

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica



Ivan da Silva Filho

Projeto de um Aeropêndulo Para Fins de Estudo em Técnicas de Controle

Campina Grande – PB

Agosto de 2026

Ivan da Silva Filho

Projeto de um Aeropêndulo Para Fins de Estudo em Técnicas de Controle

Relatório de Estágio Supervisionado apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Antonio Marcus Nogueira Lima, D.Sc

Orientador

Área de Concentração

Controle e Automação

Campina Grande – PB

Agosto de 2026

Ivan da Silva Filho

Projeto de um Aeropêndulo Para Fins de Estudo em Técnicas de Controle

Relatório de Estágio Supervisionado apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em _____ / _____ / _____

Antonio Marcus Nogueira Lima, D.Sc
Orientador

Rafael Bezerra Correia Lima, D.Sc
Avaliador

Campina Grande – PB

Agosto de 2026

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por toda a providência durante essa longa jornada. Sua presença constante, nas mais variadas formas, foi fundamental para que eu continuasse caminhando rumo ao meu objetivo.

Ao meu pai, Ivan da Silva, e à minha mãe, Márcia Cristina Silva Paixão, por todo o apoio, carinho, conselhos dados e, acima de tudo, companhia. Essa conquista não é tão somente minha, mas deles também. Desde sempre, tive a presença deles como pilar fundamental em minha vida, com os quais pude compartilhar alegremente cada conquista. Mas, mais do que isso, em todos os momentos de dificuldade, eles se faziam presentes para que eu não os enfrentasse sozinho. Ambos são presentes de Deus em minha vida, pelos quais sou muito grato a Ele por ter me dado a felicidade e a honra de chamá-los de pais.

Às minhas irmãs, Izabel Cristina Silva Oliveira e Izadora Cristina da Silva, por cada momento de amizade e apoio. Tê-las em minha vida reforça o quão privilegiado sou por ter a família que tenho.

À Maria Gabriela, por ter sido muito importante para mim desde que a conheci. Em muitos momentos de dificuldade, pude encontrar nela apoio e carinho. Obrigado por tornar meus dias mais leves e, principalmente, felizes.

Ao professor Antonio Marcus Nogueira Lima, por ter me dado a oportunidade de tê-lo como orientador. Essa etapa foi, de fato, uma das mais determinantes na minha formação acadêmica, regada a muito aprendizado.

À Laís, que é uma das minhas amizades mais longevas e importantes. Tê-la como uma grande amiga desde os meus 12 anos de idade é, de fato, uma grande felicidade e foi algo fundamental para diversas etapas da minha vida.

Ao Arthur, Davi, Felipe, Igor e Justino, por cada momento de descontração, algo determinante para que a jornada não se tornasse maçante. Obrigado por terem compartilhado, além disso, cada momento de aprendizado, esforço e conquista comigo. Tenho certeza de que, para além dessa etapa, os terei como grandes amigos.

Aos meus amigos Arthur Henrique, Juliana e Valmir. Conhecê-los no meio da caminhada ajudou a tornar o processo mais leve.

Aos meus colegas do eROBÓTICA, com os quais pude compartilhar diversos momentos de descontração ao longo do período de estágio. Ao Seu Emanuel, por toda a disponibilidade quando precisei de apoio técnico.

A todos que, seja com momentos de amizade, ensinamentos ou de alguma outra forma, contribuíram para esta trajetória, minha sincera gratidão.

"Se vi mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes"

(Isaac Newton)

Resumo

Este trabalho apresenta o projeto de um Aeropêndulo, visando desenvolver uma plataforma de estudo de métodos de controle de sistemas. O objetivo principal é montar uma estrutura compatível e adaptável, de modo que possa ser utilizada e melhorada por estudantes que estão desenvolvendo seus conhecimentos em técnicas de controle. O projeto foi desenvolvido utilizando um *Brushless DC Motor* (BLDC — motor de corrente contínua sem escovas), um *encoder* rotativo do tipo incremental e um microcontrolador STM32 Nucleo-F446RE da STMicroelectronics. A metodologia envolveu o desenvolvimento de um interfaceamento eficiente do encoder, além de um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) para o sinal *Pulse Width Modulation* (PWM — Modulação por Largura de Pulso) para o controle adequado do motor. Os resultados indicam a eficácia do sistema como uma plataforma eficiente para fins de aprendizado, evidenciando a importância de um aeropêndulo como um meio didático adequado e facilitador para estudantes que visam desenvolver seus conhecimentos em controladores digitais.

Palavras-chave: Aeropêndulo, *Encoder*, *BLDC*, *PID*, *STM32*.

Abstract

This work presents the design of an Aeropendulum, aiming to develop a platform for studying system control methods. The main objective is to build a compatible and adaptable structure so that it can be used and improved by students who are developing their knowledge in control techniques. The project was developed using a Brushless DC Motor (BLDC), an incremental rotary encoder, and an STM32 Nucleo-F446RE microcontroller from STMicroelectronics. The methodology involved developing an efficient interface for the encoder, as well as a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller for the Pulse Width Modulation (PWM) signal to properly control the motor. The results indicate the system's effectiveness as an efficient platform for learning purposes, highlighting the importance of an aeropendulum as a suitable educational tool and facilitator for students aiming to develop their knowledge in digital controllers.

Keywords: Aeropendulum, Encoder, BLDC, PID, STM32.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de corpo livre do aeropêndulo. 16
Figura 2 – Formato do sinal de comando do ESC. 18
Figura 3 – Sinais em quadratura e as quatro transições utilizadas na decodificação. 19
Figura 4 – Vista geral da plataforma anterior. 23
Figura 5 – Placa Arduino MEGA 2560 da plataforma anterior. 23
Figura 6 – Arduino Motor Shield Rev3 da plataforma anterior. 24
Figura 7 – Componentes do sistema de propulsão da plataforma anterior. 24
Figura 8 – Subsistema de medição da plataforma anterior. 25
Figura 9 – Vista geral da plataforma construída. 31
Figura 10 – Detalhe do conjunto de articulação, com mancais, acoplador flexível e *encoder*. 31
Figura 11 – Detalhe da fixação do motor BLDC à extremidade do braço. 32
Figura 12 – Diagrama de blocos da plataforma. 32
Figura 13 – Plataforma em operação durante o ensaio em malha fechada. 43

Lista de tabelas

Tabela 1 – Composição da plataforma anterior. 22
Tabela 2 – Proposta inicial e configuração final da nova plataforma. 28
Tabela 3 – Componentes da estrutura mecânica da nova plataforma. 29
Tabela 4 – Ligações entre a placa Nucleo-F446RE e os demais elementos. 33
Tabela 5 – Configuração do temporizador TIM2 em modo de *encoder*. 35
Tabela 6 – Sequência da rotina de ensaio em malha aberta do conjunto propulsor. 38
Tabela 7 – Parâmetros do controlador PID implementado. 40
Tabela 8 – Síntese do atendimento aos objetivos específicos. 44

Sumário

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 Local do Estágio 12
1.2 Motivação 12
1.3 Objetivos 13
1.4 Organização do Relatório 13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 15
2.1 O Aeropêndulo 15
2.2 Modelo Dinâmico Não Linear 16
2.3 Acionamento: do Motor de Corrente Contínua ao Conjunto BLDC com ESC 17
2.3.1 A Abordagem da Bancada Anterior 17
2.3.2 A Configuração Adotada Neste Trabalho 17
2.4 Medição da Posição Angular com *Encoder* Incremental 19
2.5 Controlador PID Digital 20
3 ATIVIDADES REALIZADAS 22
3.1 Levantamento e Diagnóstico da Bancada Existente 22
3.1.1 Subsistema Eletrônico de Controle 23
3.1.2 Subsistema de Propulsão 24
3.1.3 Subsistema de Medição 25
3.1.4 Diagnóstico e Decisão 26
3.2 Definição dos Requisitos da Nova Plataforma 27
3.3 Seleção dos Componentes 28
3.3.1 Substituição do Controlador 28
3.3.2 Substituição do Motor 29
3.4 Projeto e Construção da Estrutura Mecânica 29
3.5 Integração Eletroeletrônica 32
3.6 Ambiente de Desenvolvimento e Estratégia de Validação 33
3.7 Desenvolvimento do Interfaceamento do *Encoder* 34
3.7.1 Configuração do Temporizador 34
3.7.2 Conversão para Posição Angular 35
3.8 Desenvolvimento do Acionamento do ESC 36
3.8.1 Dimensionamento do Temporizador 36
3.8.2 Módulo de Acionamento 37
3.8.3 Rotina de Ensaio 37
3.9 Implementação do Controlador PID 38
3.9.1 Estrutura do Laço de Controle 38
4 RESULTADOS 41
4.1 Validação do Interfaceamento do *Encoder* 41

4.2 Validação do Acionamento do ESC 42
4.3 Ensaio em Malha Fechada 42
4.4 Avaliação da Estrutura Mecânica 43
4.5 Síntese dos Resultados 44
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 45
5.1 Síntese das Atividades 45
5.2 Limitações 45
5.3 Trabalhos Futuros 46
5.4 Contribuições para a Formação Profissional 47

REFERÊNCIAS 48

1 Introdução

O ensino de sistemas de controle apoia-se, tradicionalmente, em uma base matemática densa, construída sobre modelos dinâmicos, análise de estabilidade e projeto de compensadores. Essa base, embora indispensável, tende a permanecer abstrata para o estudante enquanto não houver uma planta física sobre a qual as decisões de projeto produzam efeitos observáveis. A discrepância entre a resposta simulada e o comportamento do sistema real é, justamente, onde se manifestam os fenômenos que a base teórica costuma omitir, tais como não linearidades, atrasos de atuação, ruído de medição, saturação e limitações da plataforma de processamento.

O aeropêndulo ocupa uma posição privilegiada nesse contexto. Trata-se de um pêndulo cuja haste é articulada em torno de um eixo fixo e que possui, em sua extremidade livre, um conjunto propulsor composto por motor e hélice. O empuxo gerado pela hélice produz o torque que desloca a haste em relação ao eixo vertical, e a posição angular resultante é a variável a ser controlada. O sistema é não linear, por conta do termo gravitacional dependente do seno do ângulo e da relação quadrática entre a velocidade da hélice e o empuxo produzido, é subatuado no sentido de dispor de um único atuador para uma dinâmica de segunda ordem, e é suficientemente rápido para tornar visíveis os efeitos de um ajuste inadequado de ganhos. Ao mesmo tempo, é seguro, compacto e construído com componentes de baixo custo, o que o torna adequado ao ambiente de laboratório didático (ENIKOV; CAMPA, 2012; LUCENA et al., 2021).

Além do valor pedagógico, o aeropêndulo funciona como um análogo simplificado de sistemas propulsados por hélices, notadamente os veículos aéreos não tripulados de asas rotativas. A dinâmica que relaciona o comando enviado ao acionamento, a velocidade da hélice e o empuxo resultante é, em essência, a mesma que governa a sustentação e a atitude desses veículos, ainda que reduzida a um único grau de liberdade. Isso explica a permanência do aeropêndulo como plataforma de investigação, com trabalhos recentes que exploram desde controladores de ordem fracionária (JANDERA et al., 2025) até formulações lineares a parâmetros variantes (Valdés Olivares et al., 2023) e estratégias baseadas em dados (BAYATI et al., 2025).

