



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RENATA TENÓRIO TAVARES

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE BANCADA PARA MEDIÇÃO DE
TRAÇÃO DE GRUPOS MOTOPROPULSORES DE PEQUENO PORTE**

Recife
2022

RENATA TENÓRIO TAVARES

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE BANCADA PARA MEDIÇÃO DE
TRAÇÃO DE GRUPOS MOTOPROPULSORES DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Manuel González del Foyo.

Recife
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Tavares, Renata Tenório.

Projeto e fabricação de bancada para medição de tração de grupos motopropulsores de pequeno porte / Renata Tenório Tavares. - Recife, 2022.
82 p. : il., tab.

Orientador(a): Pedro Manuel González del Foyo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2022.

Inclui referências, apêndices.

1. Bancada. 2. Tração. 3. Motor. 4. Drone. 5. Arduino. I. Foyo, Pedro Manuel González del. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

RENATA TENÓRIO TAVARES

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE BANCADA PARA MEDIÇÃO DE
TRAÇÃO DE GRUPOS MOTOPROPULSORES DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 08 / 02 / 2022.

Prof. Dr. Pedro Manuel González del Foyo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Me. Victor Gomes Cardoso (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Adrien Joan Sylvain Durand Petiteville (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha mãe, Mirian Tenório, pois sem ela a minha jornada na UFPE sequer teria se iniciado. Obrigada, mãe, por acreditar em mim e por lutar pelo meu sonho quando eu ainda era tão jovem.

Agradeço também à minha irmã, Michelle Monteiro, por todos os ensinamentos (inclusive domésticos) que recebi antes de me mudar para Recife e também por todas as vezes que ela se esforçou para me manter perto, mesmo que estivéssemos fisicamente distantes.

No âmbito do desenvolvimento deste trabalho, agradeço enormemente ao Mestre Victor Gomes Cardoso por todo o auxílio prestado com a arquitetura do sistema eletrônico e por todos os demais ensinamentos dessas últimas semanas. Sua paciência, atenção e disponibilidade foram imprescindíveis para que eu pudesse enfrentar cada um dos desafios deste trabalho.

Também gostaria de agradecer ao meu orientador, o professor Pedro Manuel González del Foyo, por abraçar o desafio de desenvolver este trabalho em tão pouco tempo. O seu engajamento e proatividade em seus projetos acadêmicos, seja como orientador ou como professor, são inspiradores para mim.

Agradeço à equipe Mandacaru *Aerodesign* por ter me permitido explorar profundamente minha paixão pela engenharia aeronáutica. Foi um espaço de bastante desenvolvimento profissional e pessoal, além de ter me aproximado dos meus melhores amigos. Inclusive, agradeço a eles por todo o carinho, acolhimento e união desses últimos anos.

À Maryna Viana, agradeço por todos os trabalhos acadêmicos compartilhados, as partidas de xadrez e as tardes de estudo e carinho nas bibliotecas da UFPE.

À FACEPE, que me concedeu uma bolsa de estudos durante dois dos meus anos de graduação, gostaria de agradecer pela oportunidade de realizar minha iniciação científica.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Pernambuco pela minha formação profissional e por ter me apresentado a tantas oportunidades na extensão, na iniciação científica e na monitoria.

'A man who knows everything'. This, reportedly, was my reply to a school teacher asking me what I'd like to become when I grow up. I was eight years old, or thereabouts, [...] but, still not knowing everything, [...] what I really meant was "scientist", someone who unravels the secrets of the fundamental Laws of Nature. (HOOFT, 2023)

RESUMO

Recentemente, a tecnologia dos VANTs (Veículo Aéreo Não-Tripulado) vem recebendo grande atenção da indústria e da academia devido ao grande número de potenciais aplicações como entregas de encomendas, monitoramento de segurança de grandes regiões, sensoriamento remoto para captação de dados geológicos, entre outros. Contudo, para que esses serviços sejam entregues com qualidade e segurança, é necessário o desenvolvimento de sistemas de controle estáveis e confiáveis para VANTs. Uma vez que o controle de drones é realizado a partir da modulação de sua propulsão, é imprescindível estabelecer inicialmente uma correlação confiável entre o comando enviado para os motores elétricos e as forças de tração entregues por cada grupo motopropulsor (conjunto motor e hélice). O presente trabalho aborda o projeto e execução de uma bancada para realizar a medição de tração de motores elétricos de pequeno porte (até 1kgf de empuxo) com diferentes hélices (até 11 polegadas) e relacioná-la com o comando enviado ao motor através da velocidade de rotação da hélice. Para isso, foi desenvolvida uma plataforma integrada com uma célula de carga para capturar o empuxo gerado pelo motor e um emissor/receptor de raio laser para medição da velocidade da hélice. Após sua construção, dois motores elétricos com as mesmas especificações dos utilizados por Dias (2021) foram ensaiados e suas curvas de comando-empuxo, velocidade-empuxo, comando-velocidade foram obtidas. Em seguida, foram obtidos os valores de corrente elétrica consumida para avaliar as curvas de corrente consumida e empuxo gerado estimadas por Dias (2021), evidenciando que a hipótese de linearidade entre pode ser adequada nesse caso.

Palavras-chave: bancada; tração; motor; drone; arduino.

ABSTRACT

Recently, UAV (Unmanned Aerial Vehicles) technology is receiving a great attention from industry and academy due to the large number of potential applications, such as payload delivery, large areas surveillance, geological data acquisition through remote sensing, and others. However, the development of stable and reliable control systems to UAVs is necessary in order to ensure that these services will be delivered with quality and safety. Since the UAV control is made by the modulation of its propulsion, it is essential to establish in first place a reliable correlation between the signal sent to the electric motors and the thrust forces generated by each set of motor and propeller. This work presents the design and execution of an experimental bench to measure the thrust of small electric motors (up to 1kgf) with different propellers (up to 11 inches) and relate it to the signal sent to the motor through the propeller rotation speed. An integrated platform with a load cell to measure thrust and a laser beam emitter/receiver to calculate the propeller rotation speed was developed. Once the bench was built, two electric motors with the same characteristics of the ones used by (DIAS, 2021) were tested and its curves were plotted. Following, the values of consumed electric current were obtained to evaluate the curve of consumed electric current and generated thrust estimated by Dias (2021), bringing up the validity of the linearity assumption in this case.

Keywords: bench; thrust; motor; drone; arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Drone de asa fixa	17
Figura 2 – Drone de asas rotativas	17
Figura 3 – No sistema de coordenadas considerado por Bresciani (2008), os eixos X_B , Y_B e Z_B correspondem respectivamente aos eixos longitudinal, lateral e vertical do sistema aeronáutico.	18
Figura 4 – Movimento de <i>throttle</i>	19
Figura 5 – Movimento de <i>roll</i>	19
Figura 6 – Movimento de <i>pitch</i>	20
Figura 7 – Movimento de <i>yaw</i>	20
Figura 8 – Hélice tri-pá	21
Figura 9 – Principais características geométricas de um perfil aerodinâmico	22
Figura 10 – Sinal senoidal contínuo e sua representação discreta	24
Figura 11 – Célula de carga	24
Figura 12 – Extensômetro do tipo folha	25
Figura 13 – Ponte de <i>Wheatstone</i>	25
Figura 14 – Placa eletrônica do modelo Arduino Uno	26
Figura 15 – <i>Arduino Software (IDE)</i>	27
Figura 16 – Descrição das entradas e saídas disponíveis no modelo Arduino Uno	27
Figura 17 – Impressora 3D do modelo <i>Ender 3</i>	28
Figura 18 – Esquema funcional das bancadas horizontal e vertical	29
Figura 19 – Modelo desenvolvido em <i>software</i> CAD para a bancada	31
Figura 20 – Ganchos para o ESC e base para o receptor de laser na haste do motor	32
Figura 21 – Cortes realizados na haste para obter as seções transversais críticas	33
Figura 22 – Seções transversais críticas para a haste	33
Figura 23 – Mecanismo de encaixe do perfil de alumínio	34
Figura 24 – Base para placa de aquisição de dados	35
Figura 25 – Extensão de canais do Arduino	35
Figura 26 – Bancada finalizada sem a tampa de proteção	36
Figura 27 – Bancada finalizada com a tampa de proteção	37
Figura 28 – Ganhos do amplificador de instrumentação (INA125) de acordo com resistência RG, implementado no <i>trimpot</i> TP1	39
Figura 29 – Modelo para simulação do circuito implementado	39
Figura 30 – PCB da placa	40
Figura 31 – Trilhas de conexão da placa	40
Figura 32 – Placa finalizada	40
Figura 33 – Osciloscópio DSO1012A da <i>Agilent Technologies</i> ®	41

Figura 34 – Tensão em Volts entre os pinos 10 e 11 do CI INA125	42
Figura 35 – Tensão de saída da placa em Volts	43
Figura 36 – Tensão máxima de saída da placa em Volts - motor desligado	43
Figura 37 – Tensão mínima de saída da placa em Volts - motor em potência máxima	44
Figura 38 – Espectro de frequência da leitura das tensões da célula de carga com motor em potência máxima	45
Figura 39 – Diagrama de Bode do filtro projetado	45
Figura 40 – Experimento indicando falha do filtro entre 45% e 55% para o GMP 2 .	46
Figura 41 – Experimento indicando batimentos em PWM 50 e 75	47
Figura 42 – Ajuste do filtro de Média móvel para PWM de 52% do comando total .	47
Figura 43 – Massa inicial do experimento com o motor 1	49
Figura 44 – Massa inicial do experimento com o motor 2	50
Figura 45 – Curva de calibração da célula de carga	50
Figura 46 – Relação entre comando enviado ao motor e velocidade de rotação atin- gida pela hélice	51
Figura 47 – Relação entre velocidade atingida pela hélice e empuxo gerado pelo GMP	52
Figura 48 – Relação entre comando enviado ao motor e empuxo gerado pelo GMP .	53
Figura 49 – Relação entre comando enviado ao motor e corrente elétrica fornecida pela fonte de alimentação	54
Figura 50 – Relação entre corrente fornecida e empuxo gerado	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Deformação linear da haste por seção transversal	33
Tabela 2 – Ligações requeridas por cada componente da instrumentação	37
Tabela 3 – Especificações dos grupos motopropulsores utilizados para a calibração	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AH	Anti-Horário
CAD	Projeto Assistido por Computador
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
CI	Circuito Integrado
ESC	Controlador Eletrônico de Velocidade
GMP	Grupo Motopropulsor
H	Horário
NC	Sem Conexão
PWM	Modulação por Largura de Pulso
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão Axial
ϵ	Deformação Relativa
N	Força Normal
A	Área da Seção Transversão
T	Tração sob influência do <i>efeito solo</i>
T_{∞}	Tração sem influência do <i>efeito solo</i>
R	Raio da Hélice
z	Altura da Hélice em Relação à Superfície Horizontal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	CONTROLE DE VANTs	17
2.2	GRUPO MOTOPROPULSOR	20
2.2.1	Motor	20
2.2.1.1	Motor <i>Brushless</i> DC	21
2.2.2	Hélice	21
2.3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	22
2.3.1	Célula de Carga	23
2.3.2	Tacômetro	25
2.3.3	Arduino	26
2.4	MANUFATURA ADITIVA	28
3	METODOLOGIA	29
3.1	PROJETO MECÂNICO E FABRICAÇÃO DA BANCADA	29
3.1.1	Escolha do Conceito Vertical para a Plataforma de Testes	29
3.1.2	Modelagem da Bancada	30
3.1.3	Fabricação da Bancada	34
3.2	MONTAGEM E CALIBRAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO	36
3.2.1	Utilização dos Canais do Arduino Uno	36
3.2.2	Projeto da Placa de Aquisição de Dados da Célula de Carga	38
3.2.3	Calibração do Ganho e <i>Offset</i> da Placa de Aquisição	39
3.2.3.1	Verificação do Aumento da Tensão da Célula	41
3.2.3.2	Ajuste do Ganho	41
3.2.3.3	Ajuste do <i>Offset</i>	42
3.3	ROTINA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	42
3.3.1	Rotações do motor	44
3.3.2	Processamento de dados da célula de carga	44
3.3.3	Calibração da Célula de Carga	48
4	RESULTADOS	51

4.1	Relação Comando-Velocidade	51
4.2	Relação Velocidade-Empuxo	52
4.3	Relação Comando-Empuxo	52
4.4	Curvas de corrente elétrica fornecida ao motor	53
5	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICE A – TABELA DE CUSTOS DE FABRICAÇÃO DA BANCADA	60
	APÊNDICE B – ROTINA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	61
	APÊNDICE C – ESPECTROS DE FREQUÊNCIA DAS LEI- TURAS DA CÉLULA DE CARGA DO GMP 2 ANALISADOS PARA PROJETO DE FILTRO COMBINADO	70
	APÊNDICE D – INSPEÇÃO VISUAL DA CORRENTE ELÉ- TRICA FORNECIDA PELA FONTE AO GMP 1	76
	APÊNDICE E – INSPEÇÃO VISUAL DA CORRENTE ELÉ- TRICA FORNECIDA PELA FONTE AO GMP 2	79

1 INTRODUÇÃO

Os VANTs (também chamados de drones) consistem em veículos aéreos não tripulados que podem operar de maneira autônoma ou a partir de instruções de um operador remoto. Recentemente, esse tipo de veículo vem recebendo grande atenção da indústria e da academia devido ao grande número de potenciais aplicações como entregas de encomendas, vigilância e monitoramento (YAMAMOTO; UCHIDA, 2018), sensoriamento remoto para captação de dados geográficos (para mapeamento de altitude, biomas, incêndios florestais), inspeção de infraestruturas (como estradas, oleodutos, parques eólicos), entre outros.

