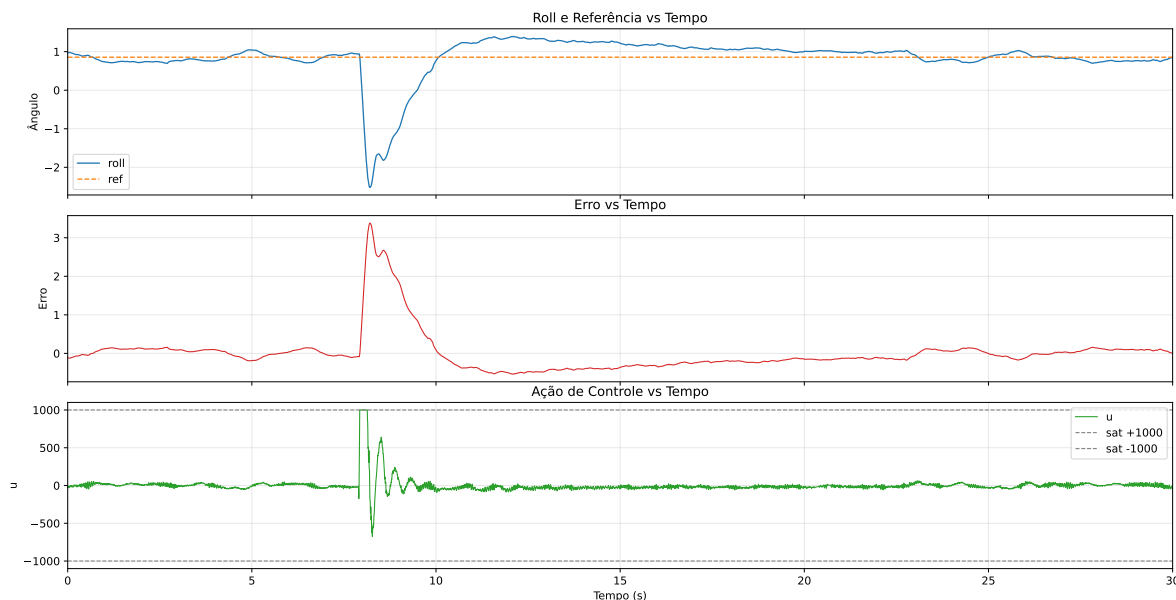
A Figura 4.1 apresenta o primeiro ensaio realizado com os ganhos do controlador ajustados em  $K_p = 120$ ,  $K_i = 10$  e  $K_d = 110$ . Após a etapa de calibração, a referência adotada pelo sistema foi de 0,856 rad.

Nesse experimento foi aplicada uma perturbação em aproximadamente 7,9 s. O maior desvio foi observado cerca de 0,299 s após a perturbação, atingindo 3,378 rad. Em relação à referência adotada, esse valor corresponde a uma sobrelevação máxima de 394,63%.

A ação de controle atingiu o limite de saturação durante a tentativa de correção do desvio. Considerando a banda de estabilização de  $\pm 0,2$  rad, o sistema apresentou tempo de estabilização de 11,394 s. Apesar do tempo de recuperação mais elevado em comparação com os demais testes,

o ensaio mostrou que o sistema foi capaz de retornar para uma região próxima da referência após a perturbação. O erro RMS obtido nesse experimento foi de 0,5385 rad, enquanto o erro em regime foi de 0,0757 rad.

Figura 4.1 – Coleta de dados 01 com os ganhos  $K_P=120$ ,  $K_I=10$  e  $K_D=110$ .



Fonte: Próprio Autor.

## 4.2 Experimento 02

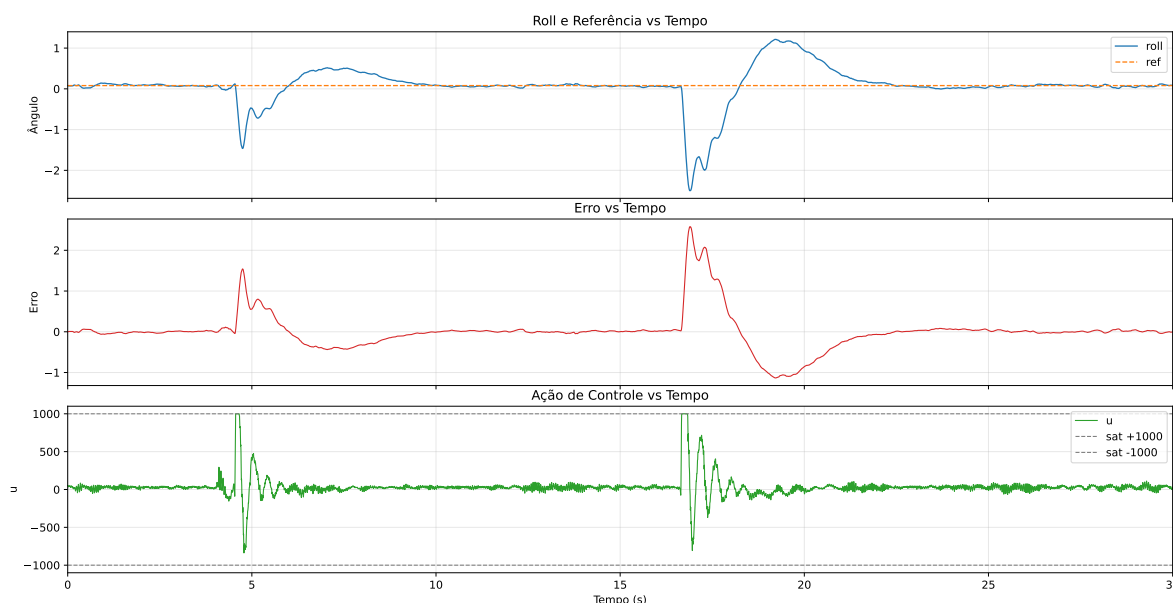
A Figura 4.2 mostra a segunda aquisição de dados do protótipo em operação com os ganhos do controlador PID de  $K_p = 120$ ,  $K_i = 50$  e  $K_d = 110$ , comparado aos parâmetros do controlador anterior o ganho integrador foi 4 vezes maior. Após a calibração do sensor, o sistema foi calibrado com referência em 0,08 rad, valor suficientemente próximo de zero para ser considerado, na prática, como o ponto de equilíbrio do ensaio.