1.1 LOCAL DO ESTÁGIO

O projeto de estágio apresentado neste documento foi desenvolvido no Laboratório de Automação e Robótica (eROBÓTICA), localizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O laboratório oferece um ambiente acadêmico e tecnológico voltado ao ensino, à pesquisa e à inovação nas áreas de sistemas inteligentes e automação. A carga horária total dedicada ao projeto foi de 880 horas, tendo como orientador o Prof. Dr. Antonio Marcus Nogueira Lima, com supervisão do Prof. Dr. Marcos Ricardo Alcântara Morais.

1.2 MOTIVAÇÃO

O laboratório já dispunha de uma bancada de aeropêndulo, construída em trabalhos anteriores e documentada em publicação própria (LUCENA et al., 2021). Essa montagem havia sido concebida com um abordagem específica, o de refinar o modelo do atuador por meio da medição direta das grandezas elétricas do motor de corrente contínua, de modo a reduzir as diferenças entre o comportamento simulado e o observado. Contudo, após um período prolongado sem uso, a bancada encontrava-se inoperante, e a demanda inicial do estágio consistia em avaliar o que seria necessário para recolocá-la em funcionamento.

O levantamento realizado revelou um quadro em que o esforço de recuperação superava o de um redesenho. O achado decisivo foi o comprometimento do sensor de posição angular, cuja saída apresentava uma descontinuidade que corrompe a medição realimentada e, por consequência, o desempenho do sistema em malha fechada. Além disso, o desgaste avançado das partes mecânicas também mostrou-se fator determinante.

Um segundo motivo, de natureza distinta, reforçou a decisão. Pretendia-se que a nova bancada permitisse implementar a lei de controle sobre um sistema operacional de tempo real, prática importante em sistemas embarcados de controle, o que exige um microcontrolador de recursos incompatíveis com a placa Arduino em torno da qual a montagem anterior havia sido construída.

Diante desse diagnóstico, a proposta do estágio foi reformulada, deixando de ser a restauração de uma bancada específica e passando a ser o projeto de uma nova plataforma, concebida desde o início com foco em robustez mecânica, integridade da cadeia de medição, disponibilidade de componentes, capacidade de operação com sistema operacional de tempo real e facilidade de customização por outros estudantes.

Essa mudança de escopo carrega uma consequência importante. A bancada anterior era um instrumento de pesquisa voltado a um problema de modelagem bem delimitado, ao passo que a plataforma aqui proposta é, antes de tudo, um instrumento

didático, cuja qualidade se mede pela facilidade com que um estudante consegue nela implementar, ensaiar e comparar diferentes estratégias de controle.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral do estágio é projetar e construir uma plataforma de aeropêndulo funcional, adaptável e de baixo custo, destinada ao estudo prático de métodos de controle de sistemas por estudantes de graduação em Engenharia Elétrica.

Como objetivos específicos, definiram-se:

a) avaliar o estado da bancada de aeropêndulo existente no laboratório e determinar a viabilidade técnica de sua recuperação;

b) especificar um novo conjunto de componentes eletromecânicos, considerando disponibilidade, custo, robustez, integridade da cadeia de medição, maturidade das ferramentas de desenvolvimento associadas e capacidade de operação com sistema operacional de tempo real;

c) conceber e construir uma estrutura mecânica que sustente o conjunto propulsor com rigidez adequada e que permita modificações posteriores pelos usuários;

d) desenvolver o interfaceamento entre o microcontrolador e o *encoder* rotativo incremental, obtendo a medição da posição angular da haste;

e) desenvolver o acionamento do motor *Brushless DC* (BLDC, motor de corrente contínua sem escovas) por meio da geração do sinal *Pulse Width Modulation* (PWM, Modulação por Largura de Pulso) exigido pelo *Electronic Speed Controller* (ESC, controlador eletrônico de velocidade);

f) implementar um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) digital que feche a malha de posição angular, servindo como ensaio de validação da plataforma.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O restante deste relatório está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, abrangendo o modelo dinâmico não linear do aeropêndulo, o modelo de empuxo, as particularidades do acionamento de motores BLDC por meio de ESC, os princípios de medição com *encoders* incrementais em quadratura e a formulação do controlador PID digital. O Capítulo 3 relata as atividades realizadas ao longo do estágio, na ordem em que ocorreram, do levantamento e diagnóstico da bancada existente à implementação do controlador PID, passando pela definição dos requisitos, pela seleção dos componentes, pelo projeto e construção da estrutura mecânica, pela

integração eletroeletrônica e pelo desenvolvimento dos módulos de *firmware*. O Capítulo 4 relata os ensaios realizados e discute o comportamento observado. Por fim, o Capítulo 5 sintetiza as atividades, aponta as limitações identificadas e sugere direções para a continuidade do trabalho.

2 Fundamentação Teórica

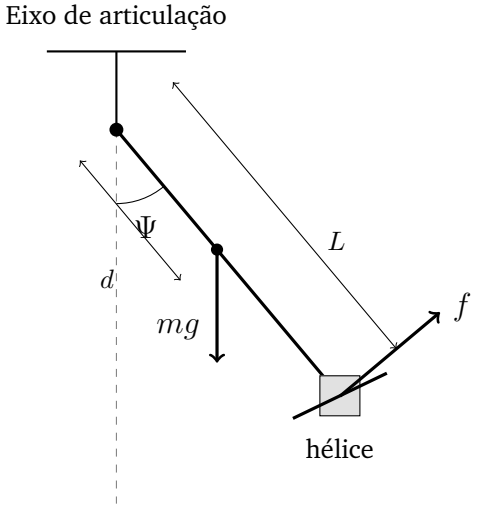
Este capítulo reúne os elementos teóricos necessários à compreensão do projeto. Parte-se da descrição física do aeropêndulo e da dedução de seu modelo dinâmico não linear, discute-se em seguida a questão da modelagem do atuador e as implicações da adoção de um motor BLDC acionado por ESC, apresentam-se os princípios de medição com *encoders* incrementais em quadratura e, por fim, formula-se o controlador PID digital tal como implementado na plataforma.

2.1 O AEROPÊNDULO

O aeropêndulo consiste em uma haste rígida articulada em torno de um eixo horizontal fixo, dotada, em sua extremidade livre, de um conjunto propulsor formado por um motor elétrico e uma hélice. O acionamento do motor produz um empuxo aproximadamente perpendicular à haste, e o torque resultante desloca o conjunto angularmente em relação à posição de repouso, que coincide com a vertical descendente. A grandeza controlada é a posição angular da haste, e a variável manipulada é o comando enviado ao acionamento do motor.

O diagrama de corpo livre do sistema está representado na Figura 1. Sobre a haste atuam três contribuições de torque em relação ao ponto de articulação: o torque restaurador devido ao peso do conjunto, o torque resistivo devido ao atrito viscoso no mancal e o torque motor devido ao empuxo da hélice.

Figura 1 – Diagrama de corpo livre do aeropêndulo.



Fonte: Adaptado de Lucena et al. (2021).

2.2 MODELO DINÂMICO NÃO LINEAR

Aplicando a segunda lei de Newton para o movimento de rotação em torno do eixo de articulação, e adotando a posição angular Ψ medida a partir da vertical descendente e a velocidade angular Ω como variáveis de estado, obtém-se a representação em espaço de estados dada por

$$\frac{d\Psi}{dt} = \Omega, \tag{1}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{mgd}{J}\,\mathrm{sen}\Psi - \frac{C}{J}\,\Omega + \frac{L}{J}\,f, \tag{2}$$

em que m é a massa do conjunto móvel, g é a aceleração da gravidade, d é a distância do ponto de articulação ao centro de massa do conjunto, J é o momento de inércia da haste em relação ao eixo de articulação, C é o coeficiente de atrito viscoso associado ao eixo de rotação, L é a distância do ponto de articulação ao ponto de aplicação do empuxo e f é a força de empuxo produzida pela hélice.

A não linearidade da Equação (2) manifesta-se em dois pontos distintos. O primeiro é o termo gravitacional, proporcional a $\mathrm{sen}\Psi$, que faz com que o torque restaurador varie ao longo da faixa de operação e que, portanto, o ganho estático do sistema dependa do ponto de equilíbrio considerado. O segundo está na própria geração do empuxo, que se relaciona à velocidade angular da hélice, denotada por ω, por meio de

$$f = K_q\,\omega^2, \tag{3}$$

em que K_q é o coeficiente de empuxo, dependente da geometria da hélice e das condições do escoamento. A dependência quadrática implica que a mesma variação de velocidade produz variações distintas de empuxo conforme o regime em que o motor esteja operando.

A consequência prática dessas duas não linearidades é que um controlador linear projetado a partir da linearização em torno de um ponto de equilíbrio, procedimento usual na análise clássica (OGATA, 2010), apresenta desempenho satisfatório apenas em uma vizinhança desse ponto. Esse é, precisamente, um dos aspectos que tornam o aeropêndulo interessante como bancada didática, pois permite que o estudante observe experimentalmente a degradação do desempenho ao afastar-se do ponto de projeto.

2.3 ACIONAMENTO: DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA AO CONJUNTO BLDC COM ESC

O modelo apresentado na Seção 2.2 descreve a dinâmica mecânica e aerodinâmica, mas trata a geração do empuxo a partir da velocidade da hélice sem explicitar como essa velocidade é produzida. O fechamento dessa lacuna exige um modelo do atuador, e é neste ponto que a arquitetura adotada neste trabalho se afasta da adotada na bancada anterior.

2.3.1 A Abordagem da Bancada Anterior

Na plataforma construída anteriormente no laboratório, o atuador era um motor de corrente contínua com escovas, acionado por uma ponte H a partir de um sinal PWM. Nessa configuração, a velocidade do eixo relaciona-se com a tensão de armadura v_a e com a corrente de armadura i_a por meio da equação elétrica do motor, o que permite, conhecidas a resistência de armadura e a constante de força contramotriz, escrever o empuxo em função de grandezas elétricas mensuráveis (LUCENA et al., 2021).

O valor dessa formulação está em substituir uma caixa-preta por um modelo com significado físico. Ocorre que ela impõe uma exigência de instrumentação considerável, pois requer a medição da corrente de armadura e da tensão efetivamente entregue ao motor, esta última complicada pela queda de tensão não linear na ponte H, que varia com a corrente circulante. A bancada anterior atendia a essa exigência por meio dos pinos de sensoriamento de corrente do acionador e do modo de medição diferencial do conversor analógico-digital da placa controladora.

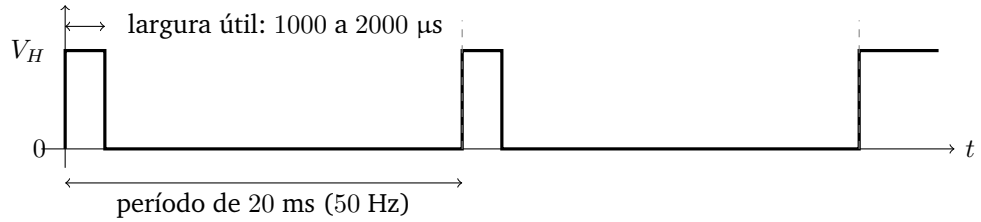
2.3.2 A Configuração Adotada Neste Trabalho

A plataforma desenvolvida neste estágio emprega um motor BLDC acionado por um ESC. Essa escolha, justificada no Capítulo 3, altera de forma significativa a natureza

da interface de comando e, por consequência, o que se pode e o que não se pode modelar.