Também são cotadas aplicações em áreas remotas ou de desastres, atuando por exemplo para estabelecer conectividade a partir de redes *ad hoc* (CHOI et al., 2017) ou no auxílio de resgates, como no caso de drones que controlam incêndios em áreas de difícil acesso para humanos ou que localizam vítimas de soterramento através de processamento de imagens e inteligência artificial. Contudo, para que estes serviços sejam entregues com qualidade e segurança, é necessário o desenvolvimento de sistemas de controle/gerenciamento estáveis e confiáveis para VANTs (CHOI et al., 2017).

Em geral, o controle de drones, sejam de asas fixas ou rotativas, depende da modulação da propulsão para atingir *set points* específicos de velocidade, altitude, taxa de subida e/ou descida, que são essenciais para o planejamento e execução de uma missão aérea. Por exemplo, dependendo da fase da missão (decolagem, subida, cruzeiro, etc) ou manobra a ser realizada, o veículo pode necessitar de mais ou menos propulsão, modificando a sua sustentação e velocidade. No caso de aeronaves com propulsores com hélices de passo fixo, a única maneira de modular a tração do veículo é através do controle da rotação do motor.

Portanto, para desenvolver controladores para drones, é imprescindível mapear, em primeiro lugar, a propulsão do grupo motopropulsor (definido por Rodrigues (2013) como o conjunto motor e hélice) em função do comando enviado ao motor elétrico, obtendo o que será chamado de *relação comando-empuxo* no contexto deste trabalho. Outra opção para a determinação desta relação é obter inicialmente a curva de tração do grupo motopropulsor (GMP) em função da rotação da hélice (que é uma relação que pode ser assumida como fixa e só precisa ser realizada uma vez para cada hélice testada) e, posteriormente, relacionar o comando enviado ao motor com a rotação da hélice do GMP (relação comando-velocidade).

Esse tipo de abordagem é mais acurada uma vez que componentes como o motor elétrico e o controlador eletrônico de velocidade (ESC) são produzidos em massa e apresentam ligeiras variações fabris que podem resultar em relações comando-velocidade bastante distintas. No trabalho de Dias (2021), por exemplo, um controlador para um drone bidimensional foi projetado com base em uma correlação linear entre a corrente de alimentação do motor elétrico e o empuxo do grupo motopropulsor. Entretanto, para

diferentes conjuntos de equipamentos, mesmo que apresentem as mesmas especificações técnicas do grupo motopropulsor originalmente utilizado, esta relação pode ser diferente, impactando diretamente na qualidade da ação de controle enviada pelo controlador. Além disso, a simplificação da relação entre corrente consumida e empuxo gerado para uma correlação linear não necessariamente é condizente com a realidade, uma vez que não existe acoplamento físico direto entre essas duas grandezas.

Para permitir a correta identificação das características propulsivas do GMP, o presente trabalho aborda o projeto de uma bancada para realizar a medição de tração de motores elétricos de pequeno porte (até 1kgf de empuxo) com diferentes hélices (até 11 polegadas de diâmetro) e relacioná-la com o comando enviado ao motor através da velocidade de rotação da hélice. Para isso, foi desenvolvida uma plataforma integrada com uma célula de carga para capturar o empuxo gerado pelo motor e um emissor/receptor de raio laser para medição da velocidade de rotação hélice.

Adicionalmente, a bancada desenvolvida será cedida para o Laboratório de Automação Industrial da UFPE para atuar de forma complementar à bancada para testes de controladores para drones desenvolvida por Dias (2021). Desse modo, os alunos poderão realizar a devida identificação das características propulsivas de seus grupos motopropulsores antes de desenvolver seus controladores, garantindo ações de controle mais efetivas. Após sua construção, dois motores elétricos com as mesmas especificações dos utilizados por Dias (2021) foram ensaiados e suas curvas de comando-empuxo, velocidade-empuxo, comando-velocidade foram obtidas. Em seguida, foram obtidos os valores de corrente elétrica consumida para avaliar as curvas de corrente consumida e empuxo gerado estimadas por Dias (2021), evidenciando que a hipótese de linearidade entre pode ser adequada nesse caso.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e construir uma bancada para medição de tração e velocidade de rotação para grupos motopropulsores elétricos de pequeno porte, permitindo a devida identificação de suas relações comando-tração.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Projetar e fabricar bancada de testes garantindo que possam ser ensaiados motores elétricos com diferentes tipos de acoplamento;
- Os conjuntos motor e hélice testados devem ter no máximo 11 polegadas de diâmetro e gerar até 1kgf de empuxo;

- Selecionar instrumentação da bancada e desenvolver sistema de aquisição de dados para garantir a medição de empuxo e velocidade de rotação da hélice;
- Desenvolver rotina para aquisição e tratamento de dados, de modo a obter a relação comando-tração de cada GMP;
- Obter as relações comando-tração dos GMP utilizados por Dias (2021);
- Comparar as relações obtidas com as de Dias (2021);
- Disponibilizar no Laboratório de Automação Industrial a bancada de testes e a rotina para aquisição de dados desenvolvidas para que outros alunos possam se beneficiar deste trabalho para fins didáticos com facilidade e segurança.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. No primeiro, há a contextualização da problemática a ser investigada, apresentando seu potencial de impacto no desenvolvimento de controladores para drones. Já no segundo capítulo, são debatidos diversos conceitos ligados a VANTs, grupos motopropulsores, sistema de aquisição de dados, filtros digitais e manufatura aditiva, essenciais para a compreensão do desenvolvimento deste trabalho.

No terceiro capítulo, é realizada a apresentação dos materiais utilizados e da metodologia seguida para obter a bancada de testes totalmente construída, em conjunto com o seu sistema de aquisição e rotina para tratamento de dados. No quarto capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios de dois motores elétricos, e o quinto capítulo aglutina as principais conclusões obtidas e sugestões para aperfeiçoamento da bancada, além de propostas de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONTROLE DE VANTS

Como previamente descrito no capítulo 1, VANT é a sigla para Veículo Aéreos Não Tripulados. Eles podem atuar de maneira radio-controlada, quando um operador humano envia os comandos de controle através de um rádio, ou de forma completamente autônoma.

De acordo com Dias (2021), os VANTs podem ser classificados como de asas fixas (figura 1) ou de asas rotativas (figura 2). No caso de drones de asas fixas, seu projeto se assemelha ao de uma aeronave convencional, sendo composto por fuselagem, duas asas, superfícies de controle como *ailerons*, leme, profundor, e um GMP para garantir sua propulsão.

Figura 1 – Drone de asa fixa



Fonte: Delair® (2020)

Figura 2 – Drone de asas rotativas



Fonte: DJI® (2022)

Para essa classe de VANTs, o estudo das características propulsivas é especialmente importante para o cálculo da corrida de decolagem (que determina o peso máximo de

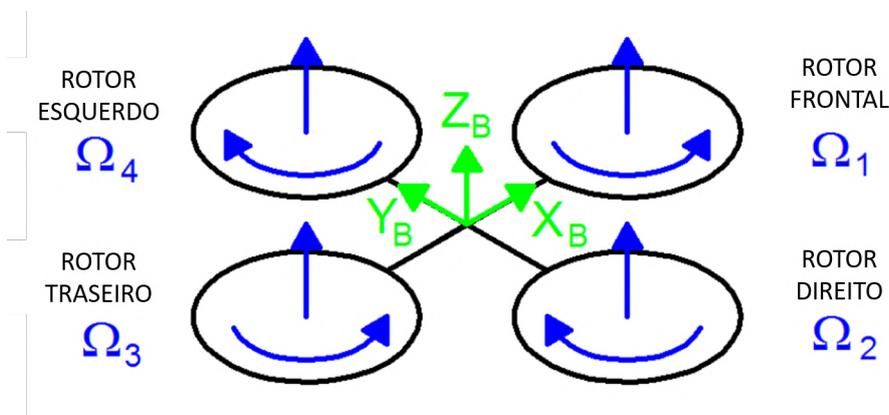
decolagem), mas também é imprescindível para o estudo dos limites de operação da aeronave.

Do ponto de vista de performance, a aeronave sempre precisará de uma velocidade mínima para se manter em voo, mas é válido ressaltar que esta velocidade não é estática e pode variar de acordo com o segmento de voo e manobra a ser realizada, isto porque ela é dependente da atitude do avião (ângulo de ataque). Além disso, a velocidade máxima alcançada pelo VANT vai determinar os esforços críticos atuantes em sua estrutura, impactando diretamente seu dimensionamento estrutural.

Por fim, para realizar o planejamento autônomo de rota nesse tipo de drone, embora as superfícies de controle desempenhem um papel chave na mecânica de voo, cada um de seus *outputs* é completamente dependente da velocidade da aeronave, que é principalmente influenciada pela modulação da propulsão.

Já no caso de drones de asas rotativas, seu conceito em geral é composto por um conjunto de GMPs que atuam no eixo vertical, referente ao eixo Z_B na figura 3. Existem diversas possibilidades de arranjos propulsivos para os drones de asas rotativas, mas para os fins deste trabalho, o quadricóptero será o foco.

Figura 3 – No sistema de coordenadas considerado por Bresciani (2008), os eixos X_B , Y_B e Z_B correspondem respectivamente aos eixos longitudinal, lateral e vertical do sistema aeronáutico.



Fonte: Adaptado de Bresciani (2008)

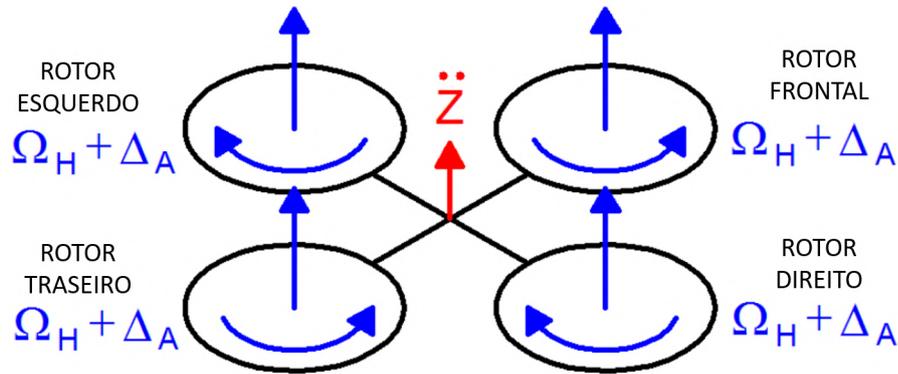
Para esta configuração de VANT (descrita na figura 3), há quatro GMPs atuando em conjunto. Dois dos motores (não adjacentes) devem girar no sentido horário e os demais no sentido anti-horário para cancelar o efeito do torque gerado por eles quando estiverem na mesma velocidade de rotação (SÁ, 2012). No caso da configuração da figura 3, os rotores esquerdo e direito giram em sentido horário e os demais, no sentido anti-horário.

Existem quatro movimentos que são essenciais para o controle de drones de asas rotativas em qualquer missão. O primeiro é o *throttle*, que corresponde ao movimento de translação ao longo do eixo vertical, e os demais são o *roll*, o *pitch* e o *yall* que são equivalentes a uma rotação em torno dos eixos longitudinal, lateral e vertical respectivamente.

Para garantir cada uma dessas movimentações, apenas o controle das velocidades

de rotação dos motores é necessário de acordo com Bresciani (2008). No caso do *throttle*, todos os GMP devem aumentar suas rotações simultaneamente e na mesma proporção, como ilustrado na figura 4, gerando uma componente do empuxo maior do que a do peso do drone.

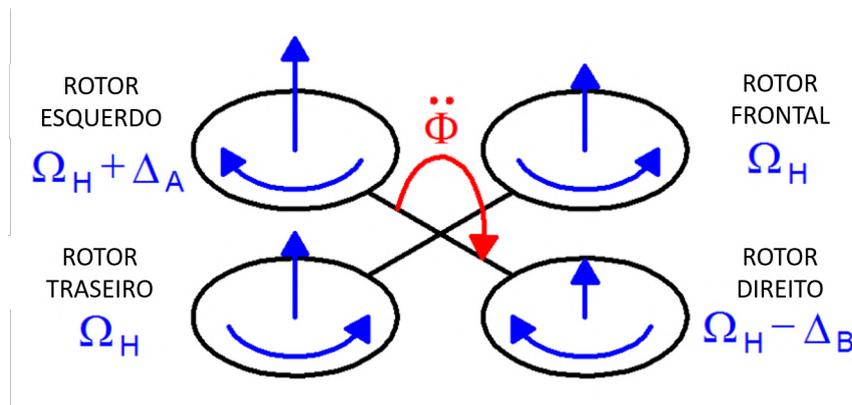
Figura 4 – Movimento de *throttle*



Fonte: Adaptado de Bresciani (2008)

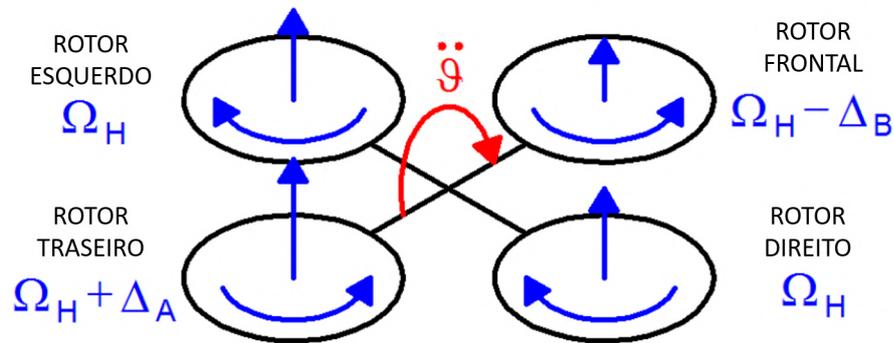
Já para o movimento de *roll* (figura 5), o rotor esquerdo deve ser acelerado e o rotor direito desacelerado (ou vice-versa para um movimento no sentido negativo) na mesma proporção para manter a mesma altitude (MADRUGA et al., 2018). Desse modo, o drone desenvolverá um momento em torno do eixo longitudinal, devido ao desequilíbrio dos empuxos dos rotores esquerdo e direito.