Durante o experimento, foram aplicadas duas perturbações principais. A primeira teve início em aproximadamente 4,5 s. O maior desvio foi registrado 0,245 s após o início da perturbação, atingindo 1,543 rad. Em relação à referência utilizada no experimento, esse desvio corresponde a uma sobrelevação máxima de 1.928,75%. Considerando a banda de estabilização de  $\pm 0,2$  rad, o sistema retornou à faixa estabelecida após 4,035 s.

A segunda perturbação ocorreu em aproximadamente 16,6 s e apresentou maior intensidade. O pico foi registrado 0,300 s após sua aplicação, com desvio máximo de 2,582 rad. Nesse caso,

a sobrelevação máxima foi de 3.227,50%, enquanto o tempo de estabilização foi de 4,600 s. Nos dois eventos, a ação de controle atingiu a saturação, buscando compensar as perturbações, além disso, a configuração apresentou erro RMS igual a 0,4605 rad e erro em regime de 0,0203 rad.

Figura 4.2 – Coleta de dados 02 com os ganhos  $K_P=120$ ,  $K_I=50$  e  $K_D=110$ .



Fonte: Próprio Autor.

### 4.3 Experimento 03

A Figura 4.3 apresenta o terceiro ensaio, realizado com os ganhos  $K_p = 160$ ,  $K_i = 50$  e  $K_d = 110$ . Nesse caso, o ganho proporcional foi aumentado em relação ao Experimento 02, enquanto os ganhos integral e derivativo foram mantidos. Após a calibração, a referência adotada foi de 0,788 rad.

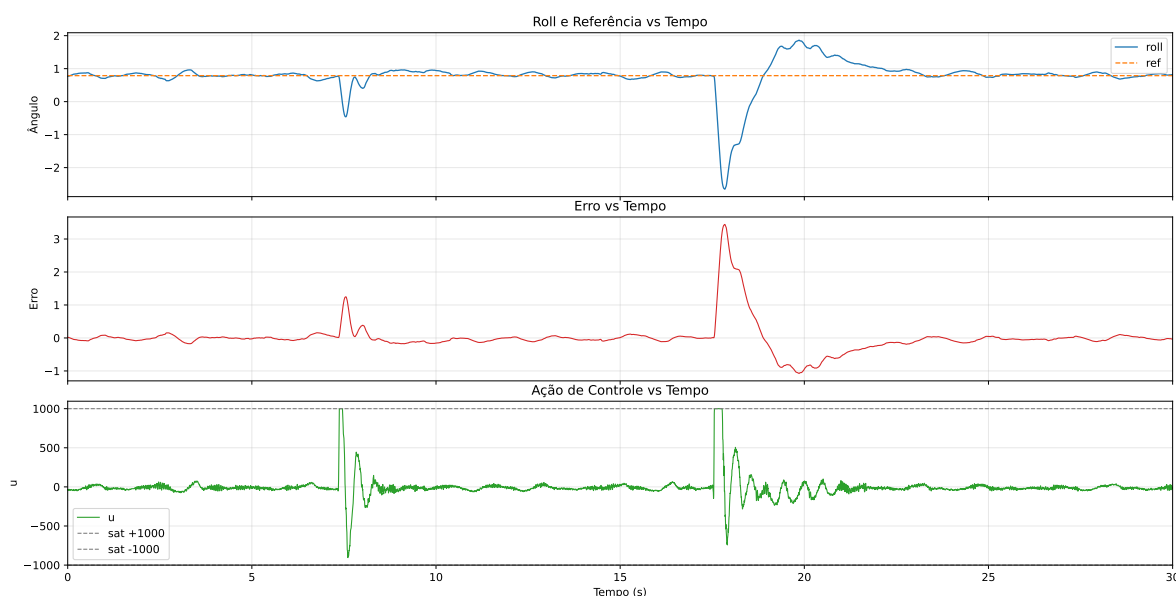
A primeira perturbação foi aplicada em aproximadamente 7,3 s. O maior desvio foi observado após 0,250 s e atingiu 1,248 rad. Esse valor representa uma sobrelevação máxima de 158,38% em relação à referência. O tempo de estabilização calculado para essa perturbação foi de 0,810 s, sendo o menor tempo observado entre todos os eventos analisados.