O motor BLDC não possui comutação mecânica. A sequência de energização de suas fases é determinada eletronicamente pelo ESC, que também é responsável por estimar a posição do rotor, tipicamente pela leitura da força contraeletromotriz na fase não energizada, e por aplicar suas próprias malhas internas de proteção, aceleração e limitação de corrente. O ESC recebe do controlador um sinal de comando cuja informação está codificada na largura do pulso, seguindo o mesmo protocolo dos servomotores. O período do sinal é de 20 ms, correspondente a uma frequência de 50 Hz, e a largura útil do pulso varia entre 1000 µs, que corresponde ao comando mínimo, e 2000 µs, que corresponde ao comando máximo. A Figura 2 ilustra esse formato.

Figura 2 – Formato do sinal de comando do ESC.



Fonte: Autoria própria.

A implicação metodológica é direta. Entre o comando emitido pelo microcontrolador e o empuxo produzido, se encontra todo o processamento interno do ESC, ao qual não se tem acesso e cujas grandezas elétricas não são disponibilizadas em nenhum terminal de medição. Não há, portanto, como reproduzir na nova plataforma a estratégia de modelagem descrita na Subseção 2.3.1, uma vez que as variáveis que a sustentam não são observáveis. O conjunto formado por ESC, motor e hélice comporta-se, para efeito de modelagem, como um bloco cuja entrada é uma largura de pulso e cuja saída é um empuxo, e cuja caracterização deve ser feita experimentalmente, por identificação a partir de dados de entrada e saída.

Essa restrição não invalida a plataforma, mas define o seu perfil. Trata-se de uma bancada orientada ao projeto e à comparação de leis de controle, e não ao refinamento do modelo eletromecânico do atuador. Em contrapartida, ganha-se em robustez, pois o motor BLDC não possui escovas sujeitas a desgaste, em densidade de potência e em disponibilidade comercial dos componentes.

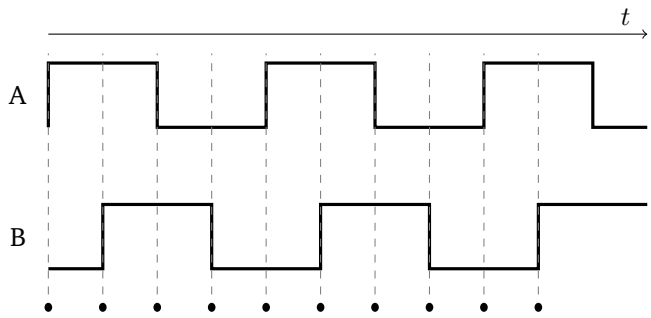
Um aspecto operacional relevante do ESC é o procedimento de armamento. Por segurança, o dispositivo só habilita o acionamento após reconhecer o comando mínimo mantido de forma estável durante um intervalo de alguns segundos a partir da energização. Enquanto esse reconhecimento não ocorre, o ESC ignora quaisquer comandos superiores. Qualquer *firmware* desenvolvido para a plataforma deve, portanto,

iniciar aplicando o comando mínimo e aguardar esse intervalo antes de habilitar a malha de controle.

2.4 MEDIÇÃO DA POSIÇÃO ANGULAR COM *ENCODER* INCREMENTAL

A medição da posição angular da haste é feita por um *encoder* rotativo incremental do tipo em quadratura. O dispositivo produz dois trens de pulsos, designados canais A e B, gerados por um disco ranhurado solidário ao eixo. Os dois canais possuem a mesma frequência, proporcional à velocidade de rotação, mas encontram-se defasados de $90°$ elétricos entre si, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 – Sinais em quadratura e as quatro transições utilizadas na decodificação.



contagem em ambas as bordas de ambos os canais (decodificação $\times 4$)

Fonte: Autoria própria.

Duas informações são extraídas desses sinais. A primeira é o deslocamento, obtido pela contagem de transições. A segunda é o sentido de rotação, determinado pela ordem em que as bordas dos dois canais ocorrem, pois o canal que se adianta inverte-se quando o sentido de giro se inverte. Essa propriedade é o que permite ao contador operar de forma bidirecional, incrementando em um sentido e decrementando no outro.

Ao contabilizar as bordas de subida e de descida de ambos os canais, obtém-se a chamada decodificação em quadrupla resolução, ou decodificação $\times 4$, que multiplica por quatro o número de contagens por revolução em relação ao número nominal de pulsos por revolução do dispositivo. Para o *encoder* de 600 pulsos por revolução empregado neste trabalho, resulta

$$N_c = 4 \times 600 = 2400 \text{ contagens por revolução}, \tag{4}$$

o que corresponde a uma resolução angular de

$$\Delta\theta = \frac{360°}{2400} = 0{,}15°. \tag{5}$$

A conversão da contagem acumulada n para a posição angular, em graus, é dada por

$$\theta = \frac{n}{N_c} \times 360°. \tag{6}$$

Como o *encoder* incremental fornece apenas deslocamento relativo, e não posição absoluta, a origem da medição corresponde ao estado do contador no instante da inicialização. Cabe ao procedimento de operação garantir que o sistema parta de uma posição conhecida, tipicamente a de repouso.

Uma característica relevante do dispositivo utilizado é o tipo de sua saída. Trata-se de uma saída NPN em coletor aberto, na qual o transistor de saída apenas impõe o nível lógico baixo, deixando o nível alto indefinido. Isso exige a presença de resistores de *pull-up* entre cada canal e a alimentação lógica, sem os quais os níveis lidos pelo microcontrolador ficam sujeitos a ruído e as contagens tornam-se equivocadas.

2.5 CONTROLADOR PID DIGITAL

O controlador PID é a estratégia de realimentação mais difundida na prática industrial e constitui o ponto de partida natural para a validação de uma bancada de controle (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2006). Em sua forma paralela contínua, a ação de controle $u(t)$ resulta da soma de três contribuições calculadas sobre o erro $e(t)$, definido como a diferença entre a referência e a saída medida, conforme

$$u(t) = K_p\, e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau + K_d\, \frac{de(t)}{dt}, \tag{7}$$

em que K_p, K_i e K_d são, respectivamente, os ganhos proporcional, integral e derivativo.

A implementação em um microcontrolador exige a discretização da Equação (7) em um período de amostragem T_s (FRANKLIN et al., 2013). Aproximando a integral por acumulação retangular e a derivada por diferença regressiva, obtém-se, para o instante de amostragem k,

$$I[k] = I[k-1] + e[k]\, T_s, \tag{8}$$

$$D[k] = \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s}, \tag{9}$$

$$u[k] = K_p\, e[k] + K_i\, I[k] + K_d\, D[k]. \tag{10}$$

Três cuidados adicionais são necessários na aplicação ao aeropêndulo.

O primeiro diz respeito à natureza circular da variável medida. Como a posição angular é normalizada na faixa de $0°$ a $360°$, o erro calculado pela subtração direta pode assumir valores superiores a $180°$ em módulo, o que faria o controlador conduzir o sistema pelo caminho mais longo. A correção consiste em mapear o erro para a faixa de $-180°$ a $180°$ por meio de

$$e \leftarrow \begin{cases} e - 360°, & \text{se } e > 180°, \\ e + 360°, & \text{se } e < -180°, \\ e, & \text{caso contrário.} \end{cases} \tag{11}$$

O segundo cuidado refere-se à saturação do atuador. A largura de pulso enviada ao ESC é limitada ao intervalo de 1000 a 2000 µs, e a ação de controle calculada pode exceder essa faixa. Quando isso ocorre de forma prolongada, o termo integral continua a acumular sem que o aumento correspondente se traduza em ação efetiva, fenômeno conhecido como *windup* do integrador, que se manifesta como sobressinal excessivo e lentidão na recuperação. A medida corretiva mais simples, e a adotada neste trabalho, consiste em limitar o próprio acumulador a uma faixa fixa, de modo que

$$I[k] \leftarrow \max\left(I_{\min},\ \min\left(I_{\max},\ I[k]\right)\right). \tag{12}$$

O terceiro cuidado está no mapeamento entre a ação de controle e o comando do atuador. Como o ESC não produz empuxo útil próximo ao comando mínimo, e como o aeropêndulo exige empuxo permanente para sustentar qualquer posição diferente da vertical descendente, a ação de controle é somada a uma largura de pulso de polarização P_0, situada acima do comando mínimo, resultando em

$$P[k] = \max\left(P_{\min},\ \min\left(P_{\max},\ P_0 + u[k]\right)\right), \tag{13}$$

com $P_{\min} = 1000$ µs e $P_{\max} = 2000$ µs.

3 Atividades Realizadas

Este capítulo relata as atividades desenvolvidas ao longo do estágio, apresentadas na ordem cronológica em que ocorreram. O trabalho começou pelo levantamento da bancada de aeropêndulo já existente no laboratório, cujo diagnóstico levou à reformulação da proposta, seguiu pela definição dos requisitos da nova plataforma, pela seleção dos componentes e pelo projeto e construção da estrutura mecânica, e se encerrou com o desenvolvimento e o ensaio dos três módulos de *firmware* responsáveis pela medição, pelo acionamento e pelo controle em malha fechada. Cada seção descreve o que foi feito e registra as decisões tomadas, com as razões que as sustentam, uma vez que é nesse nível que residem as escolhas passíveis de revisão por quem venha a estender o trabalho.

3.1 LEVANTAMENTO E DIAGNÓSTICO DA BANCADA EXISTENTE

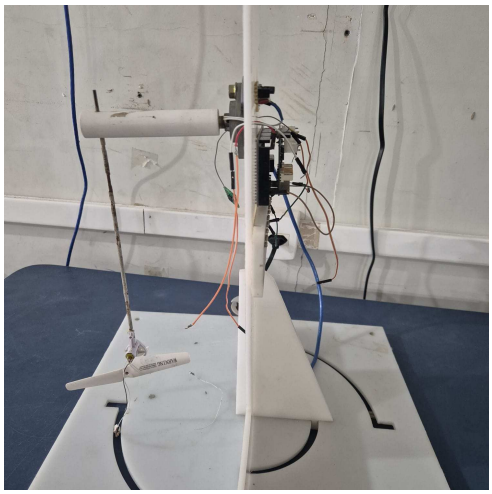
A demanda inicial do estágio consistia em recuperar a bancada de aeropêndulo já disponível no laboratório, cuja configuração está descrita na Tabela 1 e cuja aparência geral pode ser vista na Figura 4.

Tabela 1 – Composição da plataforma anterior.

Subsistema	**Componente**
Atuador	Motor de corrente contínua com escovas, do tipo *coreless*
Transmissão	Caixa de redução acoplada à hélice
Sensor de posição	AS5040, sensor magnético rotativo com saída PWM
Condicionamento de sinal	Filtro passa-baixa de segunda ordem
Acionamento	Arduino Motor Shield Rev3, baseado no circuito integrado L298
Controlador	Arduino MEGA 2560
Estrutura	Suportes em poliestireno

Fonte: Autoria própria, a partir do levantamento realizado.

Figura 4 – Vista geral da plataforma anterior.