Figura 5 – Movimento de *roll*

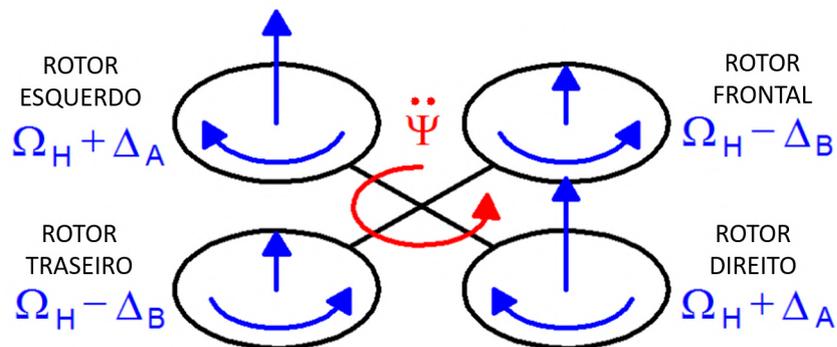


Fonte: Adaptado de Bresciani (2008)

O movimento de *pitch* (figura 6) é similar ao de *roll*, no entanto, são os rotores frontal e traseiro que devem ter seus empuxos modificados. Por fim, para garantir o movimento de *yaw* (figura 7), os rotores que giram no mesmo horário devem ser acelerados e os rotores restantes devem compensar o empuxo gerado, diminuindo suas rotações. O movimento de rotação em torno do eixo vertical ocorre apenas pelo desbalanceamento do momento resultando do drone em torno desse eixo.

Figura 6 – Movimento de *pitch*

Fonte: Adaptado de Bresciani (2008)

Figura 7 – Movimento de *yaw*

Fonte: Adaptado de Bresciani (2008)

Mais detalhes sobre modelagem matemática de um quadricóptero e as possíveis estratégias de controle adotadas podem ser encontrados em (MADRUGA et al., 2018), (BRESCIANI, 2008) e (SÁ, 2012).

2.2 GRUPO MOTOPROPULSOR

Grupo motopropulsor é o nome que se dá ao conjunto motor e hélice (RODRIGUES, 2013). Esta combinação de componentes é utilizada para gerar propulsão para diversos sistemas, dentre eles a aeronave.

2.2.1 Motor

O motor é essencialmente um transformador de energia, cujo objetivo é converter outros tipos de energia em potência mecânica de eixo. Os mecanismos utilizados para realizar esta conversão são os mais diversos possíveis, a exemplo dos motores elétricos.

2.2.1.1 Motor *Brushless* DC

O motor *brushless* DC é um tipo de motor elétrico síncrono sem escovas, alimentado por corrente contínua. Seu rotor é composto por ímãs permanentes e em seu estator estão posicionadas as bobinas indutoras (AUTOMATION, 2022). O movimento do rotor ocorre devido às forças de atração e/ou repulsão magnética que surgem entre os ímãs e as bobinas devido à eletrização do estator.

Uma das formas de controlar a velocidade de rotação deste motor é utilizando um controlador eletrônico de velocidade (ESC), cuja função essencialmente é determinar quais bobinas devem ser eletrizadas a cada instante para garantir o giro do campo magnético. A comunicação com o ESC ocorre a partir do envio de uma modulação por largura de pulso (PWM). Pulsos de maiores durações geram forças de atração e/ou repulsão mais intensas no motor, acarretando no aumento da velocidade do eixo de potência.

2.2.2 Hélice

A hélice (figura 8) é uma superfície desenvolvida para interagir com o escoamento ao seu redor gerando reações aerodinâmicas. Uma das forças geradas na hélice é a força de sustentação que é comumente chamada de força de tração, por ser a responsável pela propulsão da aeronave. Segundo NASA (2021), a secção de uma pá de hélice corresponde a um perfil aerodinâmico que contém as características geométricas apresentadas na figura 9.

Dentre os principais fatores que podem influenciar o desempenho de uma hélice, é possível citar seu diâmetro, seu passo, a área das pás e o perfil aerodinâmico, pois são esses elementos que ditam como ocorrerá a interação entre a geometria e o escoamento. É válido ressaltar que podem ser utilizados mais de um perfil aerodinâmico em toda a extensão da hélice.

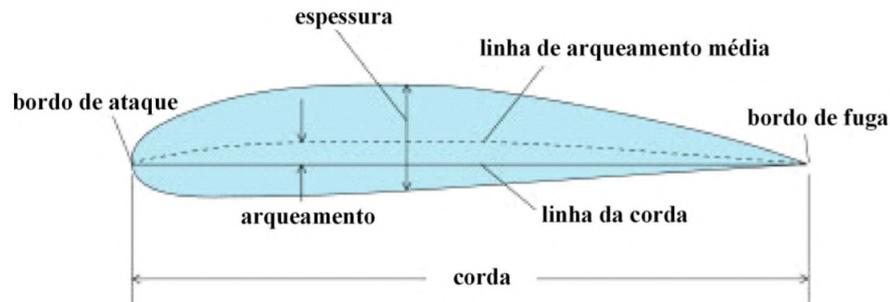
A caracterização de uma hélice normalmente é feita a partir de seu diâmetro e

Figura 8 – Hélice tri-pá



Fonte: Propellers® (2022).

Figura 9 – Principais características geométricas de um perfil aerodinâmico



Fonte: Rodrigues (2013).

seu passo. De acordo com Rodrigues (2013), o diâmetro da hélice é relativo à distância entre as pontas das pás para o caso de uma hélice de duas pás. Para hélices mono-pá ou com múltiplas pás, o diâmetro é representado pela circunferência realizada durante o movimento.

Já o passo da hélice representa o avanço (teórico) que a hélice daria em uma única volta, já que sua geometria é helicoidal. Ou seja, uma hélice 13"x4" tem um diâmetro de 13 polegadas e seu passo é de 4 polegadas, indicando que esta hélice se deslocaria 4 polegadas à frente a cada volta realizada.

2.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Sistemas de aquisição de dados têm como objetivo realizar medições de grandezas físicas e transformar essas medições em sinais digitais que possam ser processados e manipulados posteriormente através de um computador. Esse processo é fundamental para realização do controle de processos e/ou sistemas. Sistemas de aquisição são compostos em geral de quatro elementos principais, sejam eles:

- Sensores e transdutores;
- Condicionadores de sinais;
- Conversores analógico-digitais;
- Processadores.

Segundo Weldling (2010), sensores são elementos *sensíveis* a alguma forma de energia do ambiente (energia luminosa, térmica, cinética, entre outras) relacionada a grandezas físicas que possam ser mensuradas, como temperatura, pressão, velocidade, entre outras. Já os transdutores são dispositivos completos, que já contém os sensores necessários, capazes de converter esta medida de *sensibilidade* em um sinal elétrico proporcional.

Muitas vezes, este sinal elétrico gerado pelos transdutores não é adequado para passar pela conversão analógica-digital imediatamente, sendo necessária a utilização de

condicionadores de sinais. São diversas as funções que esses condicionadores podem ter, mas dentre as principais é possível listar:

- **Amplificação:** alguns transdutores geram sinais elétricos de amplitudes muito baixas. A amplificação destes sinais em geral aumenta a sua resolução, permitindo a captura de mais detalhes. Para maximizar este efeito, é sugerido que a amplitude do sinal seja próxima ou igual à amplitude máxima suportada pelo conversor analógico-digital;
- **Filtragem:** é natural que os sinais gerados pelos sensores e transdutores contenham ruídos que dificultem a obtenção de um valor confiável da medição da grandeza física. Neste caso, podem ser aplicados filtros para retirar sinais de frequências indesejadas para a medição da grandeza específica.
- **Isolamento:** o objetivo deste tipo de condicionador de sinal é garantir o sinal do transdutor não sofrerá influência de potenciais elétricos indesejados no circuito, alterando seu valor real.

Após um tratamento inicial do sinal analógico, é possível enfim transformá-lo em um sinal digital. Esta transformação é realizada através de um conversor analógico-digital e, muitas vezes, este componente é intrínseco a uma placa de aquisição de dados, como o *Arduino*. Para isso, utiliza-se a estratégia da amostragem de sinais, na qual um sinal analógico e contínuo (que é gerado intermitentemente pelo sensor/transdutor) passa a ser representado por diversos valores discretos, capturados a uma velocidade fixada conhecida como *taxa de amostragem* (figura 10).

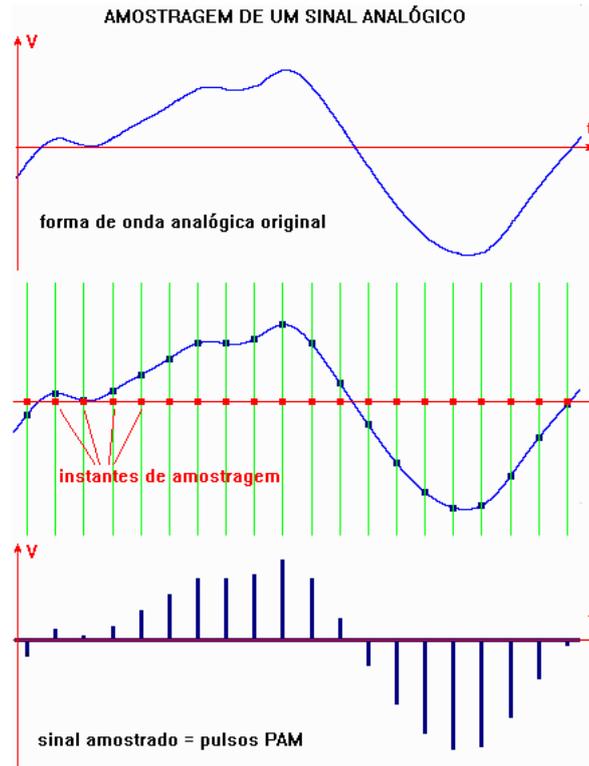
A escolha da taxa de amostragem é essencial para evitar erro de *aliasing*, que ocorre quando a taxa de amostragem não é suficiente para reconstruir o sinal de maneira única, gerando uma interpretação equivocada do sinal adquirido. Para evitar este tipo de situação, é necessário respeitar o *Teorema de Nyquist* que postula que é possível interpretar o sinal de maneira inequívoca sempre que a taxa de amostragem for no mínimo do dobro da componente de frequência mais alta do sinal contínuo (OGATA, 1995).

Por fim, para realizar a visualização e tratamento dos dados convertidos, é possível utilizar um computador (processador) para interfacear com a placa de aquisição. A filtragem de dados também pode ocorrer após a conversão do sinal com a implementação de *filtros digitais*. Eventualmente, caso seja desejado realizar o controle de um sistema a partir da leitura dos sinais recebidos, é possível acoplar atuadores (como servos, motores, entre outros) à placa de aquisição de dados e enviar sinais de comando do computador em tempo real.

2.3.1 Célula de Carga

A célula de carga (figura 11) é um instrumento utilizado para medição de massas, através da sensibilidade ao peso (força). Seu funcionamento ocorre em conjunto com um

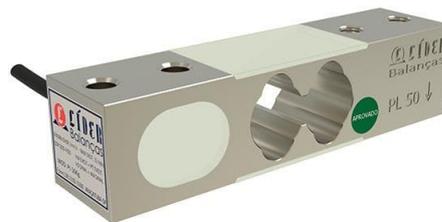
Figura 10 – Sinal senoidal contínuo e sua representação discreta



Fonte: Murilo (2019)

extensômetro e um circuito elétrico do tipo ponte de *Wheatstone*.

Figura 11 – Célula de carga



Fonte: Balanças® (2022)

O extensômetro (também conhecido como *strain gauge*) consiste em um transdutor capaz de quantificar deformações mecânicas em estruturas (figura 12). Este componente deve ser fixado a estrutura de modo que a deformação da peça seja transferida para o *strain gauge*. A mudança da geometria de seus filamentos resulta na modificação da resistência de seu circuito.