A segunda perturbação ocorreu em aproximadamente 17,5 s e foi mais intensa. O sistema atingiu um desvio máximo de 3,442 rad após 0,340 s, o que corresponde a uma sobrelevação máxima de 436,80%. Após esse evento, o tempo de estabilização foi de 4,645 s.

Assim como nos demais ensaios, a ação de controle atingiu a saturação durante as

perturbações. O erro RMS global desse experimento foi de 0,4738 rad e o erro em regime foi de 0,0435 rad.

Figura 4.3 – Coleta de dados 03 com os ganhos  $K_P=160$ ,  $K_I=50$  e  $K_D=110$ .



Fonte: Próprio Autor.

Ao comparar os três ensaios, observa-se que todos os conjuntos de ganhos permitiram que o sistema respondesse às perturbações e retornasse para a região próxima da referência. Entretanto, cada ajuste apresentou características diferentes.

O Experimento 01 apresentou maior erro RMS, maior erro em regime e maior tempo de estabilização, indicando que o ganho integral de  $K_i = 10$  foi menos eficiente na redução do erro residual. O Experimento 03 apresentou a resposta mais rápida na primeira perturbação, com tempo de estabilização de 0,810 s, porém registrou o maior erro máximo absoluto entre os três ensaios, igual a 3,442 rad.

O Experimento 02 apresentou o melhor resposta transitória e precisão em regime. Essa configuração obteve o menor erro RMS, de 0,4605 rad, e o menor erro em regime, de 0,0203 rad. Além disso, os tempos de estabilização de 4,035 s e 4,600 s foram menores que o observado no Experimento 01 e próximos aos valores obtidos no terceiro ensaio para a perturbação de maior intensidade. Dessa forma, a configuração com  $K_p = 120$ ,  $K_i = 50$  e  $K_d = 110$  foi considerada a mais adequada entre as condições avaliadas.

Os resultados demonstram que o kit desenvolvido foi capaz de aplicar o controlador PID, responder aos distúrbios impostos e recuperar o equilíbrio dentro da faixa de operação analisada. Na Figura 4.4 são exibidos dois QR Codes correspondentes à vídeos do funcionamento do aeropêndulo invertido, bem com os links para os vídeos na legenda.



(a)



(b)

Figura 4.4 – Vídeo com o funcionamento do pêndulo invertido: (a) Vídeo 1, (b) Vídeo 2.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões, as considerações sobre o trabalho desenvolvido e, também, são discutidas propostas para trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

Neste trabalho, foi apresentado o projeto e desenvolvimento de um kit didático de baixo custo para o estudo do controle de equilíbrio, tendo como base a dinâmica de um pêndulo invertido do tipo aeropêndulo. O desenvolvimento incluiu todas as etapas essenciais para construção do protótipo, desde a definição do modelo físico até a modelagem mecânica, o projeto eletrônico, a fabricação das peças, a montagem do sistema e a implementação da estratégia de controle.

Do ponto de vista construtivo, o trabalho resultou em um aeropêndulo, com estrutura impressa em 3D, placa de circuito impresso projetada especificamente para o sistema, sensores e atuadores e uma arquitetura eletrônica capaz de suportar a operação do protótipo. A solução desenvolvida mostrou-se adequada ao propósito didático proposto, permitindo a demonstração prática dos princípios de equilíbrio e controle em um sistema naturalmente instável.

Na etapa de controle, os testes experimentais evidenciaram o funcionamento do sistema com diferentes ganhos do controlador PID, demonstrando capacidade de resposta às perturbações e de recuperação da posição de equilíbrio em condições operacionais adequadas. Embora o protótipo apresente limitação de faixa angular de operação, uma vez que, para variações muito grandes, o pêndulo pode sair da região de atuação do controlador e não retornar mesmo com saturação do sinal de controle. Essa condição não invalida o resultado alcançado, mas caracteriza-se como uma limitação esperada de sistemas reais com atuação limitada fisicamente.

O projeto cumpre um papel pedagógico relevante ao conectar teoria e prática em uma proposta alinhada à educação STEAM e à cultura *maker*, favorecendo a experimentação, o aprendizado ativo e a compreensão de conceitos de modelagem, instrumentação e controle. Também pode se destacar a acessibilidade da solução, pois o trabalho buscou empregar componentes e processos compatíveis com uma proposta de baixo custo, o que amplia o potencial de uso em ambientes acadêmicos com restrições orçamentárias.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos do trabalho foram atendidos, uma vez que foi possível desenvolver e validar um kit didático funcional, capaz de contribuir para o ensino

de sistemas dinâmicos e controle de equilíbrio. O protótipo final representa uma base para aplicações didáticas e para aprimoramentos futuros, consolidando o trabalho como uma solução prática, experimental e tecnicamente relevante para a formação em Engenharia de Controle e Automação.

## **5.2 Trabalhos futuros**

Destacam-se como trabalhos futuros a aplicação de diferentes dinâmicas de operação, como a expansão do sistema para mais um grau de liberdade. Uma possibilidade seria a substituição da base atual do protótipo por uma configuração que permita maior liberdade de movimento, tornando o sistema suscetível a quedas em mais de uma direção além da esquerda e da direita, como ocorre atualmente. Nessa nova configuração, apenas a troca da base já alteraria significativamente a dinâmica do sistema, exigindo uma nova modelagem e uma estrutura de suporte capaz de acomodar mais dois motores, posicionados acima do suporte dos motores atuais. Embora as ligações elétricas para o controle desses motores já existam, todo o estudo dinâmico precisaria ser refeito, uma vez que a massa total, o momento de inércia, o ponto de equilíbrio e a atuação passariam a ser diferentes, agora com quatro motores atuando no sistema.