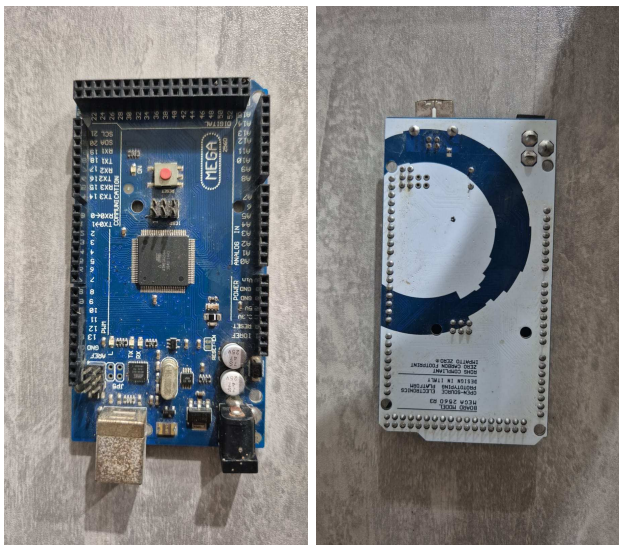
Fonte: Autoria própria.

O levantamento foi conduzido de forma sistemática, avaliando cada subsistema quanto à integridade física e, sempre que possível, quanto à funcionalidade, por meio de ensaios isolados. O procedimento foi antecedido pelo estudo da dissertação e do artigo que originaram a bancada (LUCENA et al., 2021), de modo que a avaliação pudesse ser conforme o propósito original do projeto.

3.1.1 Subsistema Eletrônico de Controle

A placa Arduino MEGA 2560, mostrada na Figura 5, não apresentava danos aparentes de *hardware* e era reconhecida normalmente pelo computador.

Figura 5 – Placa Arduino MEGA 2560 da plataforma anterior.

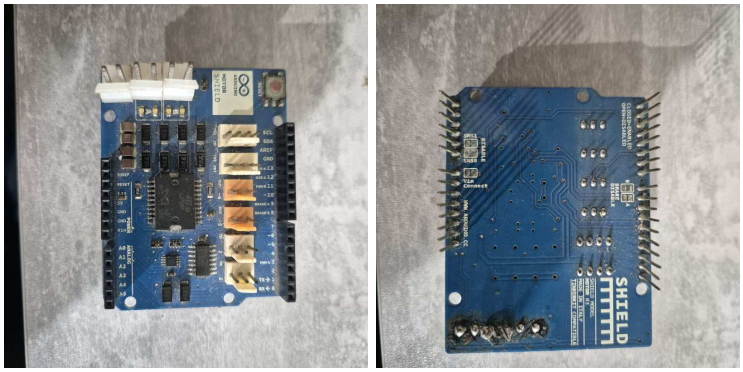


(a) Vista frontal (b) Vista do verso

Fonte: Autoria própria.

O Arduino Motor Shield Rev3, apresentado na Figura 6, também não apresentava danos aparentes e foi submetido a ensaio funcional, no qual se mostrou operante. Esse acionador é baseado no circuito integrado L298 e dispõe de terminais próprios de sensoriamento de corrente, recurso que a bancada anterior explorava para a medição da corrente de armadura (ARDUINO, 2023).

Figura 6 – Arduino Motor Shield Rev3 da plataforma anterior.



(a) Vista frontal (b) Vista do verso

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Subsistema de Propulsão

O conjunto propulsor foi avaliado peça a peça, conforme mostra a Figura 7. A haste se encontrava bastante desgastada e oxidada ao longo de toda a sua extensão, condição que compromete tanto a rigidez estrutural quanto a repetibilidade dos ensaios, uma vez que a corrosão altera a distribuição de massa e a resposta do conjunto a esforços. O motor de corrente contínua apresentava ambos os terminais íntegros e, uma vez alimentado por fonte externa de 9 V através do Motor Shield previamente validado, se mostrou funcional. A caixa de redução não apresentava defeitos aparentes e, por consequência do ensaio bem-sucedido do motor, foi considerada adequada.

Figura 7 – Componentes do sistema de propulsão da plataforma anterior.



(a) Haste (b) Motor de corrente contínua (c) Caixa de redução

Fonte: Autoria própria.

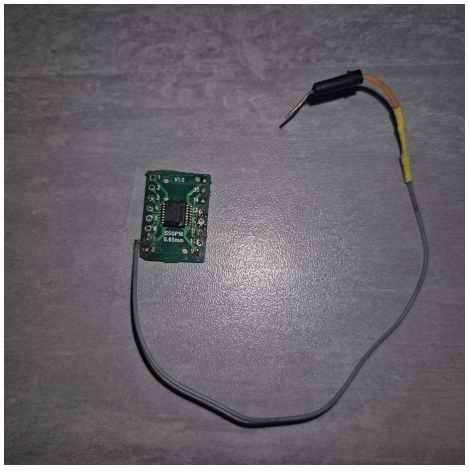
3.1.3 Subsistema de Medição

O sensor magnético AS5040, que codifica a posição angular absoluta na razão cíclica de um sinal PWM (AMS AG, 2015), se encontrava montado sobre um adaptador SSOP16 cujas soldagens necessitavam de restauração. Os resistores e capacitores que compõem o filtro passa-baixa de segunda ordem, responsável por converter o sinal PWM do sensor em um nível médio adequado à conversão analógico-digital, aparentavam estar em boas condições. Ambos os conjuntos estão mostrados na Figura 8.

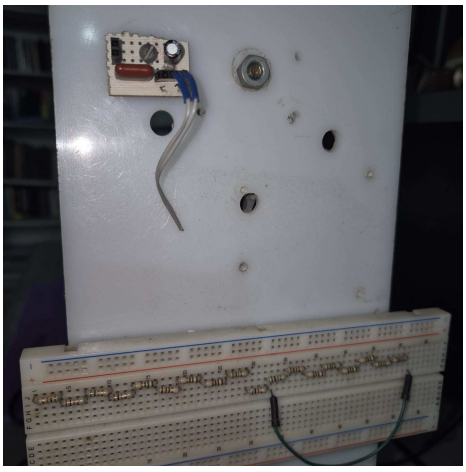
O achado mais grave de todo o levantamento, contudo, veio da avaliação do próprio sensor, cujo funcionamento se mostrou sensivelmente prejudicado. A saída PWM apresentava um salto na tensão média entregue após a filtragem, isto é, uma descontinuidade no valor lido que não correspondia a deslocamento algum da haste.

A gravidade desse defeito afeta a posição que a medição ocupa na malha. A cadeia de aquisição da bancada anterior converte o deslocamento angular em razão cíclica, a razão cíclica em nível médio de tensão pelo filtro passa-baixa, e o nível médio em um valor digital pelo conversor analógico-digital, de modo que a posição angular é lida de forma indireta, ao final de três conversões encadeadas. Um salto na tensão média corrompe essa leitura em um ponto anterior a qualquer processamento, e se propaga integralmente para o erro calculado pelo controlador e, portanto, para a ação de atuação. O desempenho do aeropêndulo é afetado de forma direta, e nenhuma sintonia de controlador compensa um sensor que informa uma posição em que o sistema não se encontra.

Figura 8 – Subsistema de medição da plataforma anterior.



(a) Adaptador SSOP16 com o sensor AS5040



(b) Filtro passa-baixa de segunda ordem

Fonte: Autoria própria.

3.1.4 Diagnóstico e Decisão

O quadro obtido ao final do levantamento é ambíguo quando se olha componente a componente, pois boa parte das peças, isoladamente, se mostrou funcional. A conclusão se torna consolidada, contudo, quando se distingue o que é desgaste recuperável do que compromete a função do instrumento, e quando se acrescenta o que a bancada precisaria passar a fazer. Três fatores pesaram na decisão, apresentados a seguir em ordem de peso.

O fator determinante foi o estado do sensor AS5040, descrito na Subseção 3.1.3. O salto na tensão média de sua saída PWM inutiliza a medição de posição angular, que é a grandeza realimentada e, portanto, a informação sobre a qual todo o restante da bancada se apoia. Diferentemente de uma peça desgastada, que degrada o desempenho de forma gradual e previsível, um sensor que reporta uma descontinuidade inexistente introduz um erro que não se distingue, do ponto de vista do controlador, de uma perturbação real na planta. Enquanto os demais achados aumentavam o custo da recuperação, este colocava em dúvida o próprio resultado dela.

O segundo fator é a exigência de suporte a sistema operacional de tempo real. Um dos propósitos da nova plataforma é permitir que estudantes implementem a lei de controle como tarefa periódica escalonada, com base de tempo determinística e concorrência explícita entre aquisição, controle e telemetria, prática comum em sistemas embarcados de controle. O Arduino MEGA 2560, construído sobre um microcontrolador de 8 bits com recursos de memória limitados, não comporta essa organização, e a arquitetura da bancada anterior estava inteiramente amarrada a ele. Esse se trata de um requisito que nenhuma recuperação atenderia, pois não decorre do estado de conservação da montagem, mas de sua concepção.

O terceiro fator é o estado da haste, cujo desgaste e oxidação tornariam necessária sua substituição e, em seguida, a recaracterização dos parâmetros mecânicos do conjunto, uma vez que massa, momento de inércia e posição do centro de massa são grandezas que entram diretamente nas Equações (1) e (2).

Os dois primeiros fatores são, por si sós, suficientes. Um inviabiliza a bancada como instrumento de medição confiável, e o outro a torna incapaz de atender ao uso pretendido mesmo que plenamente restaurada. Somados ao último, que eleva o custo de tempo da recuperação, se tem um processo cujo esforço e cujo risco de resultado eram comparáveis ou superiores aos de um redesenho, com a desvantagem adicional de preservar uma arquitetura construída para um objetivo de pesquisa distinto daquele que o laboratório demandava. Foi constatado, portanto, que a recuperação da plataforma não era viável, e o projeto foi reavaliado.

3.2 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DA NOVA PLATAFORMA

A reformulação da proposta partiu do estabelecimento de requisitos alinhados ao novo propósito, o de servir como bancada didática de controle. Os requisitos adotados foram os seguintes.

a) **Robustez mecânica.** A estrutura deve suportar o empuxo do conjunto propulsor e a vibração associada sem deformação permanente nem perda de alinhamento, de modo que ensaios repetidos ao longo de semestres produzam resultados comparáveis.

b) **Disponibilidade e custo dos componentes.** As peças devem ser de aquisição corrente no mercado nacional, preferencialmente pertencentes a cadeias de suprimento consolidadas, para que a reposição não dependa de itens descontinuados.

c) **Facilidade de customização.** A plataforma deve permitir que estudantes modifiquem a geometria, substituam componentes ou acrescentem instrumentação sem necessidade de ferramental especializado.

d) **Maturidade das ferramentas de desenvolvimento.** O controlador deve contar com ambiente de desenvolvimento estável, documentação acessível e periféricos de temporização adequados à decodificação em quadratura e à geração de PWM.

e) **Capacidade de operação com sistema operacional de tempo real.** O controlador deve dispor de núcleo, memória e suporte de ferramentas compatíveis com a execução de um *Real-Time Operating System* (RTOS, sistema operacional de tempo real), de modo que a lei de controle possa ser implementada como tarefa periódica escalonada, com base de tempo determinística, e que aquisição, controle e telemetria possam ser organizados como tarefas concorrentes com prioridades distintas.

f) **Integridade e simplicidade da cadeia de medição.** O sensor de posição angular deve oferecer resolução compatível com a dinâmica do sistema e entregar a informação em forma digital direta, sem as etapas de filtragem analógica e conversão analógico-digital exigidas pela solução anterior. O objetivo é reduzir o número de conversões encadeadas entre o deslocamento físico e o valor lido, eliminando os pontos em que uma falha se manifesta como erro de posição indistinguível de uma perturbação, conforme observado na Subseção 3.1.3.