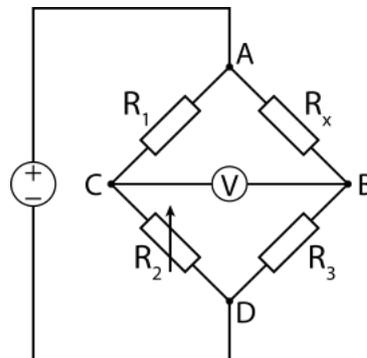
No entanto, geralmente a mudança de resistência desses extensômetros é muito baixa, o que dificulta sua medição com precisão. Para isto, é utilizado um circuito chamado de ponte de *Wheatstone* que consiste em quatro resistências (duas conhecidas, uma ajustável e outra desconhecida, onde deve ser acoplado o extensômetro) e um galvanômetro (figura 13). O equilíbrio da ponte ocorre quando a corrente pelo galvanômetro é nula e para

Figura 12 – Extensômetro do tipo folha



Fonte: Robótica (2022)

atingir essa condição, a resistência variável deve ser ajustada. Uma vez que o equilíbrio foi alcançado, a resistência desconhecida (resistência do extensômetro), pode ser obtida através da aplicação das leis de *Kirchoff* (NUSSENZVEIG, 2015).

Figura 13 – Ponte de *Wheatstone*

Fonte: Wikipédia (2018)

Por fim, a célula de carga é a estrutura na qual o extensômetro é fixada. Com a aplicação de esforços em suas extremidades, ocorre uma deformação que é capturada pelo extensômetro e convertida em uma tensão a partir da ponte de *Wheatstone*. Para a correta utilização da célula de carga, a variação de sua tensão deve ser diretamente relacionada com a força aplicada em suas extremidades, gerando o que se chama de curva da célula de carga. Este procedimento pode ser feito a partir de uma calibração inicial com pesos ou forças já conhecidas.

2.3.2 Tacômetro

O tacômetro é um sensor/transdutor que realiza a contabilização da velocidade de rotação de um motor. Os tacômetros podem apresentar os mais variados mecanismos para

realizar esta medição (elétrico, mecânico, centrífugo, entre outros), mas, para os fins deste trabalho, é importante descrever o funcionamento do mecanismo óptico.

Este tipo de tacômetro é capaz de contabilizar a quantidade de rotações de um motor através de sensores fotoelétricos. Uma das estratégias utilizadas é a de transmissão, na qual é utilizada um feixe de raio laser perfeitamente alinhado com um receptor que a cada rotação do motor é interrompido por algum elemento que gira em conjunto com o eixo.

2.3.3 Arduino

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica (TEAM, 2018b) *open-source*, de baixo custo e utilização simples. Seu objetivo é garantir versatilidade e simplicidade para o desenvolvimento dos mais diversos tipos de projetos que necessitam em algum grau de aquisição de dados e execução de comandos com base nas leituras adquiridas.

Para isto, a plataforma Arduino conta com uma placa eletrônica (figura 14), que permite o acoplamento de sensores e outros componentes necessários para instrumentação, e um ambiente de desenvolvimento (figura 15) chamado como *Arduino Software (IDE)*, no qual são descritos os comandos que a placa deve realizar. Estas instruções são descritas em uma linguagem de programação que contém elementos de C e C++ e devem ser enviadas para o microcontrolador presente na placa.

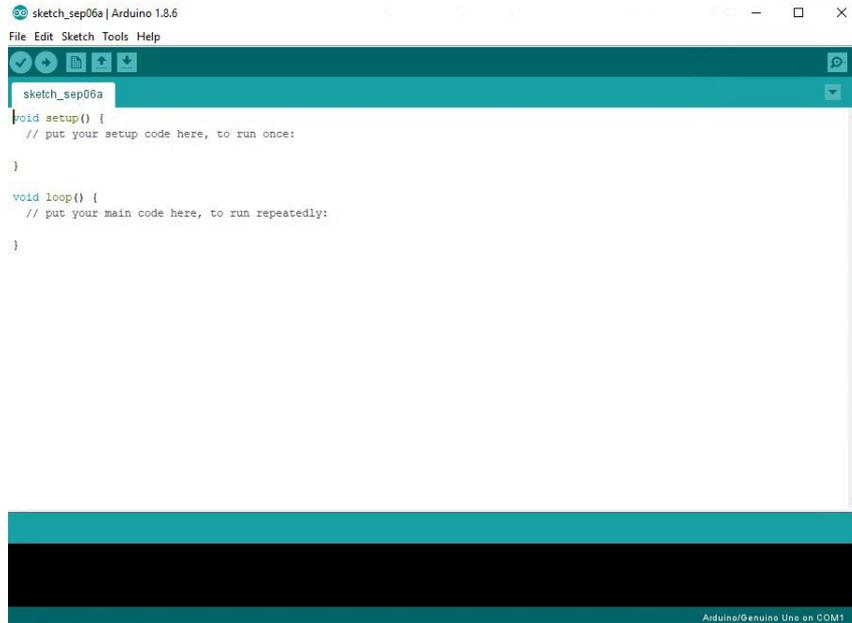
Figura 14 – Placa eletrônica do modelo Arduino Uno



Fonte: Team (2022)

Para realizar a comunicação com os sensores, a placa eletrônica do Arduino contém diversas entradas e saídas de sinais analógicos ou digitais, além de portas de alimentação que variam entre 0V (GND) e 5V, sendo esta a faixa de tensão de operação do *hardware*. Existem diversos modelos de placas Arduino e elas podem diferir em relação ao modelo do microcontrolador utilizado e às entradas e saídas disponíveis. Para os fins deste trabalho, é importante conhecer os detalhes do modelo *Arduino Uno*, cujas entradas e saídas disponíveis

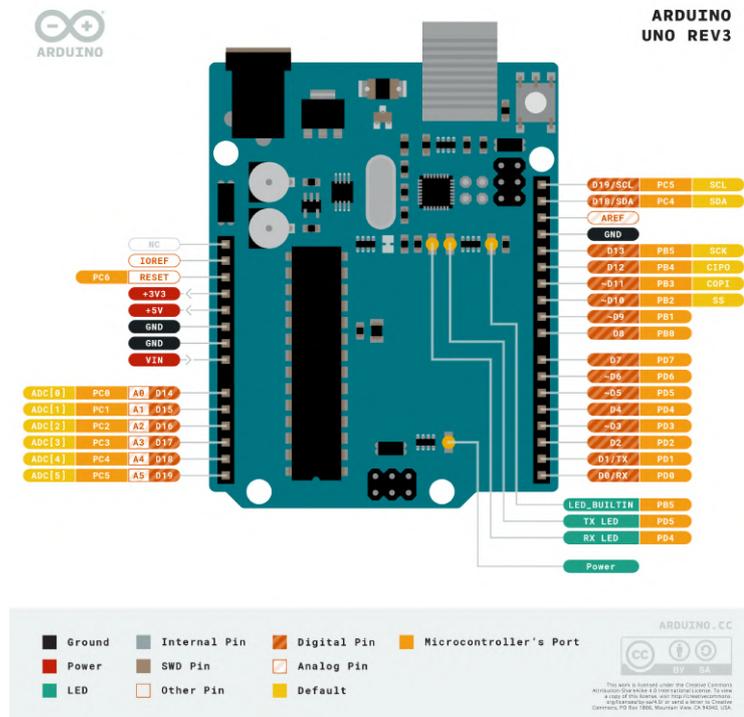
Figura 15 – *Arduino Software (IDE)*



Fonte: A Autora (2022).

encontram-se descritas na figura 16 e o microcontrolador empregado é o ATmega328 que possui uma frequência de trabalho de 16MHz.

Figura 16 – Descrição das entradas e saídas disponíveis no modelo Arduino Uno



Fonte: Team (2022)

2.4 MANUFATURA ADITIVA

Manufatura Aditiva se refere ao conjunto de tecnologias que são capazes de criar objetos físicos a partir de um modelo digital (3DLAB, 2019). Este processo ocorre a partir da adição progressiva de material até que a peça final seja obtida, o que minimiza o desperdício de material e permite a prototipagem rápida de geometrias complexas. Atualmente, as máquinas que realizam este tipo de fabricação são conhecidas como impressoras 3D (figura 17).

Figura 17 – Impressora 3D do modelo *Ender 3*



Fonte: Creality® (2021)

Diversos tipos de materiais podem ser utilizados para a confecção de peças através da manufatura aditiva, porém os mais utilizados e acessíveis são o PLA e o ABS. Esses materiais em geral são comercializados na forma de filamento que são gradativamente fundidos e depositados, a partir da extrusora, na base da impressora para fabricar a peça.

O processo para a fabricação de uma peça através de manufatura aditiva se inicia com a confecção de um modelo tridimensional em um *software* CAD. Após a conclusão do projeto, é necessário um tipo de *software* conhecido como *fatiador* que divide o modelo tridimensional em pequenas camadas da ordem de décimos de milímetros. Este processo resulta em um arquivo no formato *G-code* que pode ser interpretado diretamente pela impressora 3D, contendo todo o plano de movimentação da extrusora e os parâmetros de controle da impressão como material a ser utilizado, temperatura de extrusão, velocidade de translação da extrusora, entre outros.

3 METODOLOGIA

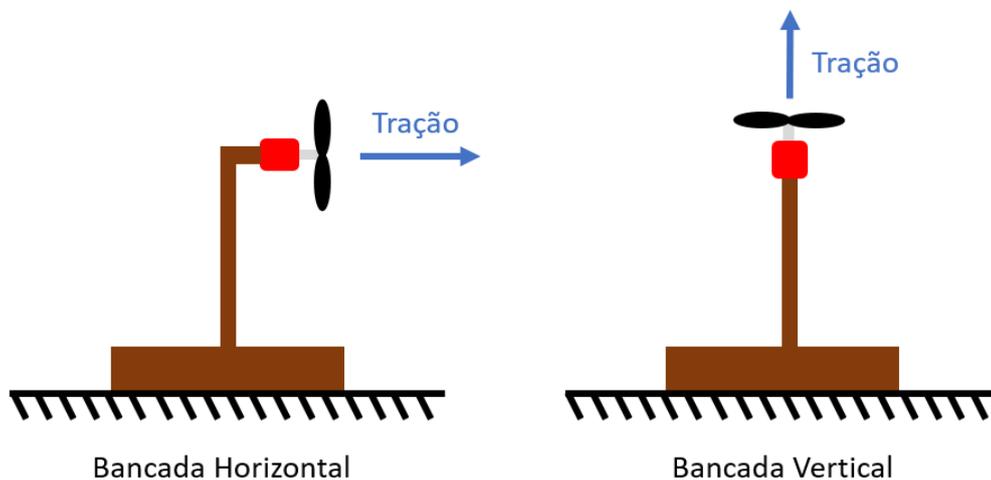
3.1 PROJETO MECÂNICO E FABRICAÇÃO DA BANCADA

3.1.1 Escolha do Conceito Vertical para a Plataforma de Testes

A idealização do projeto foi iniciada realizando uma pesquisa sobre trabalhos previamente desenvolvidos para medir tração de motores de quaisquer tipos. O intuito desta revisão bibliográfica foi identificar conceitos de bancadas de testes que pudessem ser adaptados para cumprir os requisitos descritos na seção 1.1.2.

A partir de Cestari e Soares (2019), Lovizon (2019), Coutinho (2021) e Leichtweis (2016), observou-se uma tendência a utilização de bancadas horizontais, nas quais a força medida pela célula de carga é aplicada paralelamente a bancada (figura 18). Embora este tipo de bancada possa apresentar vantagens em termos aerodinâmicos, o seu revés é a ocorrência de atrito com a aceleração do motor, potencializada pela vibração. Para o caso de motores com potências mais altas, esta perda pode ser negligível com a devida utilização de lubrificação ou rolamentos, mas deve ser um ponto de atenção para este tipo de projeto.

Figura 18 – Esquema funcional das bancadas horizontal e vertical



Fonte: A Autora (2022).

As bancadas verticais encontradas foram aplicadas em medição de tração de motores de foguetes de pequeno porte, como em (TEAM, 2018a), ou eram modelos comercializáveis. Ao contrário das versões horizontais, estes modelos medem a força que é aplicada na direção perpendicular à base (figura 18) e não apresentam geração de atrito, mas devem receber atenção em relação à ocorrência de *efeito solo*, um fenômeno aerodinâmico ocasionado pela proximidade da hélice com superfícies horizontais que tende a potencializar o empuxo gerado pelo grupo motopropulsor.

Diversos modelos matemáticos foram propostos ao longo do tempo para contabilizar a influência do efeito solo na geração de empuxo do grupo motopropulsor. A abordagem descrita em Cheeseman (1981) e apresentada na equação 1 foi amplamente aceita e utilizada para estudos ligados a helicópteros por muito tempo, sendo ainda corroborada em diversos casos como descrito em (TANNER et al., 2015). Neste modelo, T é tração sob efeito solo, T_∞ é a tração sem efeito solo, R é o raio do rotor e z é a distância do rotor em relação ao solo.

$$\frac{T}{T_\infty} = \frac{1}{1 - \frac{R^2}{4z}} \quad (1)$$

No entanto, sua aplicação é limitada para rotores de menor escala, que em geral são utilizados em VANTs, e é possível que esta relação não apresente a devida acurácia nestes casos (POWERS et al., 2013). Neste caso, além da realização de experimentos para capturar a influência deste fenômeno, também é possível utilizar algum dos modelos analíticos ou uma simulação por dinâmica dos fluidos computacional que foram desenvolvidos especificamente para rotores de VANTs (MATUS-VARGAS; RODRIGUEZ-GOMEZ; MARTINEZ-CARRANZA, 2021).