Além disso, pode ser considerada como trabalho futuro a implementação de uma bateria portátil, já que atualmente o protótipo é alimentado por uma fonte externa. Outra possibilidade é a modelagem das hélices e dos suportes dos motores, com o objetivo de aumentar o torque ou a velocidade de rotação. Essas melhorias alterariam a dinâmica do sistema e podem ser tratadas como refinamentos do trabalho desenvolvido.

Também se propõe, como trabalho futuro, a modelagem, a impressão 3D e a avaliação experimental de um novo sistema de atuação, composto pelos suportes dos motores e pelas hélices. O desenvolvimento desse conjunto poderá considerar modificações na geometria, no posicionamento dos motores, no diâmetro e no perfil das hélices, buscando aumentar o torque aplicado ao pêndulo e/ou a velocidade de resposta do atuador. Além disso, a alteração das dimensões e da massa desse conjunto pode contribuir para a obtenção de um protótipo mais compacto e com melhor desempenho. Como essas modificações alteram a distribuição de massa, o momento de inércia e a força produzida pelo atuador, deverão ser acompanhadas de nova identificação ou modelagem dinâmica da planta, bem como de ajustes ou de uma nova sintonia do controlador.

## REFERÊNCIAS

- BARROS, L. Harrison Martins de. A cultura maker como estratégia de transformação educacional. **Revista Tópicos**, v. 3, n. 24, ago. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.16731351>>.
- CHEN, H.-C.; LIN, R.-S. Design of an h-bridge driver without dead-time generation using gate bias. **IEICE Electronics Express**, v. 10, n. 19, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1587/elex.10.20130656>>. Acesso em: 11.4.2026.
- Components101. **MX1508 DC Motor Driver with PWM Control**. 2021. Disponível em: <<https://components101.com/modules/mx1508-dc-motor-driver-pinout-features-datasheet>>. Acesso em: 5.4.2026.
- DroneBot Workshop. **Driving DC Motors with Microcontrollers**. 2023. Disponível em: <<https://dronebotworkshop.com/dc-motor-drivers/>>. Acesso em: 5.4.2026.
- FERNANDES, E. L.; SARTIN, K. R.; MELO, T. d. Modelagem, simulação e validação experimental do controle pid para um aeropêndulo. **Revista Foco**, v. 18, n. 11, p. 1–18, 2025.
- GIRÓN-SIERRA, J. M.; CHERKI, B.; CRUZ, J. A. d. l. A simple device and a project for the nonlinear control systems laboratory. **IEEE Transactions on Education**, v. 44, n. 3, p. 239–244, 2001. Disponível em: <[http://www.dacya.ucm.es/giron/PDF/gsAI11\\_01\\_IEEE\\_TEduc.pdf](http://www.dacya.ucm.es/giron/PDF/gsAI11_01_IEEE_TEduc.pdf)>.
- HALVERSON, E. R.; SHERIDAN, K. The maker movement in education. **Harvard Educational Review**, v. 84, n. 4, p. 495–504, 2014.
- MAIA, D. L.; CARVALHO, R. A. d.; APPELT, V. K. Abordagem steam na educação básica brasileira: uma revisão de literatura. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 17, n. 49, p. 68–87, 2021.
- MOHAMMED, I. K.; KHALAF, L. A. Design and simulation of an analog robust control for a realistic buck converter model. **Journal of Robotics and Control (JRC)**, v. 5, n. 5, p. 1336–1348, 2024. Disponível em: <<https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/article/view/22408>>. Acesso em: 11.4.2026.
- NETO, R. C. et al. An aeropendulum-based didactic platform for the learning of control engineering. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 34, p. 566–577, 2023.
- NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. Tradução e revisão técnica: Jackson Paul Matsuura.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010.
- OLIVEIRA, F. S. G.; MELO, Y. d. A. d.; RODRIGUEZ, M. V. Rodriguez y. Motivação: um desafio na aplicação das metodologias ativas no ensino superior. **Avaliação: Revista da Avaliação da Educação Superior**, v. 28, p. e023004, 2023. Acesso em: 04 mar. 2026. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/aval/a/GmWDp68P8YgkzcqwXP6G3Jg/>>.
- PRINCE, M. J. Does active learning work? a review of the research. **Journal of Engineering Education**, v. 93, n. 3, p. 223–231, 2004.

Quanser Inc. **QNET Practical Control Guide**: Document no. 851, revision 1.1. [S.l.], 2009. Pp. 47. Disponível em: <<https://www.scribd.com/document/730352884/QNET-Practical-Control-Guide>>. Acesso em: 8.5.2026.

REVOREDO, T. Simulação e prototipagem de baixo custo como apoio ao ensino de engenharia. **Revista de Ensino de Engenharia**, Associação Brasileira de Educação em Engenharia (ABENGE), v. 35, n. 1, p. 15–34, 2016. Disponível em: <<https://revista.abenge.org.br/index.php/abenge/article/download/1895/1070/3754>>.