3.3 SELEÇÃO DOS COMPONENTES

A partir dos requisitos, foi elaborada uma primeira proposta de configuração. Ao longo do desenvolvimento, dois de seus itens precisaram ser substituídos, conforme registrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Proposta inicial e configuração final da nova plataforma.

Subsistema	**Proposta inicial**	**Configuração final**
Controlador	LAUNCHXL-F28379D (Texas Instruments)	STM32 Nucleo-F446RE (STMicroelectronics)
Atuador	BLDC EMAX MT2206-1900KV	BLDC LHI 2212 920KV
Acionamento	ESC SimonK 30 A	ESC SimonK 30 A
Sensor de posição	*Encoder* incremental NPN, 600 ppr	*Encoder* incremental NPN, 600 ppr
Alimentação	Bateria LiPo 3S1P	Bateria LiPo 3S1P

Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Substituição do Controlador

A escolha inicial pela placa LAUNCHXL-F28379D era justificada pelas características do processador digital de sinais nela embarcado, particularmente adequado a aplicações de controle de máquinas elétricas. Não foi possível, entretanto, desenvolver o código planejado com essa plataforma dentro do prazo do estágio, o que motivou sua substituição pela placa STM32 Nucleo-F446RE.

A nova escolha atende com folga aos requisitos estabelecidos. O microcontrolador STM32F446RET6 dispõe de temporizadores com modo de *encoder* em *hardware*, que realizam a decodificação em quadratura sem intervenção do processador, e de temporizadores de propósito geral adequados à geração do sinal do ESC (STMICROELECTRONICS, 2021). O ambiente STM32CubeIDE, associado à ferramenta de configuração gráfica STM32CubeMX, permite estabelecer a configuração de relógios e periféricos de forma verificável, e a biblioteca de abstração de *hardware* fornecida pelo fabricante reduz o esforço de codificação de baixo nível. Do ponto de vista didático, essa combinação favorece que outros estudantes retomem e estendam o trabalho.

Quanto ao requisito de operação com RTOS, que motivou parte da decisão de redesenho, o atendimento é integral. O STM32F446RET6 é construído sobre um núcleo Arm Cortex-M4 de 32 bits, com unidade de ponto flutuante e memória suficiente para acomodar um núcleo de escalonamento e suas tarefas, e a família Cortex-M dispõe dos recursos de que um RTOS depende, notadamente o temporizador de sistema e as exceções dedicadas à troca de contexto. A cadeia de ferramentas do fabricante integra o FreeRTOS, com a interface padronizada CMSIS-RTOS, de modo que a configuração de tarefas, filas e semáforos é feita na mesma ferramenta gráfica usada para os periféricos (STMICROELECTRONICS, 2023). A migração da lei de controle para uma tarefa periódica

escalonada se torna, assim, uma extensão natural do trabalho aqui desenvolvido, e não uma reconstrução, conforme apontado no Capítulo 5.

3.3.2 Substituição do Motor

O motor EMAX MT2206-1900KV, previsto na proposta inicial, foi substituído pelo LHI 2212 920KV. A constante de velocidade menor, de 920 rpm por volt contra os 1900 rpm por volt do modelo original, resulta, para a mesma tensão de alimentação, em rotação mais baixa e maior torque disponível, característica compatível com hélices de maior diâmetro e com a produção de empuxo em regime mais estável. Para uma bancada didática, na qual interessa mais a suavidade e a previsibilidade da resposta do que o desempenho máximo, a troca é favorável.

3.4 PROJETO E CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA

A estrutura foi concebida com materiais de aquisição corrente e usinagem simples, atendendo aos requisitos de robustez e customização. Sua composição está detalhada na Tabela 3.

Tabela 3 – Componentes da estrutura mecânica da nova plataforma.

Elemento	**Função**
Canos, joelhos e conexões T de PVC	Formação do pórtico de sustentação
Base de madeira	Aumento da massa da base, garantindo estabilidade ao conjunto
Haste linear de 8 mm (vertical)	Coluna de sustentação do eixo de articulação
Haste linear de 8 mm (horizontal)	Braço do pêndulo, sobre o qual atua o empuxo
Dois mancais com rolamentos	Suporte do eixo de rotação com baixo atrito
Acoplador flexível	União entre o eixo do *encoder* e o eixo de rotação
Conectores impressos em PETG	União das hastes e fixação do motor à haste

Fonte: Autoria própria.

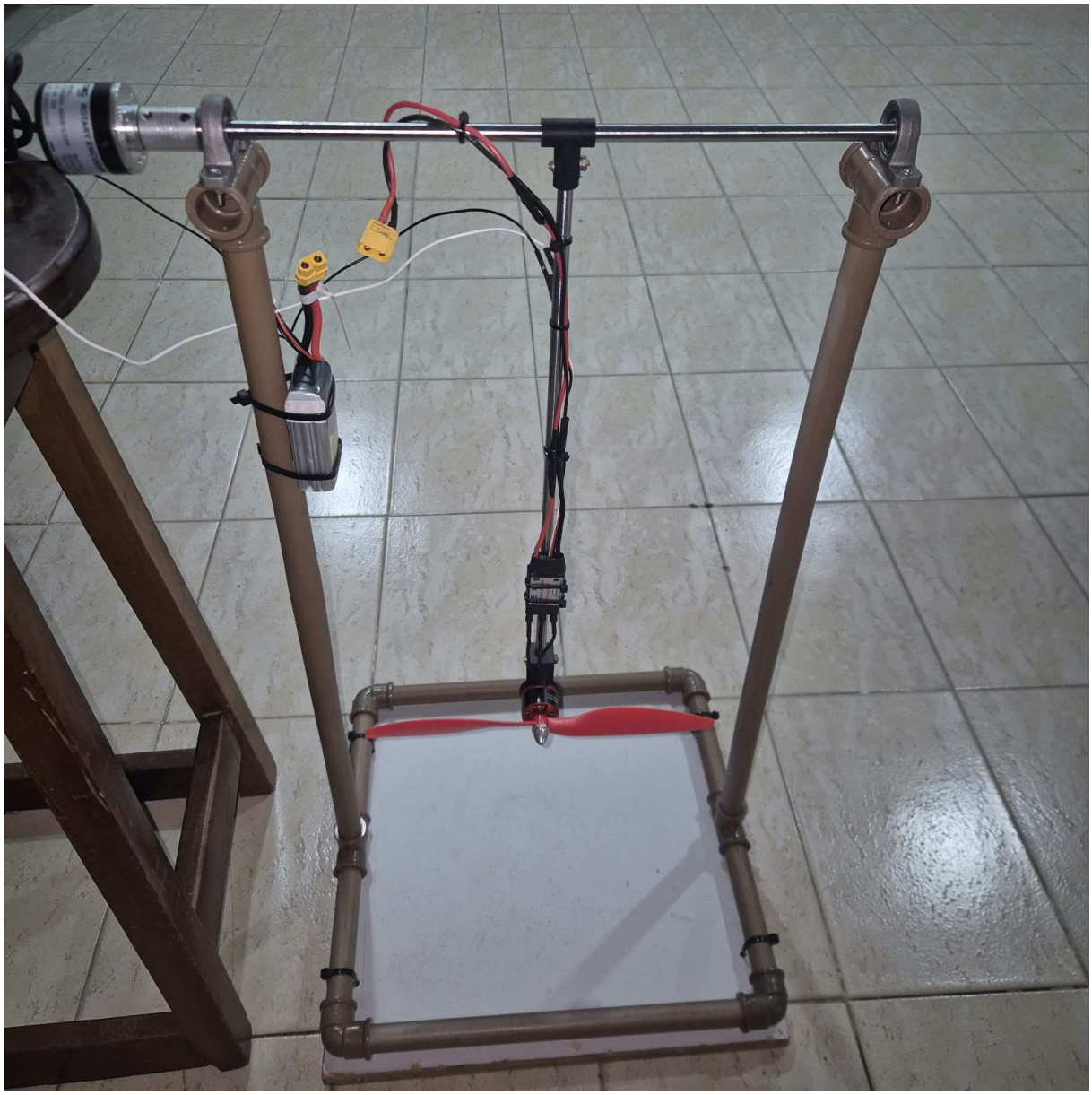
Três decisões de projeto merecem justificativa. A primeira é o uso de hastes lineares de aço de 8 mm em vez de tubos de PVC no braço do pêndulo, que confere rigidez suficiente para que a haste não flexione sob o empuxo, evitando que a deflexão introduza uma dinâmica parasita não contemplada no modelo. A segunda é o emprego de mancais com rolamentos, que reduz e, sobretudo, torna mais previsível o atrito no eixo de articulação, grandeza representada pelo coeficiente C na Equação (2). A terceira é o uso do acoplador flexível entre o eixo de rotação e o eixo do *encoder*, que tolera pequenos desalinhamentos de montagem sem transmitir esforços radiais ao sensor, prolongando sua vida útil e preservando a qualidade da medição.

O recurso à impressão tridimensional em PETG para os conectores atende diretamente ao requisito de customização. Os elementos que definem a geometria do sistema,

isto é, o comprimento efetivo do braço, a posição de fixação do motor e o ângulo de montagem, se concentram em peças cujo arquivo de projeto pode ser modificado e reimpresso por qualquer usuário da plataforma, sem alteração das demais partes.

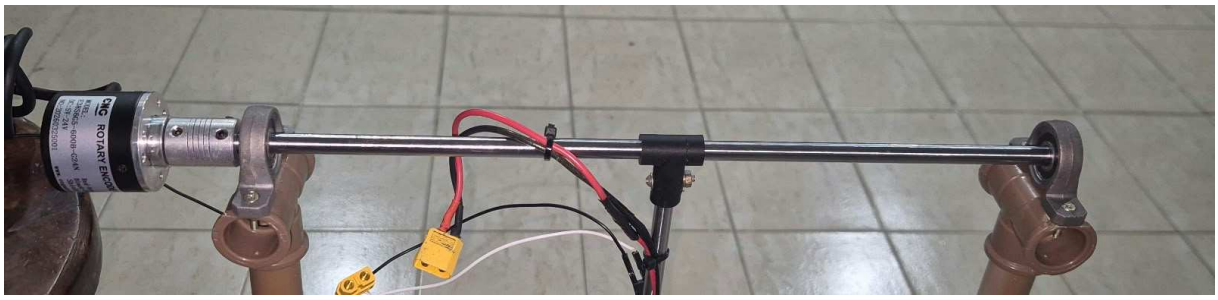
Definida a concepção, passou-se à execução da montagem. O pórtico de PVC é fixado sobre a base de madeira, que fornece a massa necessária para que o conjunto não se desloque sob a reação ao empuxo. A haste linear vertical, presa ao pórtico, sustenta os dois mancais com rolamentos, entre os quais se posiciona o eixo de rotação. A haste linear horizontal, que constitui o braço do pêndulo, é solidária a esse eixo por meio de um conector impresso em PETG, e o motor BLDC é fixado à extremidade livre por meio de outro conector, também impresso. O eixo do *encoder* é unido ao eixo de rotação pelo acoplador flexível, de modo que a posição angular do braço seja transmitida diretamente ao sensor.

Figura 9 – Vista geral da plataforma construída.