Uma vez que foram identificados modelos que poderiam contabilizar a influência do efeito solo nas leituras da bancada vertical, optou-se por utilizar este conceito de plataforma para o desenvolvimento deste trabalho, dispensando a utilização de mancais e/ou peças mecânicas mais complexas (necessárias para a diminuição e/ou eliminação da geração de atrito).

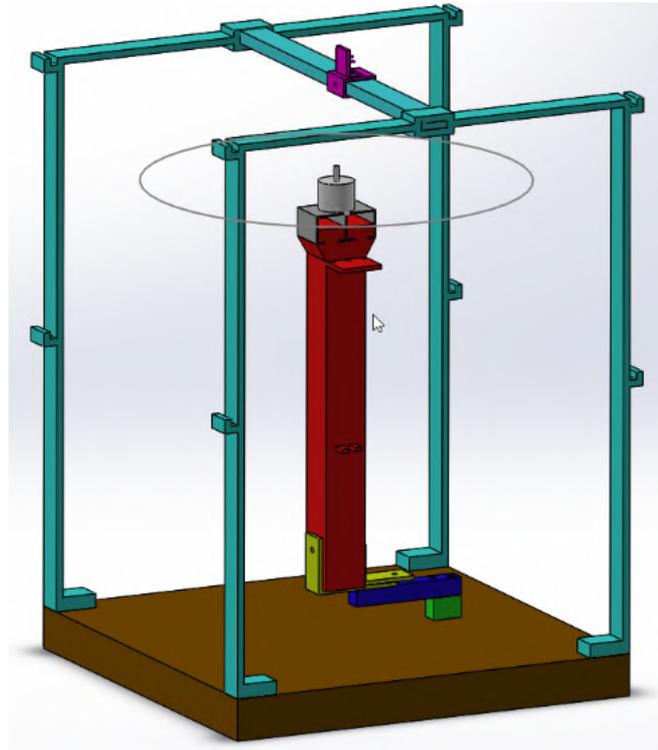
3.1.2 Modelagem da Bancada

Após a definição do conceito vertical para a bancada, deu-se início a modelagem da plataforma de testes em *software* CAD, que resultou no projeto ilustrado na figura 19. O modelo foi desenvolvido com o intuito de cumprir os requisitos de projeto impostos por alguns dos objetivos descritos na seção 1.1.2.

Por exemplo, para comportar hélices de até 11 polegadas, a bancada deve ter ao menos 28 cm de comprimento e largura. Em relação ao empuxo máximo permitido para o grupo motopropulsor (de até 1 kgf), foi definido que o peso mínimo da bancada completa deve ser de 2 kg, mantendo uma margem de segurança para garantir a aderência da plataforma mesmo na potência máxima dos motores ensaiados.

Além disso, como deve ser realizada a medição do empuxo e da velocidade de rotação da hélice, era sabido desde o início que seria necessário alocar uma célula de carga e um emissor/receptor de laser, para desempenhar a função de um tacômetro óptico. Por fim, também seria utilizado uma placa do *Arduino Uno* para receber os dados dos sensores utilizados.

Figura 19 – Modelo desenvolvido em *software* CAD para a bancada



Fonte: A Autora (2022).

A base (componente na cor marrom) foi projetada como um quadrado de dimensões 30cm por 30cm a ser fabricado de algum composto de madeira, como MDP. Este componente deve garantir ao projeto a massa mínima de 2kg, assumida como requisito de projeto.

Para o posicionamento da célula de carga (componente na cor azul) sobre a base, foi inserido um pequeno bloco de alumínio (componente na cor verde) que deveria garantir certa folga até base, permitindo a livre deformação da célula. A fixação do bloco na base foi planejada para ser feita através de dois parafusos que deveriam ser longos o suficiente para também fixar a célula de carga logo em seguida.

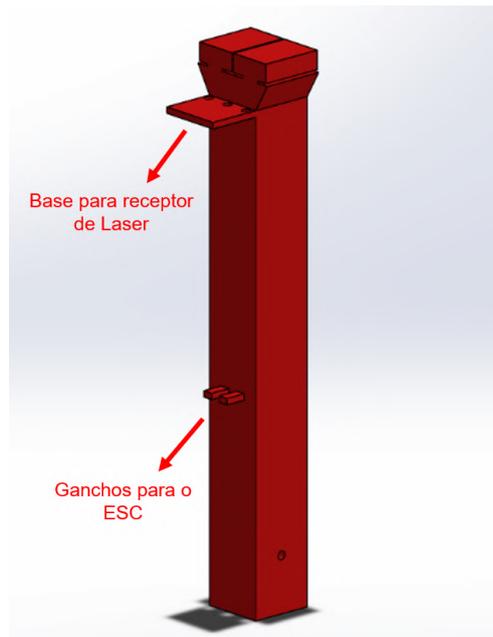
Após o posicionamento da célula, duas cantoneiras (componentes na cor amarelo) foram utilizadas para fazer a fixação da haste do motor. As cantoneiras precisaram ser serradas e limadas para chegar ao comprimento adequado para o uso na bancada e seriam fixadas com um parafuso na célula de carga. A haste do motor (componente na cor vermelho) foi encaixada entre as duas cantoneiras e fixada através de um parafuso.

Durante o projeto da haste, considerou-se a altura final adequada para o posicionamento do motor, tendo em vista a possibilidade de ocorrência de efeito solo na hélice. Uma vez que esta plataforma foi desenvolvida para atuar de maneira complementar à bancada de teste de algoritmos de controle disponível no Laboratório de Automação Industrial, optou-se por utilizar a mesma altura dos motores da bancada. Desse modo, com a ocorrência ou não de efeito solo, as relações comando-tração identificadas com a plataforma de medição de tração poderiam ser imediatamente utilizadas na bancada

desenvolvida por Dias (2021).

Definiu-se que a alocação do ESC do motor e do sensor receptor de laser (para medição do RPM do motor) deveria ser feita na própria haste do motor. Para isto, foram posicionados dois ganchos no corpo da haste para o apoio do ESC e uma pequena base mais próxima do motor para posicionar o receptor do laser (figura 20).

Figura 20 – Ganchos para o ESC e base para o receptor de laser na haste do motor



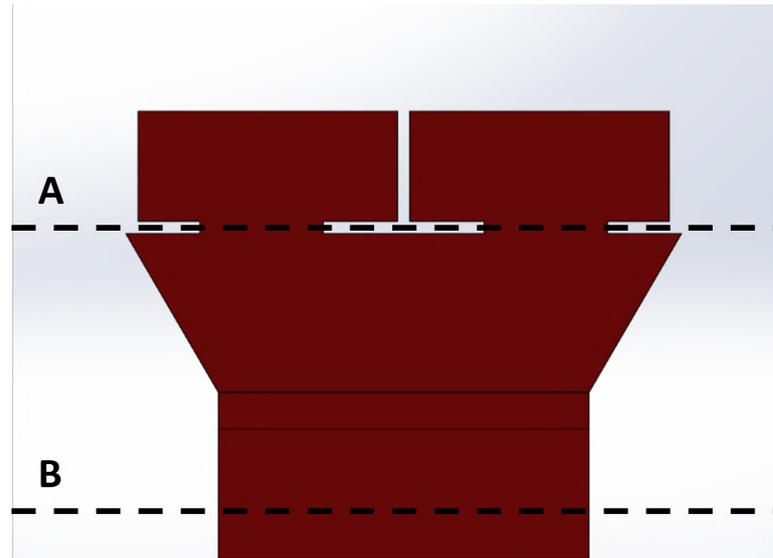
Fonte: A Autora (2022).

Além disso, para facilitar a confecção da haste, considerou-se fabricá-la através de impressão 3D, utilizando como material do PLA. Foi realizado um cálculo para garantir que a deformação da haste, caso fosse fabricada em PLA, não influenciaria de maneira relevante na medição da célula de carga. Inicialmente, foi calculada a tensão axial atuante em algumas das seções transversais críticas da haste (figuras 21 e 22) através da equação 2, em que N é o esforço normal na haste, A é a área da seção transversal e σ é a tensão axial. Em seguida, foi aplicada a lei de *Hooke* (equação 3) tendo em vista que o módulo de *Young* de um corpo de prova de PLA com preenchimento de 25% foi determinado por Silva (2019) como 2,654GPa. Na equação 3, ϵ é a deformação. Os resultados seguem descritos na tabela 1.

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2)$$

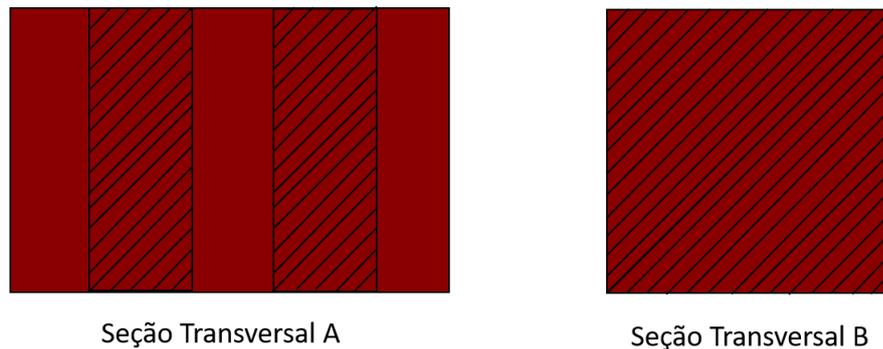
$$\sigma = E\epsilon \quad (3)$$

Figura 21 – Cortes realizados na haste para obter as seções transversais críticas



Fonte: A Autora (2022).

Figura 22 – Seções transversais críticas para a haste



Fonte: A Autora (2022).

Tabela 1 – Deformação linear da haste por seção transversal

Seção Transversal	Área (m ²)	Deformação Máxima (m)
A	0.0008	$6,923 \times 10^{-9}$
B	0.0009	$8,205 \times 10^{-7}$

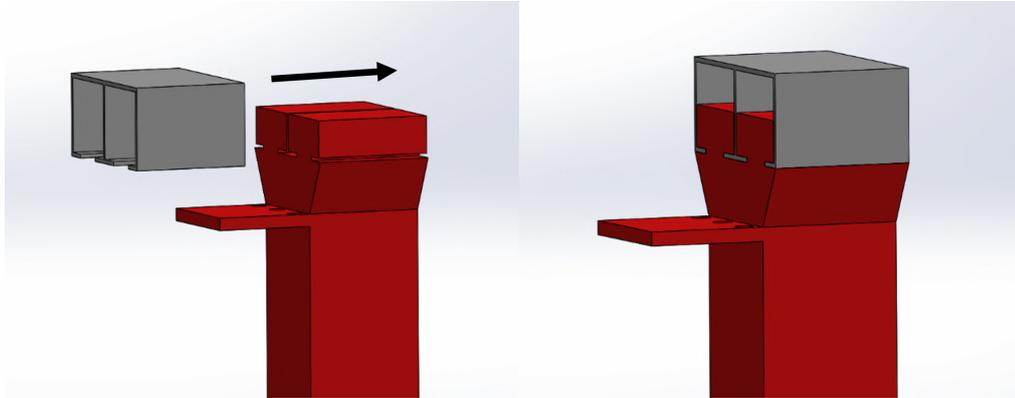
Fonte: A Autora (2022).

Uma vez que a deformação nominal de uma célula de carga é da ordem de décimos de milímetros (10^{-4} m), é evidente que utilização do PLA como material para a confecção da haste não vai acometer de maneira relevante a medição de empuxo.

Para permitir o acoplamento de diferentes motores, foi desenvolvido um mecanismo por encaixe (figura 23) entre a haste e um perfil de alumínio (componente na cor cinza). Para cada motor, deve haver um perfil específico com seus próprios furos de fixação, que em geral variam de modelo para modelo. Desse modo, para ensaiar um motor diferente,

bastaria desacoplar o perfil da haste e trocá-lo pelo perfil com o motor a ser testado, sem necessidade de desmontar todo o restante da estrutura.

Figura 23 – Mecanismo de encaixe do perfil de alumínio



Fonte: A Autora (2022).

Para garantir que a bancada pudesse ser utilizada com segurança por outros alunos, foi desenvolvida uma proteção externa para encobrir o motor e a hélice em movimento, diminuindo o risco de acidentes ligados à falha da hélice (com arremesso de seus fragmentos na direção radial) e acionamento acidental do motor enquanto o usuário está manuseando o motor e/ou a hélice.

Durante o manuseio da bancada, espera-se que o usuário realize todas as modificações necessárias na bancada, como ajuste da fixação do motor e da hélice e das conexões elétricas dos sensores, adicione a proteção encobrendo a haste, o motor e a hélice e então acione o motor para realizar seus experimentos. A estrutura não precisa ser fixada à base, foram idealizados apenas a utilização de alguns pinos presos à base da plataforma que devem guiar o posicionamento da proteção, garantindo assim que o usuário sempre recolocará a estrutura na posição correta.

A proteção foi projetada para ser fabricada de perfis e chapas de alumínio e, aproveitando esta mesma estrutura, foi desenvolvida uma peça para fabricação através de impressão 3D com o intuito de posicionar o emissor de raio laser. Esta peça foi projetada para encaixar no perfil de alumínio imediatamente acima do motor, permitindo o alinhamento com o receptor. Sua fixação deve ser realizada através de um parafuso lateral.

3.1.3 Fabricação da Bancada

Durante a fabricação da bancada, alguns detalhes construtivos precisaram ser adicionados. Primeiramente, foi fabricada uma base na impressora 3D (figura 24) para posicionar a placa de aquisição de dados desenvolvida para a bancada, porque as soldas abaixo da placa dificultavam sua fixação diretamente na base da bancada.