Seeed Studio. **Primeiros Passos com Seeed Studio XIAO ESP32C3**. 2024. Disponível em: <[https://wiki.seeedstudio.com/pt-br/XIAO\\_ESP32C3\\_Getting\\_Started/](https://wiki.seeedstudio.com/pt-br/XIAO_ESP32C3_Getting_Started/)>. Acesso em: 4.4.2026.

Sharp Corporation. **PC817XxNSZ1B Series Datasheet**. [S.l.], 2023. Disponível em: <[https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/PC817XxNSZ1B\\_e.pdf](https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/PC817XxNSZ1B_e.pdf)>. Acesso em: 11.4.2026.

SPONG, M. W. The swing up control problem for the acrobot. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 15, n. 1, p. 49–55, 1995. Disponível em: <[https://www.diag.uniroma1.it/~oriolo/ur/material/Spong\\_SwingUp.pdf](https://www.diag.uniroma1.it/~oriolo/ur/material/Spong_SwingUp.pdf)>.

Texas Instruments. **LM340, LM340A and LM7805 Family Wide VIN 1.5-A Fixed Voltage Regulators Datasheet**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm340.pdf>>. Acesso em: 9.4.2026.

Texas Instruments. **LM7800 Series Positive Voltage Regulators**. 2024. Acesso em: 28 abr. 2026. Disponível em: <[https://www.ti.com/product/LM7800?keyMatch=7805&tisearch=universal\\_search&usecase=partmatches](https://www.ti.com/product/LM7800?keyMatch=7805&tisearch=universal_search&usecase=partmatches)>.

TRONSUN MOTOR. **8520-Q-2 Coreless DC Motor**: Precious metal-brush coreless dc motor. s.d. Folha de dados técnica. Faixa de operação de 1,5 V a 4,0 V; tensão nominal de 3,7 V; velocidade sem carga de 52 000 rpm. Disponível em: <<http://www.tronsunmotor.com>>. Acesso em: 2026-04-11.

VARASCHIM, F. H. et al. Utilização de um filtro complementar junto ao sensor mpu 6050. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, v. 7, n. 7, 2022. Disponível em: <[https://periodicos.ifpr.edu.br/MundiETG/pt\\_BR/article/view/2341/992](https://periodicos.ifpr.edu.br/MundiETG/pt_BR/article/view/2341/992)>. Acesso em: 11.4.2026.

XLSEMI. **XL4015: 5A 180KHz 36V Buck DC to DC Converter Datasheet**. [S.l.], 2015. Disponível em: <[https://www.tinytronics.nl/product\\_files/003615\\_xl4015-datasheet.pdf](https://www.tinytronics.nl/product_files/003615_xl4015-datasheet.pdf)>. Acesso em: 5.4.2026.

## APÊNDICE A – CÓDIGO DO CONTROLE ANGULAR DO AEROPÊNDULO

Neste apêndice é apresentado o código embarcado no ESP32 XIAO-C3 responsável pelo controle angular do aeropêndulo. O script reúne as rotinas de leitura do sensor MPU6050, filtragem do sinal, cálculo do controlador PID, acionamento dos motores e envio dos dados experimentais via BLE para o computador.

Programa .1 – Código do ESP32 XIO-C3.

```
// Bibliotecas utilizadas
#include <Wire.h>
#include <math.h>
#include <BLEDevice.h>
#include <BLEUtils.h>
#include <BLEServer.h>
#include <BLE2902.h>

// Endere o I2C do MPU6050
#define MPU_ADDR 0x68

// Limite máximo da amplitude de controle
#define u_max 1000.0

// UUIDs utilizados pelo serviço BLE
#define SERVICE_UUID "6E400001-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"
#define CHARACTERISTIC_UUID_TX "6E400003-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"
#define CHARACTERISTIC_UUID_RX "6E400002-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"

// Objetos responsáveis pela comunicação BLE
BLECharacteristic* pTxCharacteristic = nullptr;
BLEAdvertising* pAdvertising = nullptr;
bool deviceConnected = false;

// Estrutura utilizada para armazenar os dados enviados ao computador via BLE
```

```

struct SampleBLE {
    uint32_t tempo;
    float roll;
    float ref;
    float erro;
    float u;
};

// Classe responsvel pelo gerenciamento das conexes BLE
class MyServerCallbacks : public BLEServerCallbacks {
    void onConnect(BLEServer* pServer) override {
        deviceConnected = true;
    }

    void onDisconnect(BLEServer* pServer) override {
        deviceConnected = false;

        // Reinicia a divulga o do servi o BLE
        if (pAdvertising) pAdvertising->start();
    }
};

// Fun o responsvel pelo envio dos dados em tempo real
void sendRealtimeDataBLE(const SampleBLE& sample) {

    if (!deviceConnected || pTxCharacteristic == nullptr) //Verifica a conex o
        return;

    char buffer[100]; //Espa o disponvel para preenchimento do texto da mensa

    snprintf(buffer, sizeof(buffer), //Converte os valores num ricos em uma ni
        "%lu,%.3f,%.3f,%.3f,%.3f\n",
        sample.tempo,
        sample.roll,