Fonte: Autoria própria.

Figura 10 – Detalhe do conjunto de articulação, com mancais, acoplador flexível e *encoder*.



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 – Detalhe da fixação do motor BLDC à extremidade do braço.

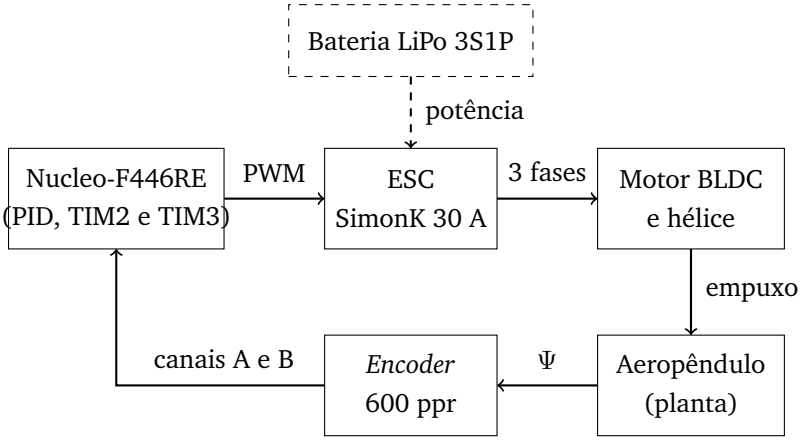


Fonte: Autoria própria.

3.5 INTEGRAÇÃO ELETROELETRÔNICA

A arquitetura do sistema está representada na Figura 12. O fluxo de informação é o de uma malha de realimentação convencional, na qual o microcontrolador calcula a ação de controle a partir do erro entre a referência e a posição medida e a converte em uma largura de pulso, ao passo que o ESC traduz esse comando em energização das fases do motor.

Figura 12 – Diagrama de blocos da plataforma.



Fonte: Autoria própria.

As ligações elétricas entre o microcontrolador e os demais elementos estão sintetizadas na Tabela 4. A escolha dos pinos decorre da disponibilidade das funções alternativas do microcontrolador, pois PA0 e PA1 são os canais 1 e 2 do temporizador TIM2, que suporta o modo de *encoder*, e PA6 é o canal 1 do temporizador TIM3, empregado na geração do PWM (STMICROELECTRONICS, 2021).

Tabela 4 – Ligações entre a placa Nucleo-F446RE e os demais elementos.

Pino	**Função alternativa**	**Conexão**
PA0	TIM2_CH1	Canal A do *encoder* incremental
PA1	TIM2_CH2	Canal B do *encoder* incremental
PA6	TIM3_CH1	Entrada de sinal do ESC
PA2	USART2_TX	Comunicação serial pelo depurador integrado
PA3	USART2_RX	Comunicação serial pelo depurador integrado
GND	Não se aplica	Referência comum com o ESC e com o *encoder*

Fonte: Autoria própria.

Dois pontos merecem destaque na integração elétrica. O primeiro é a necessidade de referência de terra comum entre a placa Nucleo e o ESC, sem a qual o sinal de comando não possui nível de referência definido e o acionamento se torna errático. O segundo é a separação entre os caminhos de potência e de sinal, pois a bateria LiPo alimenta exclusivamente o ESC e o motor, ao passo que a placa Nucleo é alimentada pela porta USB do computador durante o desenvolvimento, o que evita que transientes de corrente do motor perturbem a alimentação deste.

Quanto ao *encoder*, conforme discutido na Seção 2.4, sua saída NPN em coletor aberto exige resistores de *pull-up* nos canais A e B. Essa necessidade pode ser atendida tanto por resistores externos quanto pela habilitação dos resistores internos do microcontrolador na configuração dos pinos.

3.6 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO E ESTRATÉGIA DE VALIDAÇÃO

O *firmware* foi desenvolvido no ambiente STM32CubeIDE, com a configuração de periféricos realizada pela ferramenta gráfica STM32CubeMX integrada, que gera os arquivos de inicialização a partir de um arquivo de projeto com extensão `.ioc` (STMICROELECTRONICS, 2023). O código de aplicação foi escrito em linguagem C sobre a biblioteca de abstração de *hardware* do fabricante (STMICROELECTRONICS, 2020).

A adoção da biblioteca de abstração, em vez do acesso direto aos registradores, foi uma decisão deliberada. Ela introduz uma camada de sobrecarga que, em uma aplicação de desempenho crítico, seria questionável, mas neste caso a legibilidade e a facilidade de reprodução por outros estudantes prevalecem, e a dinâmica do aeropêndulo é lenta o suficiente para acomodá-la com folga.

Cabe registrar o que os três módulos aqui descritos não fazem. Embora a capacidade de operação com RTOS tenha sido um dos requisitos que motivaram a escolha do controlador, conforme discutido na Subseção 3.3.1, o *firmware* desenvolvido neste estágio executa diretamente sobre o *hardware*, sem núcleo de escalonamento. Portanto, o

método utilizado foi o do *superloop*, que consiste em um laço de repetição *while* infinito. Essa foi uma decisão de sequência, não de princípio, pois a validação de periféricos é mais fácil de depurar em um programa de fluxo único, e introduzir concorrência antes de confirmar o funcionamento de cada subsistema acrescentaria uma classe inteira de falhas ao diagnóstico. A plataforma está preparada para a migração, que é tratada no Capítulo 5 como continuidade do trabalho.

Estabelecido o ambiente, o desenvolvimento e a validação da plataforma foram organizados de forma incremental, em três etapas de *firmware* desenvolvidas e ensaiadas separadamente antes de sua integração. A motivação para essa organização é o isolamento de falhas, pois um ensaio que reúna simultaneamente medição, atuação e controle não permite atribuir um comportamento anômalo a uma causa específica.

a) **Interfaceamento do *encoder***, implementado no projeto `encoder_interfacing`. Objetivo: verificar a correta decodificação em quadratura, a conversão de contagens para graus e a coerência do sentido de rotação, sem qualquer acionamento do motor.

b) **Acionamento do ESC**, implementado no projeto `esc_pwm_test`. Objetivo: verificar a geração do sinal de comando na temporização correta, o procedimento de armamento e a resposta do conjunto propulsor a variações graduais de comando, sem realimentação.

c) **Controle em malha fechada**, implementado no projeto `aeropendulum_pid_example`. Objetivo: integrar os dois módulos anteriores sob um controlador PID e verificar a capacidade do conjunto de sustentar a haste em uma posição angular de referência.

Essa sequência tem, ainda, um efeito colateral desejável do ponto de vista didático, pois os dois primeiros projetos permanecem disponíveis como exemplos mínimos de uso de cada periférico, servindo de ponto de partida para quem venha a desenvolver novas estratégias de controle sobre a plataforma.

3.7 DESENVOLVIMENTO DO INTERFACEAMENTO DO *ENCODER*

O primeiro módulo, correspondente ao projeto `encoder_interfacing`, se dedica exclusivamente à medição da posição angular.

3.7.1 Configuração do Temporizador

O temporizador TIM2 foi configurado em modo de *encoder*, opção que faz com que o contador do periférico seja incrementado ou decrementado diretamente pelas

transições dos sinais aplicados aos canais 1 e 2, sem intervenção do processador. Os parâmetros adotados estão reunidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Configuração do temporizador TIM2 em modo de *encoder*.

Parâmetro	**Valor**	**Justificativa**
Modo de *encoder*	`TI12`	Contagem nas bordas de ambos os canais, resultando em decodificação $\times 4$
Divisor de frequência	0	O contador deve acompanhar cada transição, sem divisão
Valor de recarga automática	$2^{32} - 1$	Uso da largura total do contador de 32 bits do TIM2
Filtro de entrada (IC1 e IC2)	15	Máxima filtragem digital contra ruído e trepidação de contato
Polaridade de captura	Borda de subida	Configuração padrão para a decodificação em quadratura

Fonte: Autoria própria.

Duas escolhas dessa configuração são particularmente relevantes.

A primeira é o uso do TIM2, que no STM32F446 é um dos temporizadores de 32 bits, ao contrário do TIM3 e da maioria dos demais, que são de 16 bits (STMICROELECTRONICS, 2021). Com 2400 contagens por revolução.

A segunda é o valor máximo atribuído ao filtro de entrada. O filtro digital do periférico descarta transições cuja duração seja inferior a um número configurável de períodos de amostragem, e o valor 15 corresponde ao ajuste mais conservador disponível. Essa escolha foi motivada pela natureza do sinal, pois a saída em coletor aberto do *encoder* apresenta bordas menos definidas do que uma saída em *push-pull*. O custo dessa filtragem é um limite superior de frequência de contagem, irrelevante na faixa de velocidades do aeropêndulo.

3.7.2 Conversão para Posição Angular

A leitura do contador e sua conversão para graus seguem diretamente a Equação (6). Como o contador é bidirecional e acumula ao longo de várias revoluções, é necessário reduzir o resultado à faixa de $0°$ a $360°$, o que é feito pelo resto da divisão por 360, com correção do sinal quando a rotação se dá no sentido decrescente. O trecho correspondente está reproduzido no Código 3.1.

Código 3.1 – Leitura do contador e conversao para posicao angular.

```
counter = (int32_t)__HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim2);

/* Posicao bruta em graus, podendo exceder 360 e ser negativa */
```

```
float raw_degrees = ((float)counter / 2400.0f) * 360.0f;

/* Reducao a faixa fundamental */
degrees = fmodf(raw_degrees, 360.0f);

/* Ajuste de sinal para giro no sentido decrescente */
if (degrees < 0.0f) {
    degrees += 360.0f;
}
```

O divisor $2400{,}0$ corresponde ao valor de N_c obtido na Equação (4) e é a única constante do módulo que depende do *encoder* empregado. A substituição do sensor por outro modelo exige, portanto, apenas o ajuste desse valor.

3.8 DESENVOLVIMENTO DO ACIONAMENTO DO ESC

O segundo módulo, correspondente ao projeto `esc_pwm_test`, trata da geração do sinal de comando do ESC e do ensaio do conjunto propulsor em malha aberta.

3.8.1 Dimensionamento do Temporizador

A geração do sinal descrito na Seção 2.3 exige que o temporizador produza um período de 20 ms e que a resolução de ajuste da largura do pulso seja fina o bastante para representar comandos distintos dentro da faixa de 1000 a 2000 µs. A configuração adotada resolve os dois requisitos ao escolher uma base de tempo de exatamente 1 MHz, o que faz com que cada unidade do registrador de comparação corresponda a 1 µs.

Na configuração de *clock* adotada, o barramento APB1 fornece aos temporizadores uma frequência de 16 MHz. Aplicando o divisor de frequência $\text{PSC} = 15$, a frequência de contagem resulta em

$$f_{cnt} = \frac{f_{APB1}}{\text{PSC} + 1} = \frac{16 \times 10^6}{16} = 1 \times 10^6 \text{ Hz}. \tag{14}$$

Com o valor de recarga automática ajustado em $\text{ARR} = 19999$, o período do sinal é

$$T = \frac{\text{ARR} + 1}{f_{cnt}} = \frac{20000}{1 \times 10^6} = 20 \times 10^{-3} \text{ s}, \tag{15}$$

correspondente aos 50 Hz exigidos pelo ESC. A largura do pulso, em microssegundos, passa a ser numericamente igual ao valor escrito no registrador de comparação, o que elimina qualquer conversão no código de aplicação e reduz a possibilidade de erro.