Figura 24 – Base para placa de aquisição de dados



Fonte: A Autora (2022).

O posicionamento do Arduino seguiu normalmente, porém observou-se que seriam necessários mais canais de alimentação que o disponível na placa. Portanto, foi utilizada uma pequena extensão para disponibilizar canais suficientes para toda a instrumentação da bancada.

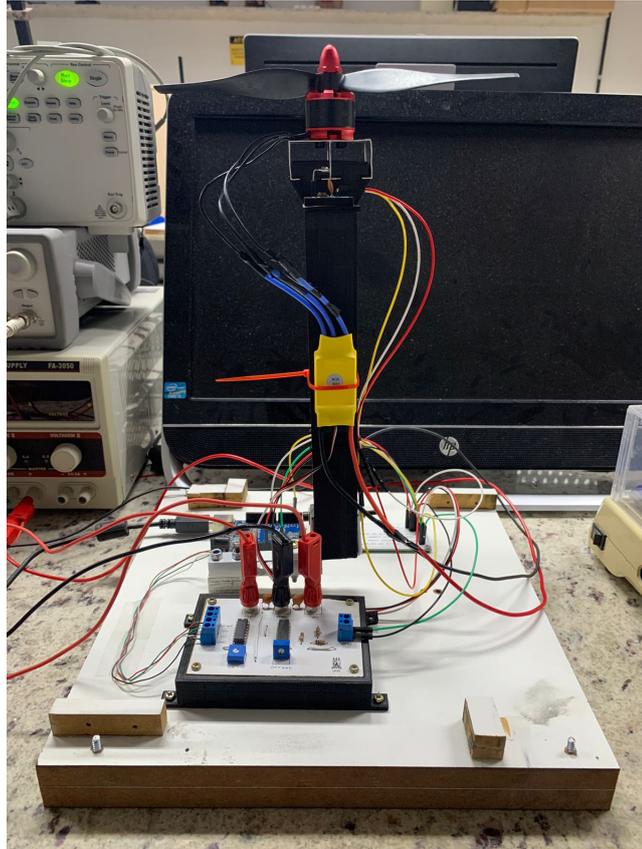
Figura 25 – Extensão de canais do Arduino



Fonte: A Autora (2022).

Em relação à estrutura da proteção externa da bancada, observou-se que ela não apresentava a rigidez necessária para garantir o alinhamento do emissor com o receptor do laser. Desse modo, todas as vezes que o usuário precisava retirar e recolocar a proteção na bancada por qualquer motivo, o alinhamento dos sensores era perdido. Para corrigir este problema, foram fabricadas vigas de suporte na impressora 3D que encaixavam nos perfis e adicionavam rigidez a todo o conjunto. A fixação dessas vigas foi realizada através de parafusos pelas laterais, assim como a peça de suporte do emissor do laser. A estrutura final obtida está exibida nas figuras 26 e 27 e a relação com os preços dos materiais utilizados encontra-se no apêndice A.

Figura 26 – Bancada finalizada sem a tampa de proteção



Fonte: A Autora (2022).

3.2 MONTAGEM E CALIBRAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

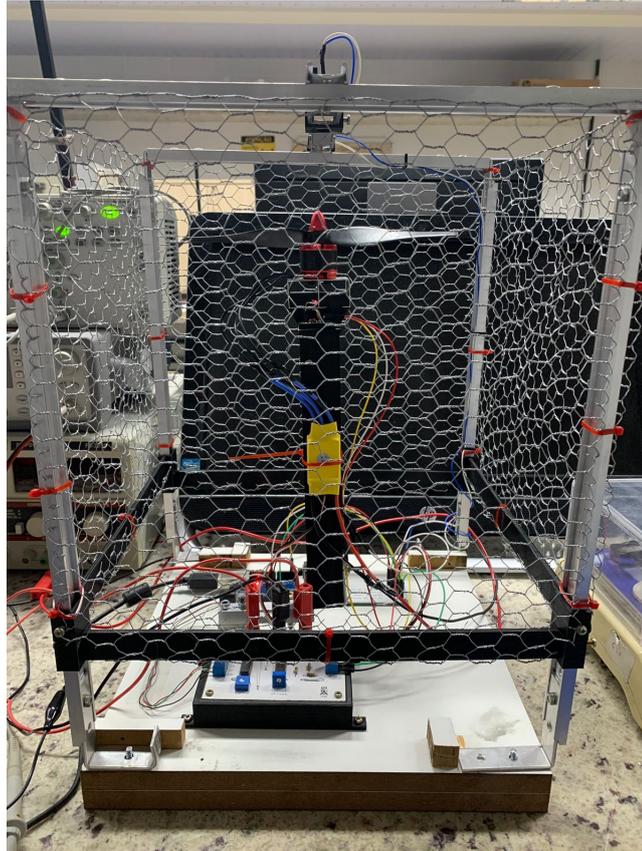
3.2.1 Utilização dos Canais do Arduino Uno

Como definido na seção 3.1.2, um Arduino Uno foi utilizado para capturar os sinais dos sensores. Para garantir a comunicação entre o Arduino e os sensores, em geral é necessário que os sensores recebam alimentação elétrica do Arduino que é realizada através de duas conexões, uma em um canal de 5V e outra em um canal terra (0V ou GND), e também que exista alguma conexão para transmissão do sinal que pode ser analógico ou digital.

Existem casos em que o componente é alimentado por fontes externas e não precisa receber alimentação do Arduino (como ocorre com a célula de carga utilizada na bancada) ou mesmo que não há necessidade de recebimento ou envio de um sinal (como no caso do emissor de laser, que não precisa receber sinal algum para permanecer sempre acesso). Com base no explicitado, a lista de componentes ligados ao Arduino e suas respectivas conexões requeridas segue descrita na tabela 2.

Concluiu-se, portanto, que seriam necessários quatro pinos GND, três pinos de 5V, dois pinos para sinais digitais e um pino para sinal analógico. Em relação aos sinais, o Arduino tinha canais de sobra, mas no caso dos pinos de alimentação, faltariam um pino

Figura 27 – Bancada finalizada com a tampa de proteção



Fonte: A Autora (2022).

Tabela 2 – Ligações requeridas por cada componente da instrumentação

Componente	Entrada Analógica	Entrada Digital	5V	GND
Receptor de Laser	-	X	X	X
Emissor de Laser	-	-	X	X
ESC	-	X	X	X
Placa de Aquisição	X	-	-	X

Fonte: A Autora (2022).

GND e um pino de 5V. Por isso optou-se por utilizar uma pequena extensão ao lado do Arduino para aumentar o número de canais de alimentação disponíveis.

A extensão é composta de conjuntos de pinos que correspondem a um pino específico do Arduino. Por exemplo, para que o conjunto de pinos da figura 25 sinalizado com a mensagem *GND* corresponda de fato a pinos GND, em primeiro lugar, um dos pinos deve ser conectado a um dos GND do Arduino. Em seguida, todos os demais pinos daquele conjunto serão GND, permitindo que todos os sensores que precisem de uma ligação com o terra sejam conectados ali. Por questão de padronização, a extensão englobou não apenas os pinos de alimentação, mas também os canais digitais e analógicos que seriam necessários. Assim, após a montagem da configuração inicial, todos os componentes que precisaram de ligações com o Arduino foram ligados apenas à extensão.

A escolha dos canais de sinais que foram utilizados no Arduino teve algumas razões específicas. No caso do sinal de controle do motor (sinal digital), foi escolhido o pino 9 que permite a utilização do PWM por *hardware* e é compatível com a biblioteca *servo.h* escolhida para realizar a comunicação com o ESC. Já em relação ao pino de entrada do sinal do receptor do laser, foi utilizado o pino 2, que pode ser configurado como pino de *interrupção*.

Uma *interrupção* é um sinal que para imediatamente (por *hardware*) todos os processos que estão sendo executados pelo Arduino naquele instante. Em seguida, uma rotina prioritária vai ser executada e ao seu término, todos os demais processos voltam a funcionar normalmente. Essa foi a estratégia utilizada para realizar o cálculo da velocidade do motor, descrita na seção 3.3.1 mais adiante.

3.2.2 Projeto da Placa de Aquisição de Dados da Célula de Carga

Para realizar a aquisição dos dados da célula de carga, foi necessário o desenvolvimento de uma placa para realizar a amplificação do sinal de tensão para valores entre 0 e 5V, legíveis para o Arduino. Isto foi necessário porque os valores de tensão gerados pela célula de carga são muito baixos e podem não ser interpretados com qualidade por apresentarem uma baixa resolução.

Inicialmente, a placa aplica um ganho no sinal da célula de carga, simplesmente amplificando o valor da tensão, mas este passo pode resultar em um valor acima de 5V. Portanto, também foi utilizado um *somador de sinal* para deslocar o valor em um quantidade fixa.

Na prática, para realizar este processo, a placa é alimentada continuamente por uma fonte simétrica (-10 a 10V) e utilizou dois CIs, o INA125 (BURR-BROWN, 1997) e o LM324 (PHILLIPS SEMICONDUCTORS, 1995). O INA125 é o circuito que recebe diretamente o sinal da célula de carga e amplifica o sinal por meio de um ganho. O ajuste deste ganho é realizado a partir de um *trimpot*, ou seja, um resistência ajustável. O valor de resistência definido no *trimpot* resulta em um valor de ganho definido pela figura 28.

De maneira similar, o ajuste da resistência de outro *trimpot* determina o *offset* de tensão (que pode variar de -10 a 10V) aplicado por um dos amplificadores operacionais do LM324. Outros dois amplificadores do LM324 são utilizados para isolar a tensão dos circuitos anteriores a eles. O esquema de ligação destes componentes foi descrito no modelo da figura 29 e passou por uma simulação antes de ser implementado.

Após a validação do circuito através de simulação, o projeto do PCB da placa foi gerado (figura 30). As trilhas de conexão da placa estão ilustradas na figura 31. Por fim, foi desenhado um guia para a parte superior da placa, de modo a orientar o usuário em relação ao posicionamento correto dos conectores, resultando na placa da figura 32.

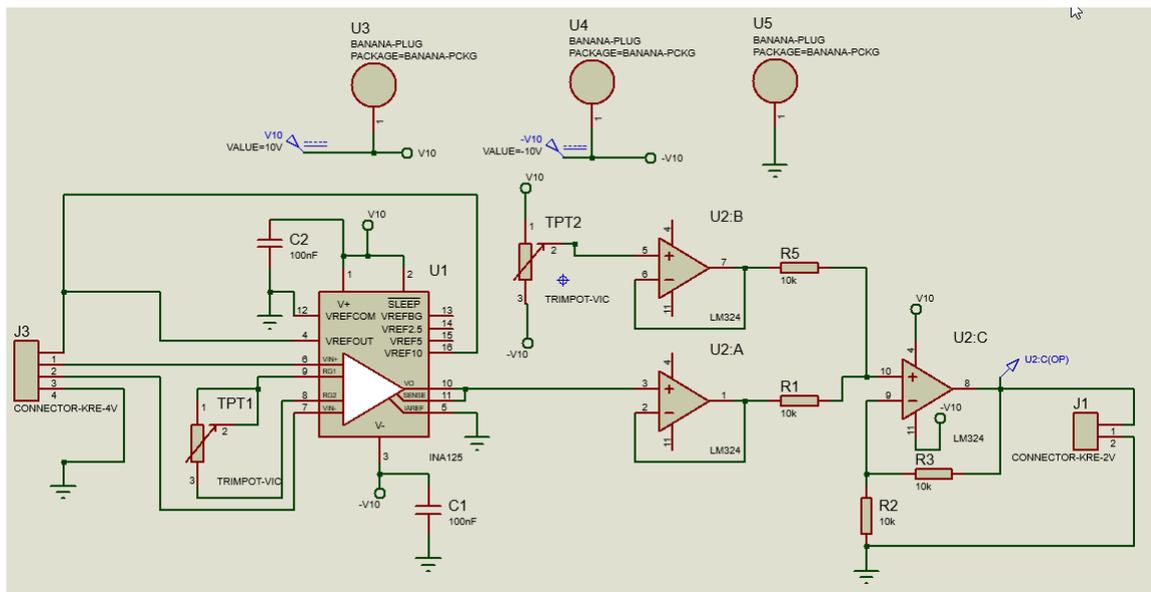
Figura 28 – Ganhos do amplificador de instrumentação (INA125) de acordo com resistência R_G , implementado no *trimpot* TP1

DESIRED GAIN (V/V)	R_G (Ω)	NEAREST 1% R_G VALUE (Ω)
4	NC	NC
5	60k	60.4k
10	10k	10k
20	3750	3740
50	1304	1300
100	625	619
200	306	309
500	121	121
1000	60	60.4
2000	30	30.1
10000	6	6.04

NC: No Connection.

Fonte: Burr-Brown (1997)

Figura 29 – Modelo para simulação do circuito implementado



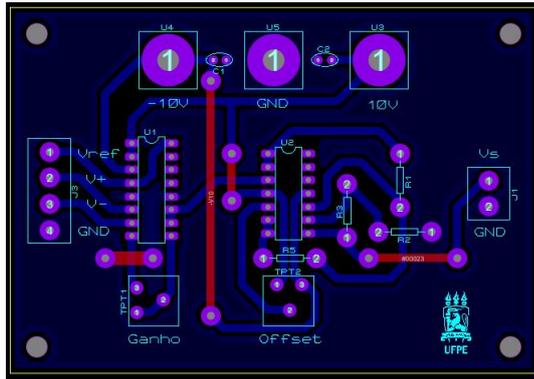
Fonte: A Autora (2022).