```

```

        sample.ref,
        sample.erro,
        sample.u);

    pTxCharacteristic->setValue(buffer);
    pTxCharacteristic->notify();
}

// Variáveis utilizadas pelo temporizador de amostragem
hw_timer_t *timer = NULL;
volatile bool flag = false;

// Pinos utilizados para acionamento do motor
const int pwmPin = 4;
const int pwmPin2 = 5;

// Ganhos do controlador PID
float kp = 160.0;
float ki = 50.0;
float kd = 110.0;

// Variáveis internas do controlador PID
float interro = 0;
float erro = 0;
float derivada = 0;
float u = 0;

// Referência angular do sistema
float roll_ref = 0.0;

// Limites de operação do controlador
float limite_angulo = 8.0;
float deadband_erro = 0.0;

```

```

// Variáveis utilizadas para armazenar os dados brutos do MPU6050
int16_t acc_x_raw, acc_y_raw, acc_z_raw;
int16_t gyro_x_raw, gyro_y_raw, gyro_z_raw;

// Offset do giroscópio obtido durante a calibração
float gyro_off_x = 0;

// Variáveis dos filtros aplicados ao sinal angular
float roll_f1 = 0;
float roll_f2 = 0;
float roll_comp = 0;

// Parâmetros dos filtros digitais
const float fc_lp = 10.0;
const float alpha_comp = 0.98;

// Variável utilizada no cálculo do período de amostragem
unsigned long lastMicros = 0;

// Função executada a cada interrupção do temporizador
void IRAM_ATTR onTimer() {
    flag = true;
}

// Configuração inicial do MPU6050
void initMPU() {

    // Configuração dos registradores do sensor
    Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
    Wire.write(0x6B);
    Wire.write(0x01);
    Wire.endTransmission(true);

    Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);

```

```

Wire.write(0x1A);
Wire.write(0x04);
Wire.endTransmission(true);

Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
Wire.write(0x19);
Wire.write(0x04);
Wire.endTransmission(true);

Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
Wire.write(0x1B);
Wire.write(0x08);
Wire.endTransmission(true);

Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
Wire.write(0x1C);
Wire.write(0x08);
Wire.endTransmission(true);

delay(200);
}

// Leitura dos dados de acelermetro e giroscopio
void lerMPU() {

Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
Wire.write(0x3B);
Wire.endTransmission(false);

Wire.requestFrom((uint8_t)MPU_ADDR, (size_t)14, true);

if (Wire.available() >= 14) {

    acc_x_raw = (Wire.read() << 8) | Wire.read();

```

```

    acc_y_raw = (Wire.read() << 8) | Wire.read();
    acc_z_raw = (Wire.read() << 8) | Wire.read();

    Wire.read();
    Wire.read();

    gyro_x_raw = (Wire.read() << 8) | Wire.read();
    gyro_y_raw = (Wire.read() << 8) | Wire.read();
    gyro_z_raw = (Wire.read() << 8) | Wire.read();
  }
}

// Calibra o do offset do giroscopio
void calibrarGyroOffsets(int N) {

    double soma = 0;

    for (int i = 0; i < N; i++) {
        lerMPU();
        soma += gyro_x_raw;
        delay(2);
    }

    gyro_off_x = soma / N;
}

// C lculo do ngulo utilizando os dados do acelermetro
float calcRollAcc(float ay, float az) {
    return atan2(ay, az) * 180.0 / PI;
}

// Configura o inicial do sistema
void setup() {

```

```

Serial.begin(115200);

// Configura o dos canais PWM
ledcSetup(0, 5000, 10);
ledcAttachPin(pwmPin, 0);

ledcSetup(1, 5000, 10);
ledcAttachPin(pwmPin2, 1);

// Inicializa o da comunica o I2C
Wire.begin();
Wire.setClock(400000);

// Inicializa o e calibra o do MPU6050
initMPU();
delay(3000);
calibrarGyroOffsets(1000);

// Defini o da posi o inicial como referencia
lerMPU();

float ay = acc_y_raw / 8192.0;
float az = acc_z_raw / 8192.0;

float roll_ini = calcRollAcc(ay, az);

roll_f1 = roll_ini;
roll_f2 = roll_ini;
roll_comp = roll_ini;
roll_ref = roll_ini;

lastMicros = micros();

// Configura o do temporizador para amostragem peri dica

```

```

timer = timerBegin(0, 80, true);
timerAttachInterrupt(timer, &onTimer, true);
timerAlarmWrite(timer, 5000, true);
timerAlarmEnable(timer);

// Inicializa o do servi o BLE
BLEDevice::init("XIAO_ESP32C3_TCC");

BLEServer *pServer = BLEDevice::createServer();
pServer->setCallbacks(new MyServerCallbacks());

BLEService *pService = pServer->createService(SERVICE_UUID);

pTxCharacteristic = pService->createCharacteristic(
    CHARACTERISTIC_UUID_TX,
    BLECharacteristic::PROPERTY_NOTIFY
);

pTxCharacteristic->addDescriptor(new BLE2902());

pService->start();

pAdvertising = pServer->getAdvertising();
pAdvertising->addServiceUUID(SERVICE_UUID);
pAdvertising->start();

Serial.println("BLE_anunciando");
}

// Execu o principal
void loop() {

    // Aguarda o instante de amostragem definido pelo timer
    if (!flag) return;