3.8.2 Módulo de Acionamento

O acionamento foi encapsulado em um módulo próprio, composto pelos arquivos `esc.c` e `esc.h`, cuja interface pública expõe três operações: a inicialização, o ajuste da largura do pulso e a parada, como mostra o Código 3.2.

Código 3.2 – Interface do modulo de acionamento do ESC.

```
#define ESC_MIN_PULSE_US  1000U
#define ESC_TEST_PULSE_US 1200U

static uint16_t ESC_ClampPulse(uint16_t pulse_us)
{
    if (pulse_us < ESC_MIN_PULSE_US)
        return ESC_MIN_PULSE_US;

    if (pulse_us > ESC_TEST_PULSE_US)
        return ESC_TEST_PULSE_US;

    return pulse_us;
}

void ESC_SetPulseUs(uint16_t pulse_us)
{
    pulse_us = ESC_ClampPulse(pulse_us);

    /* TIM3 opera a 1 MHz, logo cada unidade de CCR1 equivale a 1 us */
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim3, TIM_CHANNEL_1, pulse_us);
}
```

O limite superior de 1200 µs definido em `ESC_TEST_PULSE_US` trata de um teto de segurança para a fase de ensaios em malha aberta. Com o conjunto propulsor montado em uma estrutura ainda não validada quanto à resistência mecânica, e sem qualquer realimentação que limite o deslocamento da haste, permitir comandos próximos ao máximo exporia a bancada e o operador a risco desnecessário. O teto foi mantido apenas nesse módulo de ensaio e não se aplica ao módulo de controle em malha fechada.

3.8.3 Rotina de Ensaio

A rotina de ensaio, implementada em `esc_test.c`, executa uma sequência determinística composta por seis etapas, sintetizadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Sequência da rotina de ensaio em malha aberta do conjunto propulsor.

#	Etapa	Parâmetros
1	Inicialização do PWM e aplicação do comando mínimo	1000 µs
2	Espera pelo armamento do ESC	3000 ms
3	Rampa de aceleração	Incremento de 10 µs a cada 100 ms
4	Permanência no comando de ensaio	1200 µs durante 5000 ms
5	Rampa de desaceleração	Decremento de 10 µs a cada 100 ms
6	Parada no comando mínimo	1000 µs

Fonte: Autoria própria.

O emprego de rampas, em vez de degraus de comando, é intencional. Uma variação abrupta de comando solicita do ESC uma aceleração elevada, que pode disparar suas proteções internas de corrente e provocar a perda de sincronismo da comutação, resultando em travamento do motor. Além disso, a aplicação gradual permite observar visualmente a faixa de comando em que o empuxo passa a ser suficiente para deslocar a haste, informação útil para a definição da largura de pulso de polarização P_0 empregada no controlador.

3.9 IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR PID

O terceiro módulo, correspondente ao projeto `aeropendulum_pid_example`, integra os dois anteriores sob uma malha de realimentação. O TIM2 permanece em modo de *encoder* e o TIM3 em modo PWM, ambos com as configurações já descritas.

3.9.1 Estrutura do Laço de Controle

A cada iteração do laço, a posição angular é obtida e convertida conforme a Subseção 3.7.2, o erro é calculado e normalizado segundo a Equação (11), os três termos do controlador são atualizados de acordo com as Equações (8) a (10), e a ação de controle é mapeada para uma largura de pulso conforme a Equação (13). O Código 3.3 reproduz o trecho central.

Código 3.3 – Laco de controle PID e mapeamento para largura de pulso.

```
/* Normalizacao do erro para a faixa de -180 a 180 graus */
erro = setpoint - saida;

if (erro > 180)
    erro -= 360;

if (erro < -180)
    erro += 360;
```

```
/* Termo integral com anti-windup por saturacao do acumulador */
integral += erro * Ts;

if (integral > 500)
    integral = 500;

if (integral < -500)
    integral = -500;

/* Termo derivativo por diferenca regressiva */
derivativa = (erro - erro_anterior) / Ts;

double pid = Kp * erro + Ki * integral + Kd * derivativa;

erro_anterior = erro;

/* Mapeamento para largura de pulso, com polarizacao e saturacao */
pwm_esc = 1200 + (uint16_t)pid;

if (pwm_esc > 2000)
    pwm_esc = 2000;

if (pwm_esc < 1000)
    pwm_esc = 1000;

ESC_SetPWM(pwm_esc);
```

Os parâmetros adotados estão reunidos na Tabela 7. Os ganhos foram determinados empiricamente, por ajuste sucessivo a partir da observação do comportamento da planta, procedimento adequado ao propósito de validação, ainda que não constitua um método sistemático de sintonia.

Tabela 7 – Parâmetros do controlador PID implementado.

Parâmetro	**Valor**	**Observação**
Ganho proporcional K_p	$3{,}0$	Ajustado empiricamente
Ganho integral K_i	$1{,}0$	Ajustado empiricamente
Ganho derivativo K_d	$0{,}5$	Ajustado empiricamente
Período de amostragem T_s	$0{,}01$ s	Valor declarado no código
Referência	$75°$	Posição angular de ensaio
Limites do integrador	± 500	Anti-*windup* por saturação
Polarização P_0	1200 µs	Largura de pulso de repouso da malha
Faixa de comando	1000 a 2000 µs	Saturação do atuador
Armamento inicial	5000 ms	Comando mínimo antes de habilitar a malha

Fonte: Autoria própria.

A escolha de $P_0 = 1200$ µs como largura de pulso de polarização reflete a observação feita durante o ensaio em malha aberta descrito na Subseção 3.8.3. Esse valor posiciona o ponto de repouso da malha em uma região na qual o conjunto propulsor já produz empuxo, de modo que a ação de controle possa atuar nos dois sentidos, aumentando ou reduzindo o empuxo em torno de um valor de sustentação.

4 Resultados

Este capítulo relata os ensaios realizados sobre a plataforma construída e discute o comportamento observado. A apresentação segue a ordem da estratégia de validação incremental definida na Seção 3.6, de modo que cada resultado se apoie na verificação prévia dos subsistemas que o antecedem.

A aquisição sistemática de dados, necessária ao levantamento de índices como sobressinal, tempo de acomodação e erro em regime permanente, não foi implementada no escopo deste estágio, e sua realização é apontada no Capítulo 5 como continuidade natural do trabalho. As observações a seguir são, portanto, de natureza qualitativa.

4.1 VALIDAÇÃO DO INTERFACEAMENTO DO *ENCODER*

O primeiro ensaio verificou o módulo de medição de posição angular de forma isolada, com o conjunto propulsor desenergizado. O procedimento consistiu em movimentar manualmente o braço do pêndulo e acompanhar, por meio do depurador do STM32CubeIDE, a evolução das variáveis de contagem e de posição angular convertida.

Três aspectos foram verificados e confirmados. O primeiro é a bidirecionalidade da contagem, pois o contador do TIM2 incrementou ao girar o braço em um sentido e decrementou ao girar no sentido oposto, comportamento que confirma a correta decodificação da relação de fase entre os canais A e B. O segundo é a coerência da conversão, pois a posição angular calculada correspondeu, dentro da capacidade de aferição visual, ao deslocamento imposto ao braço, e uma revolução completa produziu a variação esperada de 2400 contagens estabelecida pela Equação (4). O terceiro é a normalização, pois a leitura permaneceu confinada à faixa de $0°$ a $360°$ mesmo após múltiplas revoluções em ambos os sentidos, o que valida o tratamento do resto da divisão e a correção de sinal descritos na Subseção 3.7.2.

Foi observado, ainda, a relevância prática do condicionamento discutido na Seção 2.4. Na ausência dos resistores de *pull-up* exigidos pela saída em coletor aberto do *encoder*, a contagem apresentava decrementos constantes, mesmo com o braço em repouso. Com o *pull-up* presente, e com o filtro digital de entrada ajustado no valor máximo conforme a Tabela 5, a leitura se manteve estável em repouso.

4.2 VALIDAÇÃO DO ACIONAMENTO DO ESC

O segundo ensaio verificou a geração do sinal de comando e a resposta do conjunto propulsor em malha aberta, executando a sequência descrita na Tabela 6.

O procedimento de armamento ocorreu conforme o esperado. Ao ser energizado com o comando mínimo aplicado, o ESC emitiu a sequência sonora característica de reconhecimento e habilitou o acionamento ao final do intervalo de espera, confirmando que a temporização de 20 ms dimensionada pelas Equações (14) e (15) está dentro da faixa reconhecida pelo dispositivo. Esse resultado valida, de forma indireta, toda a cadeia de configuração do TIM3, pois um período fora da especificação impediria o armamento.

Durante a rampa de aceleração, a rotação do motor aumentou de forma gradual e contínua, sem travamentos nem perdas de sincronismo, o que confirma a adequação da estratégia de variação suave discutida na Subseção 3.8.3. Foi observada a existência de uma zona morta na porção inferior da faixa de comando, na qual o incremento da largura de pulso ainda não produz empuxo suficiente para deslocar o braço, e foi identificado visualmente a região de comando a partir da qual o deslocamento passa a ocorrer. Foi essa observação que fundamentou a escolha da largura de pulso de polarização adotada no controlador.

A rampa de desaceleração e o retorno ao comando mínimo ocorreram sem anormalidades, e o conjunto permaneceu estável no comando mínimo ao final da sequência.

4.3 ENSAIO EM MALHA FECHADA

O terceiro ensaio integrou os dois módulos anteriores sob o controlador PID descrito na Seção 3.9, com referência de $75°$ e os ganhos apresentados na Tabela 7.

Após o intervalo de armamento, a malha assumiu o controle e o braço se deslocou da posição de repouso em direção à referência. O sistema alcançou e sustentou a posição angular comandada, permanecendo em torno dela de forma estável ao longo do ensaio. Esse é o resultado central do trabalho, pois demonstra que os três subsistemas, medição, atuação e processamento, operam de forma integrada e coerente, e que a estrutura mecânica é capaz de sustentar a operação contínua da malha.

Foi verificada também a capacidade de rejeição de perturbações. Perturbações aplicadas manualmente ao braço foram compensadas pela ação de controle, com retorno à vizinhança da referência, comportamento que confirma o funcionamento efetivo da realimentação.

4.4 AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA

A estrutura foi avaliada quanto ao seu comportamento sob as condições de operação impostas pelos ensaios anteriores, e se mostrou robusta e adequada à aplicação.

Sob o empuxo do conjunto propulsor, o pórtico de PVC apoiado sobre a base de madeira permaneceu estável, sem deslocamento da bancada nem deformação perceptível. O emprego das hastes lineares de aço no braço do pêndulo, discutido na Seção 3.4, se mostrou correto, pois não se observou flexão do braço que introduzisse dinâmica adicional à do movimento de rotação. Os mancais com rolamentos proporcionaram rotação suave ao longo de toda a faixa percorrida, e o acoplador flexível transmitiu o movimento ao *encoder* sem folga aparente, condição necessária à qualidade da medição verificada na Seção 4.1.

Quanto ao requisito de customização, a arquitetura adotada cumpre o que foi proposto. Os parâmetros geométricos que definem o sistema se concentram nos conectores impressos em PETG, de modo que a alteração do comprimento efetivo do braço, da posição de fixação do motor ou da geometria de montagem exige apenas a modificação e a reimpressão dessas peças, sem intervenção nas demais partes. Da mesma forma, a substituição do motor, da hélice ou do *encoder* não implica redesenho estrutural, e a organização do *firmware* em módulos independentes permite que cada subsistema seja alterado isoladamente.