3.2.3 Calibração do Ganho e *Offset* da Placa de Aquisição

Para a correta utilização da placa de tratamento dos dados da célula de carga, é necessário fazer uma calibração inicial para ajustar os valores das resistências dos *trimpots*, garantindo assim uma combinação de ganho e *offset* que permitam que o Arduino realize boas leituras de tensão da célula.

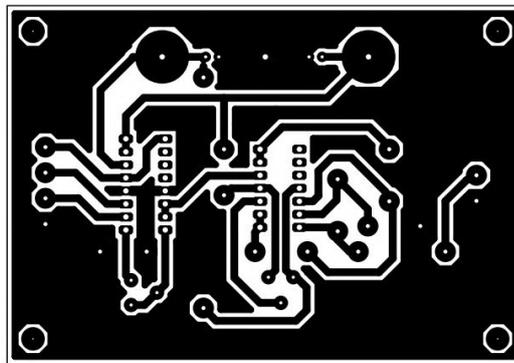
Para realizar este procedimento, a bancada já estava completamente construída e suas conexões elétricas já estavam ajustadas. O *jumper* que conectava a placa com o Arduino foi desconectado da extensão para garantir que o Arduino não seria danificado caso tensões maiores que 5V estivessem sendo retornadas. Para visualizar a tensão de

Figura 30 – PCB da placa



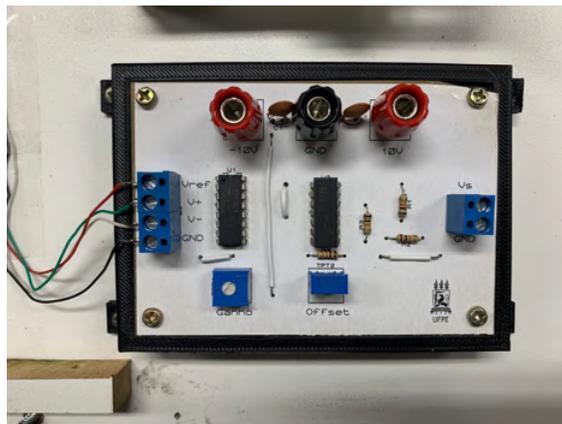
Fonte: A Autora (2022).

Figura 31 – Trilhas de conexão da placa



Fonte: A Autora (2022).

Figura 32 – Placa finalizada



Fonte: A Autora (2022).

saída da célula de carga, foi utilizado o osciloscópio DSO1012A da *Agilent Technologies* (figura 33). A estratégia utilizada para realizar este ajuste foi descrita nos tópicos abaixo.

3.2.3.1 Verificação do Aumento da Tensão da Célula

O primeiro passo para a calibração da placa é verificar se o aumento do empuxo do motor resulta no aumento ou na diminuição da tensão da célula de carga. Esta etapa é essencial para determinar se a maior leitura da tensão ocorre com o motor desligado ou com o motor em potência máxima.

Para esta checagem, foi aplicada uma carga na direção do empuxo do motor manualmente, verificando através do osciloscópio que a tensão diminuiu. Isto significa que para uma maior resolução da leitura da célula, o ideal seria que para o motor desligado, a tensão da célula lida pelo Arduino deveria ser algo em torno de 5V e para o motor em sua potência máxima, uma tensão próxima a 0V.

3.2.3.2 Ajuste do Ganho

Uma vez que com o motor desligado o sistema vai apresentar a maior leitura de tensão, deve-se prosseguir para o ajuste do ganho com o motor parado. Sabe-se que:

- As tensões da célula são sempre positivas;
- No passo seguinte de calibração da célula, poderá ser aplicado um *offset* de -10 a 10V;
- O delta de variação da tensão entre a leitura com o motor desligado e a leitura com o motor em potência máxima deve ser no máximo 5V.

Com base nessas informações, a resistência do *trimpot* foi ajustada até que se obtivesse uma tensão de cerca de 5,5V. O procedimento utilizado foi:

Figura 33 – Osciloscópio DSO1012A da *Agilent Technologies*®

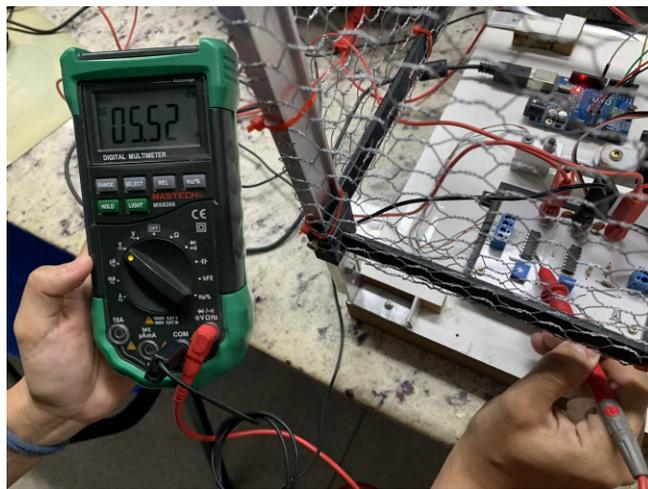


Fonte: A Autora (2022).

- Ajustar tensão de saída do INA125 para um valor em torno de 5 e 10V (esta faixa de valores é apenas um guia);
- Ligar o motor em sua potência máxima e verificar se a tensão cai menos do que 5V;
- Repetir o processo caso o delta máximo de 5V não fosse atingido.

A tensão de saída desta primeira etapa é verificada entre os pinos 10 e 11 do INA125 e pode ser observada na figura 34 através de um multímetro.

Figura 34 – Tensão em Volts entre os pinos 10 e 11 do CI INA125



Fonte: A Autora (2022).

3.2.3.3 Ajuste do *Offset*

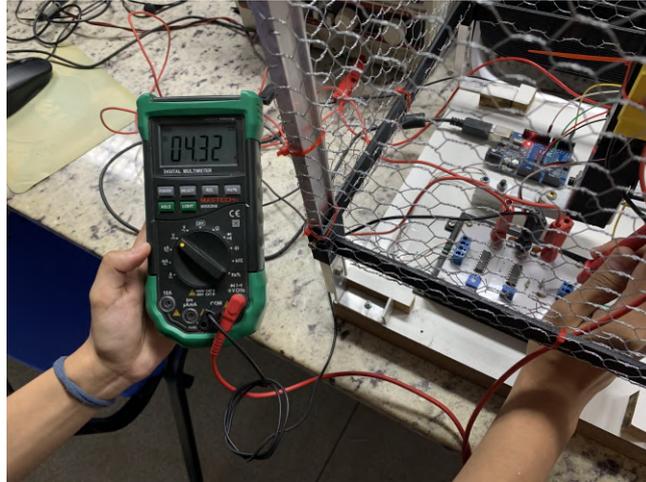
Para o ajuste do *offset*, bastava garantir que a tensão de saída da placa fosse menor do que 5V para proteger o Arduino. A resistência do *trimpot* foi alterada até que se obtivesse o valor de 4,3V, observado pelo multímetro (figura 35).

Por fim, os valores máximo e mínimo de tensão da célula considerando o motor desligado e em potência máxima foram capturados pelo osciloscópio e estão exibidos com a indicação *Vavg* nas figuras 36 e 37. Com estes valores, foi possível reconectar o *jumper* com a tensão de saída da placa da célula de carga na extensão e receber as leituras diretamente pelo Arduino.

3.3 ROTINA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

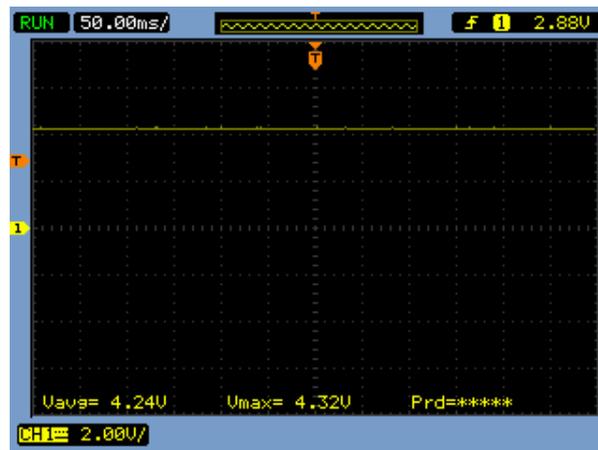
Antes de iniciar de fato os experimentos, optou-se por desenvolver um rotina de comandos para o motor que permitisse adquirir os dados desejados automaticamente. Por isso, foi desenvolvido um *script* no *Arduino IDE* implementando o *Modo de Aquisição de Dados Automático* no qual o comando enviado ao motor evoluía gradativamente ao mesmo

Figura 35 – Tensão de saída da placa em Volts



Fonte: A Autora (2022).

Figura 36 – Tensão máxima de saída da placa em Volts - motor desligado



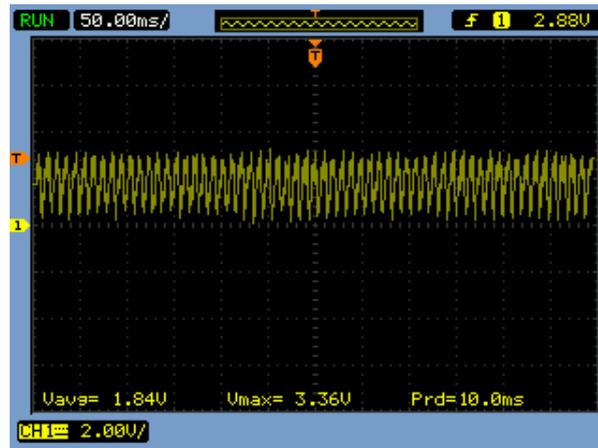
Fonte: A Autora (2022).

tempo em que as leituras de tensão da célula de carga e velocidade de rotação do motor eram contabilizadas.

O acionamento do motor foi feito utilizando a biblioteca *servo.h*, que enviava um valor de 0 a 180 representando uma largura do PWM. Verificou-se posteriormente que cada motor apresenta o seu próprio valor mínimo para acionamento. Todos os experimentos foram realizados do valor mínimo para acionamento do motor até o valor de PWM que gerava um consumo de corrente de 4A, limite determinado por questões de segurança. Ao término do processamento das leituras de RPM do motor e tensão da célula de carga em cada PWM, esses valores são impressos no monitor serial. O código completo utilizado para a realização dos experimentos encontra-se no apêndice B.

Visto que a faixa de PWM para cada motor elétrico testado é diferente, todos os gráficos deste trabalho foram plotados em função da porcentagem do PWM máximo utilizado nos experimentos, para padronizar a visualização dos dados.

Figura 37 – Tensão mínima de saída da placa em Volts - motor em potência máxima



Fonte: A Autora (2022).

3.3.1 Rotações do motor

A aquisição da velocidade de rotação do motor foi realizada a partir da função *GetSpeedRPM()*. Quando esta função é chamada, o contador de pulsos é zerado e então é acionado um atraso de 1 segundo. Ao longo deste 1 segundo, o contador de pulsos é incrementado pouco a pouco através da função *IncreaseCounter()* que é executada prioritariamente todas as vezes que o pino de interrupção identifica um sinal vindo do receptor de laser, o que significa que a hélice cruzou o laser. Duas interrupções seguidas configuram uma volta completa da hélice. Ao término deste segundo, são calculadas quantas voltas foram dadas baseado no número de pulsos e a velocidade era calculada.

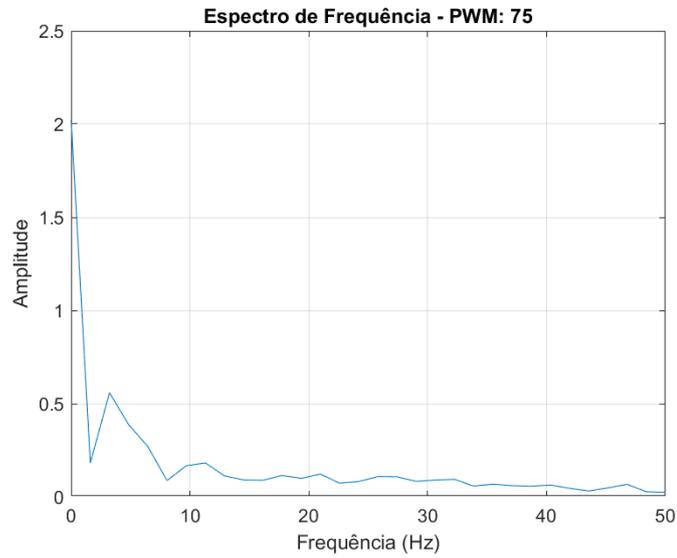
3.3.2 Processamento de dados da célula de carga

A partir de testes preliminares das leituras da célula de carga, foi verificado que a tensão apresentava bastante ruído, dificultando a identificação do valor físico correto. Do ponto de vista mecânico, este ruído já era esperado e é consequência tanto da vibração do motor quanto da turbulência inerente à força de sustentação gerada na hélice.