```

```

flag = false;

// Leitura dos sensores
lerMPU();

// Calcula o período real entre duas amostras consecutivas.
// Esse valor é utilizado nos filtros digitais e no PID.
unsigned long now = micros();
float dt = (now - lastMicros) / 1000000.0;
lastMicros = now;

// Caso ocorra alguma inconsistência no tempo de amostragem,
// utiliza-se o valor nominal de 5 ms.
if (dt <= 0 || dt > 0.05)
    dt = 0.005;

// Conversão das leituras do acelerômetro para unidade g.
float ay = acc_y_raw / 8192.0;
float az = acc_z_raw / 8192.0;

// Conversão da leitura do giroscópio para graus por segundo,
float gyroX = ((float)gyro_x_raw - gyro_off_x) / 65.5;

// Estimativa do ângulo utilizando filtro complementar
float roll_acc = calcRollAcc(ay, az);

// Determina o coeficiente do filtro passa-baixa utilizado para reduzir o ruído
float tau_lp = 1.0 / (2.0 * PI * fc_lp);
float alpha_lp = tau_lp / (tau_lp + dt);

// Aplica o de dois filtros passa-baixa em cascata para suavizar o sinal
roll_f1 = alpha_lp * roll_f1 + (1 - alpha_lp) * roll_acc;
roll_f2 = alpha_lp * roll_f2 + (1 - alpha_lp) * roll_f1;

```

```

// Integra o da velocidade angular medida pelo giroscpio.
float roll_gyro = roll_comp + gyroX * dt;

// Filtro complementar:
// combina a estabilidade do acelermetro com a rapidez de resposta do giroscpio
roll_comp = alpha_comp * roll_gyro +
            (1 - alpha_comp) * roll_f2;

// C lculo do ngulo relativo a referncia
float roll = roll_comp - roll_ref;

// O controlador executado apenas enquanto o sistema estiver dentro da faixa
if (abs(roll) < limite_angulo) {

// C lculo do erro de controle.
erro = -roll;

if (fabs(erro) < deadband_erro)
    erro = 0;

// O termo derivativo obtido diretamente pela velocidade angular do giroscpio
derivada = -gyroX;

// Atualiza o do termo integral.
interro += erro * dt;

// Caso o ganho integral seja zero, a parcela integral fica desabilitada.
if (ki == 0.0)
    interro = 0;

// Equao do controlador PID.
u = kp * erro +
    ki * interro +
    kd * derivada;

```

```

// Saturação da ação de controle
if (u > u_max) u = u_max;
if (u < -u_max) u = -u_max;

// Acionamento do motor conforme o sinal de controle
if (u < 0) {
    ledcWrite(1, -u);
    ledcWrite(0, 0);
} else {
    ledcWrite(0, u);
    ledcWrite(1, 0);
}

} else {

    // Caso a inclinação ultrapasse o limite permitido, o controlador desativa o motor
    interro = 0;
    u = 0;

    ledcWrite(0, 0);
    ledcWrite(1, 0);
}

// Montagem da estrutura com os dados experimentais
SampleBLE amostra;

amostra.tempo = millis();
amostra.roll = roll_comp;
amostra.ref = roll_ref;
amostra.erro = erro;
amostra.u = u;

// Envio dos dados para o computador via BLE
sendRealtimeDataBLE(amostra);

```

}

## APÊNDICE B – CÓDIGO DE CONEXÃO E ENVIO DE DADOS VIA BLE.

Neste apêndice é apresentado o script em Python utilizado para estabelecer a conexão BLE com o ESP32, receber os pacotes de dados enviados pelo protótipo e armazená-los em arquivo CSV. Esse procedimento possibilitou o registro das amostras experimentais utilizadas na análise dos resultados.

Programa .1 – Código de conexão e envio dados via BLE.

```
# Bibliotecas utilizadas no script
import asyncio
import csv
import time
from pathlib import Path
from bleak import BleakScanner, BleakClient

# Nome do dispositivo BLE que ser procurado
DEVICE_NAME = "XIAO_ESP32C3_TCC"

# UUID da caracterstica responsavel pelo envio dos dados
TX_UUID = "6E400003-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"

# Tempo total de coleta dos dados
DURACAO_SEGUNDOS = 30

# Nome do arquivo CSV onde os dados ser o armazenados
ARQUIVO_CSV = Path("dados_ble_30s.csv")

# Lista utilizada para armazenar as amostras recebidas
linhas_recebidas = []

# Variavel para registrar o inicio da coleta
inicio_coleta = None
```

```

# Função executada sempre que um novo pacote de dados é recebido
def notification_handler(sender, data):
    global linhas_recebidas

    try:
        # Converte os bytes recebidos para texto
        texto = data.decode("utf-8").strip()

        # Separa os valores utilizando a vírgula como delimitador
        partes = texto.split(",")

        # Verifica se a mensagem possui os cinco campos esperados
        if len(partes) != 5:
            return

        # Converte os dados recebidos para seus respectivos tipos
        timestamp_ms = int(partes[0])
        roll = float(partes[1])
        ref = float(partes[2])
        erro = float(partes[3])
        u = float(partes[4])

        # Armazena os dados recebidos em uma lista
        linhas_recebidas.append([timestamp_ms, roll, ref, erro, u])

    except Exception:
        # Ignora pacotes inválidos sem interromper a coleta
        pass

# Função principal responsável pela conexão e aquisição dos dados
async def main():
    global inicio_coleta