Figura 13 – Plataforma em operação durante o ensaio em malha fechada.



Fonte: Autoria própria.

4.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A Tabela 8 reúne os objetivos específicos definidos na Seção 1.3 e a situação de cada um ao final do estágio.

Tabela 8 – Síntese do atendimento aos objetivos específicos.

Objetivo específico	**Situação**
Avaliar a bancada existente e determinar a viabilidade de recuperação	Concluído. Recuperação considerada inviável, conforme a Subseção 3.1.4
Especificar um novo conjunto de componentes	Concluído, com duas substituições em relação à proposta inicial. O controlador escolhido atende ao requisito de operação com RTOS, recurso ainda não explorado
Conceber e construir a estrutura mecânica	Concluído, com robustez e capacidade de customização verificadas
Desenvolver o interfaceamento do *encoder*	Concluído e validado em ensaio isolado
Desenvolver o acionamento do motor BLDC por ESC	Concluído e validado em ensaio em malha aberta
Implementar um controlador PID digital	Concluído. Malha fechada operante, com sintonia empírica e caracterização quantitativa pendente

Fonte: Autoria própria.

O conjunto dos ensaios sustenta a conclusão de que a plataforma cumpre a finalidade para a qual foi projetada. Ela mede a posição angular com resolução adequada, aciona o conjunto propulsor de forma controlada e sustenta uma malha de realimentação em operação contínua, sobre uma estrutura mecânica que se mostrou estável e passível de modificação por seus usuários. O que permanece em aberto, e que constitui os trabalhos futuros, é a instrumentação de aquisição que permitirá converter as observações qualitativas aqui relatadas em medidas de desempenho comparáveis entre diferentes estratégias de controle.

5 Considerações Finais

5.1 SÍNTESE DAS ATIVIDADES

Este relatório descreveu o projeto e a construção de uma plataforma de aeropêndulo destinada ao estudo prático de métodos de controle de sistemas, desenvolvida durante o estágio supervisionado realizado no Laboratório eROBÓTICA da Universidade Federal de Campina Grande.

As atividades tiveram início com uma demanda de recuperação e terminaram com uma plataforma nova. Essa mudança de rumo, longe de ser um desvio, constitui um dos resultados do estágio. Ela decorreu de um levantamento sistemático cujo achado decisivo foi o comprometimento do sensor de posição angular da bancada existente, que inutilizava a grandeza realimentada, e que se somou a um requisito que nenhuma restauração atenderia, o de operar com sistema operacional de tempo real sobre uma placa de 8 bits que não o comporta. A decisão de reformular a proposta permitiu que os requisitos fossem estabelecidos a partir da finalidade didática pretendida, e não herdados de um projeto anterior.

A plataforma resultante emprega um motor BLDC acionado por ESC, um *encoder* rotativo incremental de 600 pulsos por revolução e um microcontrolador STM32F446RET6 embarcado na placa Nucleo-F446RE, montados sobre uma estrutura construída com tubos de PVC, hastes lineares de aço, mancais com rolamentos e conectores impressos em PETG. O *firmware* foi organizado em três módulos independentes, correspondentes à medição, ao acionamento e ao controle, desenvolvidos e validados de forma incremental. O ensaio em malha fechada com controlador PID confirmou o funcionamento integrado do conjunto, com o sistema alcançando e sustentando a posição angular de referência e rejeitando perturbações aplicadas ao braço.

Todos os objetivos específicos estabelecidos na Seção 1.3 foram atendidos, conforme sintetizado na Tabela 8.

5.2 LIMITAÇÕES

O reconhecimento explícito das limitações delimita com precisão o ponto de partida de quem venha a dar continuidade ao projeto.

A limitação de maior alcance é a ausência de instrumentação de aquisição de dados. Sem ela, os resultados do ensaio em malha fechada permanecem qualitativos, e não é possível quantificar índices de desempenho nem comparar objetivamente estratégias de controle distintas, o que é justamente o uso pretendido de uma bancada didática dessa natureza.

A segunda limitação decorre da própria arquitetura de acionamento adotada. Conforme discutido na Subseção 2.3.2, o conjunto formado por ESC, motor e hélice não expõe as grandezas elétricas do atuador, o que impede a construção do modelo com significado físico proposto por Lucena et al. (2021) para a bancada anterior. Essa é uma consequência assumida da escolha por robustez e disponibilidade, e não um defeito de execução, mas condiciona o tipo de modelagem viável sobre a plataforma.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

As direções de continuidade a seguir estão ordenadas segundo a precedência entre elas, pois as primeiras habilitam as seguintes.

a) **Implementação de telemetria e aquisição de dados.** A transmissão da posição angular, da referência e da ação de controle por comunicação serial, através da interface USART já disponível no depurador integrado da placa, permitiria registrar os ensaios em arquivo e processá-los em ambiente de análise numérica. Esta é a providência de maior retorno imediato, pois converte todas as observações qualitativas do Capítulo 4 em medidas.

b) **Correção da base de tempo do laço de controle.** A migração da lei de controle para a rotina de tratamento de interrupção de um temporizador dedicado garantiria um período de amostragem uniforme e conhecido, condição necessária tanto para a validade dos ganhos quanto para a confiabilidade dos dados adquiridos.

c) **Migração para um sistema operacional de tempo real.** Atendido o item anterior, o passo seguinte é reorganizar o *firmware* sobre o FreeRTOS, integrado à cadeia de ferramentas do fabricante, implementando a lei de controle como tarefa periódica escalonada e a telemetria como tarefa de prioridade mais baixa. Além de consolidar o determinismo da base de tempo, essa organização atende ao requisito que motivou a escolha do controlador e transforma a bancada em veículo para o ensino de escalonamento, concorrência e análise de temporização em sistemas embarcados, ampliando seu alcance formativo para além da teoria de controle.

d) **Identificação do sistema e estimação de parâmetros.** De posse de dados confiáveis de entrada e saída, torna-se possível estimar os parâmetros do modelo descrito pelas Equações (1) e (2), bem como caracterizar experimentalmente a relação

entre a largura de pulso comandada e o empuxo produzido, contornando a impossibilidade de medir as grandezas elétricas do atuador. A metodologia proposta por Lucena et al. (2021), que articula planejamento de experimentos, otimização não linear e validação, oferece o roteiro adequado a essa etapa.

e) **Projeto analítico de controladores.** Com um modelo identificado, o controlador PID pode ser sintonizado por métodos sistemáticos, e abrem-se as vias do projeto em espaço de estados com observador de estados, nos moldes da sequência didática proposta por Enikov e Acosta Iriqui (2013), e do regulador linear quadrático, empregado por Job e Jose (2015).

f) **Exploração de estratégias avançadas.** A plataforma torna-se então uma base sobre a qual investigar as abordagens mais recentes descritas na Seção **??**, tais como a modelagem linear a parâmetros variantes (Valdés Olivares et al., 2023), que incorpora explicitamente a não linearidade gravitacional à síntese do controlador, os controladores de ordem fracionária (JANDERA et al., 2025) e as técnicas de rejeição de distúrbios baseadas em dados (BAYATI et al., 2025).

g) **Ampliação da instrumentação.** A inclusão de sensoriamento de corrente na alimentação do ESC permitiria recuperar parte da informação energética hoje indisponível, ainda que sem o detalhamento por fase, ampliando o espectro de fenômenos observáveis na bancada.

5.4 CONTRIBUIÇÕES PARA A FORMAÇÃO PROFISSIONAL

Do ponto de vista da formação, o estágio proporcionou a experiência de um ciclo completo de projeto em engenharia, no qual a especificação inicial precisou ser revista diante da evidência experimental, componentes tiveram de ser substituídos, e as decisões de projeto exigiram a articulação entre modelagem teórica, seleção de componentes, construção mecânica e desenvolvimento de sistemas embarcados. Por conseguinte, em contraste com os conhecimentos adquiridos ao longo da trajetória acadêmica, o estágio foi fundamental para o desenvolvimento de conhecimentos e habilidades técnicas, tais como soldagem e pensamento sistemático quanto ao desenvolvimento de projetos.

A plataforma entregue cumpre a finalidade a que se destina. Ela permite que um estudante observe, em um sistema físico e não em uma simulação, os efeitos de suas decisões de projeto de controle, e está construída de modo que possa ser modificada, estendida e mantida por quem venha a utilizá-la. Nesse sentido, o resultado do estágio não é apenas um equipamento, mas uma base de trabalho adaptável e incrementável.

REFERÊNCIAS

AMS AG. **AS5040 10 Bit 360° Programmable Magnetic Rotary Encoder Datasheet**. [S.l.], 2015. Rev. 1.6.

ARDUINO. **Arduino Motor Shield Rev3 Documentation**. [S.l.], 2023.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **Advanced PID Control**. Research Triangle Park: ISA, The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.

BAYATI, M. H.; MARZBAN, A.; TAVAKOLI-KAKHKI, M.; NASEH, A. Improved equivalent input disturbance control of nonlinear aeropendulum system using data-driven approach. In: **Proceedings of the 33rd International Conference on Electrical Engineering (ICEE)**. Tehran: IEEE, 2025.

ENIKOV, E. T.; Acosta Iriqui, J. From step-response to state-space controller-observer design in twenty minutes: A hands-on workshop on the use of Matlab/Simulink to control a low-cost aerodynamic pendulum. In: **Proceedings of the 2013 American Society for Engineering Education Pacific Southwest Conference**. [S.l.]: American Society for Engineering Education, 2013.

ENIKOV, E. T.; CAMPA, G. Mechatronic aeropendulum: Demonstration of linear and nonlinear feedback control principles with MATLAB/Simulink real-time Windows target. **IEEE Transactions on Education**, v. 55, n. 4, p. 538–545, nov 2012.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WORKMAN, M. L. **Digital Control of Dynamic Systems**. 3. ed. Half Moon Bay: Ellis-Kagle Press, 2013.

JANDERA, A.; MUZELAK, M.; SKOVRANEK, T. Fractional-order PID control of an aeropendulum simulation model. In: **Proceedings of the 26th International Carpathian Control Conference (ICCC)**. Kosice: IEEE, 2025.

JOB, M. M.; JOSE, P. S. H. Modeling and control of mechatronic aeropendulum. In: **Proceedings of the 2nd International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)**. Coimbatore: IEEE, 2015. ISBN 978-1-4799-6818-3.

LUCENA, E. R.; LUIZ, S. O. D.; LIMA, A. M. N. Modeling, parameter estimation, and control of an aero-pendulum. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE AUTOMÁTICA. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. Campinas, 2021. p. 1984–1989. ISSN 2175-8905.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

STMICROELECTRONICS. **UM1724: STM32 Nucleo-64 boards (MB1136) User Manual**. [S.l.], 2020. Rev. 14.

_____. **RM0390: STM32F446xx advanced Arm-based 32-bit MCUs Reference Manual**. [S.l.], 2021. Rev. 6.

_____. **UM2609: STM32CubeIDE User Guide**. [S.l.], 2023. Rev. 6.

Valdés Olivares, A.; ZOULAGH, T.; BARBOSA, K. A. LPV modeling and control for the aeropendulum system. In: **Proceedings of the IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)**. Santiago: IEEE, 2023.