```

```

print ("Procurando_ESP32...")

# Procura o dispositivo BLE pelo nome
device = await BleakScanner.find_device_by_name(
    DEVICE_NAME,
    timeout=10.0
)

# Verifica se o dispositivo foi encontrado
if device is None:
    print ("ESP32_n o_encontrado.")

    return

print (f"Encontrado:_{device.name}_{device.address}")
print ("Conectando...")

# Realiza a conex o com o dispositivo
async with BleakClient(device) as client:

    print ("Conectado:", client.is_connected)

    # Inicia o recebimento das notifica es BLE
    await client.start_notify(TX_UUID, notification_handler)

    print (f"Coletando_dados_por_{DURACAO_SEGUNDOS}_segundos...")

    # Registra o instante de in cio da coleta
    inicio_coleta = time.time()

    # Mant m a coleta ativa pelo tempo definido
    await asyncio.sleep(DURACAO_SEGUNDOS)

    # Encerra o recebimento das notifica es

```

```

        await client.stop_notify(TX_UUID)

    print (f"Total_de_amstras_recebidas:_{len(linhas_recebidas)}")

    # Cria o arquivo CSV para armazenar os dados coletados
    with open(ARQUIVO_CSV, "w", newline="", encoding="utf-8") as f:
        writer = csv.writer(f)

        # Escreve o cabe alho do arquivo
        writer.writerow([
            "timestamp_ms",
            "roll",
            "ref",
            "erro",
            "u"
        ])

        # Escreve todas as amostras coletadas
        writer.writerows(linhas_recebidas)

    print (f"Arquivo_salvo_em:_{ARQUIVO_CSV.resolve()}")

# Executa o programa principal
    asyncio.run(main())

```

## APÊNDICE C – CÓDIGO DE GERAÇÃO DOS GRÁFICOS EMPILHADOS.

Neste apêndice é apresentado o script em Python utilizado para o tratamento dos dados experimentais e a geração dos gráficos empregados na análise dos resultados. O código realiza a leitura do arquivo CSV, organiza as amostras e produz as curvas empilhadas de ângulo, erro e ação de controle apresentadas no capítulo de resultados.

Programa .1 – Código Python para geração dos gráficos a partir do arquivo .CSV gerado pelo Apêndice B.

```
# Bibliotecas utilizadas no script
import asyncio
import csv
import time
from pathlib import Path
from bleak import BleakScanner, BleakClient

# Nome do dispositivo BLE que ser procurado
DEVICE_NAME = "XIAO_ESP32C3_TCC"

# UUID da caracterstica responsavel pelo envio dos dados
TX_UUID = "6E400003-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"

# Tempo total de coleta dos dados
DURACAO_SEGUNDOS = 30

# Nome do arquivo CSV onde os dados ser o armazenados
ARQUIVO_CSV = Path("dados_ble_30s.csv")

# Lista utilizada para armazenar as amostras recebidas
linhas_recebidas = []

# Variavel para registrar o inicio da coleta
inicio_coleta = None
```

```

# Função executada sempre que um novo pacote de dados é recebido
def notification_handler(sender, data):
    global linhas_recebidas

    try:
        # Converte os bytes recebidos para texto
        texto = data.decode("utf-8").strip()

        # Separa os valores utilizando a vírgula como delimitador
        partes = texto.split(",")

        # Verifica se a mensagem possui os cinco campos esperados
        if len(partes) != 5:
            return

        # Converte os dados recebidos para seus respectivos tipos
        timestamp_ms = int(partes[0])
        roll = float(partes[1])
        ref = float(partes[2])
        erro = float(partes[3])
        u = float(partes[4])

        # Armazena os dados recebidos em uma lista
        linhas_recebidas.append([timestamp_ms, roll, ref, erro, u])

    except Exception:
        # Ignora pacotes inválidos sem interromper a coleta
        pass

# Função principal responsável pela conexão e aquisição dos dados
async def main():
    global inicio_coleta

```

```

print ("Procurando_ESP32...")

# Procura o dispositivo BLE pelo nome
device = await BleakScanner.find_device_by_name(
    DEVICE_NAME,
    timeout=10.0
)

# Verifica se o dispositivo foi encontrado
if device is None:
    print ("ESP32_n o_encontrado.")
    return

print (f"Encontrado:_{device.name}_{device.address}")
print ("Conectando...")

# Realiza a conex o com o dispositivo
async with BleakClient(device) as client:

    print ("Conectado:", client.is_connected)

    # Inicia o recebimento das notifica es BLE
    await client.start_notify(TX_UUID, notification_handler)

    print (f"Coletando_dados_por_{DURACAO_SEGUNDOS}_segundos...")

    # Registra o instante de in cio da coleta
    inicio_coleta = time.time()

    # Mant m a coleta ativa pelo tempo definido
    await asyncio.sleep(DURACAO_SEGUNDOS)

    # Encerra o recebimento das notifica es
    await client.stop_notify(TX_UUID)

```

```

print (f"Total_de_amstras_recebidas:_{len(linhas_recebidas)}")

# Cria o arquivo CSV para armazenar os dados coletados
with open(ARQUIVO_CSV, "w", newline="", encoding="utf-8") as f:
    writer = csv.writer(f)

    # Escreve o cabe alho do arquivo
    writer.writerow([
        "timestamp_ms",
        "roll",
        "ref",
        "erro",
        "u"
    ])

    # Escreve todas as amostras coletadas
    writer.writerows(linhas_recebidas)

print (f"Arquivo_salvo_em:_{ARQUIVO_CSV.resolve()}")

# Executa o programa principal
asyncio.run(main())

```