Para obter leituras confiáveis da célula de carga, decidiu-se então projetar um filtro que fosse capaz de rejeitar as bandas de frequência que não fossem de interesse. No caso da célula de carga, o seu sinal principal é uma tensão constante, portanto, apenas sinais de frequências muito baixas ou mesmo nula devem ser admitidos pelo filtro. Dessa forma, foi desenvolvido o projeto de um filtro passa-baixa.

Inicialmente, foi realizada uma verificação visual dos dados da célula a partir do osciloscópio. Ficou evidente que o aumento da potência do motor induzia ruídos mais severos. Com base nesta observação, o projeto do filtro teve como foco o espectro de frequência da maior potência do motor (considerando o limite de 4A de consumo de corrente elétrica), apresentado na figura 38. A frequência de corte foi determinada como 2Hz, o

Figura 38 – Espectro de frequência da leitura das tensões da célula de carga com motor em potência máxima

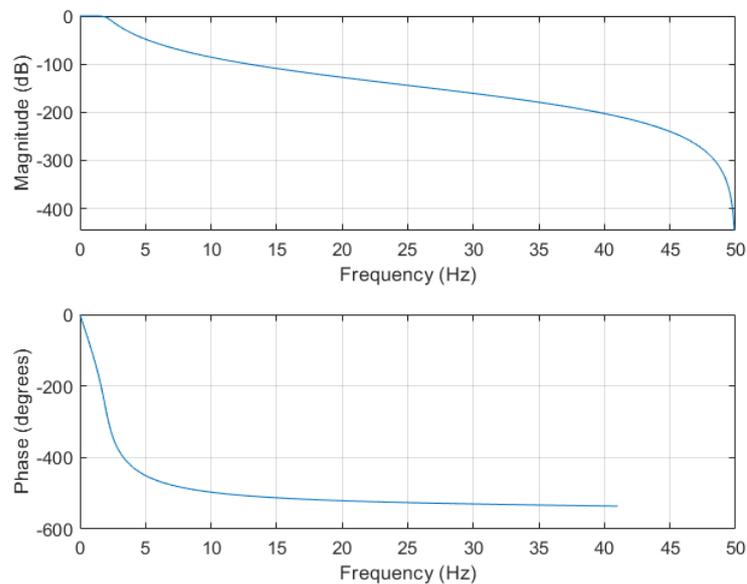


Fonte: A Autora (2022).

que significa que todos os sinais com frequências maiores do que isso seriam atenuados e rejeitados.

O filtro projetado foi o de Butterworth com comprimento 6 para uma frequência de amostragem de 100Hz, seu diagrama segue na figura 39. Sua implementação no Arduino foi feita a partir da função *FilterSignal()*, que garantia a coleta de dados na frequência de amostragem escolhida e aplicava a equação de diferenças do filtro para calcular o sinal filtrado.

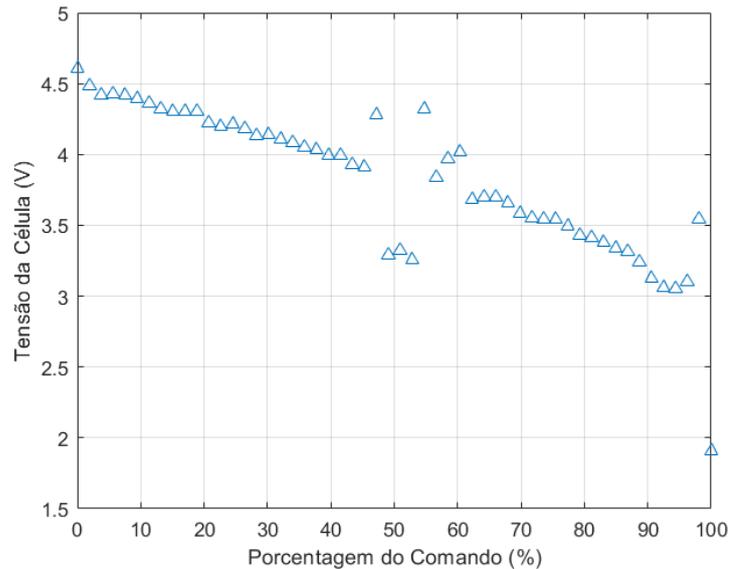
Figura 39 – Diagrama de Bode do filtro projetado



Fonte: A Autora (2022).

A princípio, o filtro apresentou uma boa resposta em relação à atenuação do ruído, mas durante os experimentos automatizados, foi notado que alguns *outliers* ocorriam para valores em torno 45% e 55% e também próximo a 100% do comando máximo. Dependendo do motor ensaiado, essas porcentagens se alteravam ligeiramente, mas estavam sempre próximas a 50% e 100% do comando máximo, como ilustrado na figura 40.

Figura 40 – Experimento indicando falha do filtro entre 45% e 55% para o GMP 2



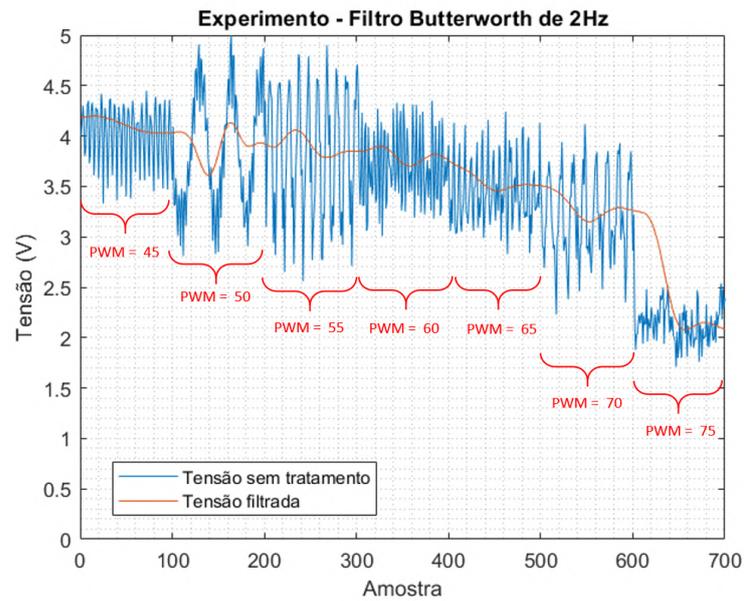
Fonte: A Autora (2022).

Dessa forma, para investigar melhor esse fenômeno, foram plotados espectros de frequência para diversos valores de PWM do motor (apêndice D), buscando identificar um padrão entre essas ocorrências. Observando o espectro de frequência dos PWMs de 60% e 100% do comando máximo no apêndice D (equivalente aos PWMs 55 e 75), é possível notar o surgimento de um sinal de frequência muito próxima a 3Hz, o que pode comprometer a eficácia do filtro, mas essas ocorrências existiam em outras faixas de PWM e não chegaram a causar a mesma falha no filtro.

Para finalizar a análise, foram plotados os sinais de entrada da célula e os sinais filtrados em cada um dos PWM analisados no apêndice C. Verificou-se que durante os intervalos de PWMs de 52% a 62% (PWMs 50 e 55 na figura 41) e também de 98% a 100% (PWM 75 na figura 41) do comando total, o ruído da célula de carga apresentava um padrão de batimento, indicando a proximidade de duas frequências de vibração. A hipótese levantada foi de que a vibração induzida pelo motor se aproximou de alguma das frequências naturais da estrutura nesses PWMs, dificultando a atuação do filtro devido a uma leve ressonância estrutural.

Para melhorar a qualidade dos dados nesses pontos, um filtro de média móvel foi projetado para atuar nessas regiões. Foram realizados testes com médias móveis de 50 amostras e 100 amostras, mas verificou-se que este ajuste precisaria ser manual para

Figura 41 – Experimento indicando batimentos em PWM 50 e 75

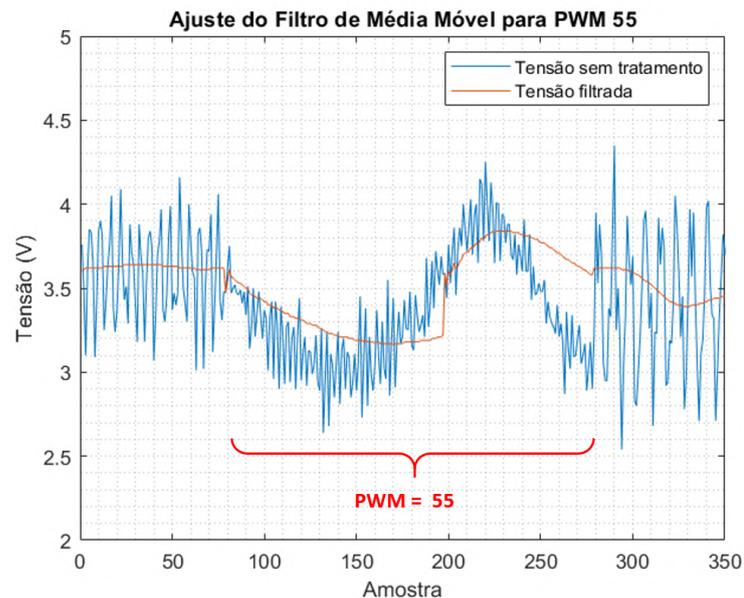


Fonte: A Autora (2022).

garantir que a média móvel sempre captasse um número de pontos que se aproximasse da duração completa de uma onda do batimento.

Finalmente, este filtro foi implementado no Arduino, sendo programado para ocorrer sempre entre 98% e 100% do comando máximo nos GMPs 1 e 2, mas também no intervalo entre 50% e 65% do comando total para o GMP 2. Para cada PWM, o número de pontos foi ajustado manualmente. A figura 42 ilustra o ajuste realizado para o filtro de média móvel no PWM de 52% do comando total.

Figura 42 – Ajuste do filtro de Média móvel para PWM de 52% do comando total



Fonte: A Autora (2022).

3.3.3 Calibração da Célula de Carga

A calibração da célula de carga consiste no processo de relacionar as leituras de tensão que da célula com valores de massa propriamente dita. Apenas com esta relação será possível de fato contabilizar o empuxo gerado pelo motor a cada comando enviado para o Arduino.

Para realizar este processo, a plataforma de teste deve ser posicionada sobre uma balança e o motor deve ser acionado em diferentes potências. Com a geração de empuxo do grupo motopropulsor, a leitura da balança ficará cada vez menor e será possível relacionar a massa do conjunto com a leitura da célula de carga.

Contudo, durante os primeiros testes com a plataforma de teste original, observou-se que a base da bancada desenvolvida gerava muito arrasto quando em contato com o escoamento induzido pela hélice, comprometendo de forma relevante a leitura da balança.

Para contornar este problema, foi desenvolvida uma base menor em PLA com espaço para alocação de sobras de lastros de alumínio que garantiriam para o conjunto a massa mínima necessária para o experimento.

A base menor também contribuiu para mais estabilidade na leitura da balança dado que tinha menos contato com o escoamento induzido pela hélice. O experimento para calibração da célula é independente do motor utilizado, mas buscando uma maior confiabilidade dos dados, ele foi realizado duas vezes com motores diferentes (figuras 43 e 44). A balança utilizada no experimento foi a BS3000A e as especificações dos grupos motopropulsores encontra-se na tabela 3. O procedimento utilizado para cada um dos motores foi o seguinte:

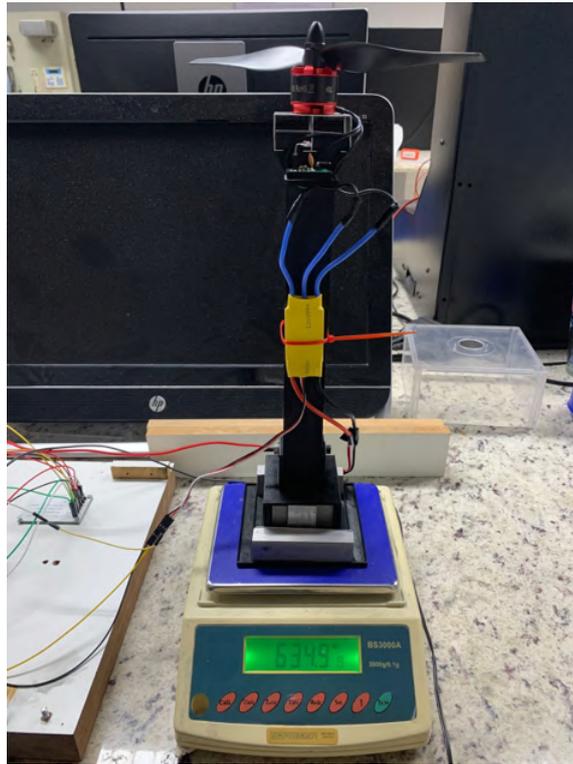
- Realizar experimento no *Modo de Aquisição de Dados Automática* na bancada original para coletar dados de PWM enviado para o motor, RPM do motor e leituras da célula de carga;
- Realizar experimento no *Modo de Aquisição de Dados Automática* apenas para coletar variações de massa da balança;
- Relacionar os valores de massa obtidos pelo experimento na balança com a leituras da célula de carga na bancada original.

Tabela 3 – Especificações dos grupos motopropulsores utilizados para a calibração

Componentes	Grupo motopropulsor 1	Grupo motopropulsor 2
Hélice	8045 - Anti Horário	8045 - Horário
Motor	BR2212 <i>Brushless</i> 920kV AH	BR2212 <i>Brushless</i> 920kV H
ESC	30 A	30 A

Fonte: A Autora (2022).

Figura 43 – Massa inicial do experimento com o motor 1

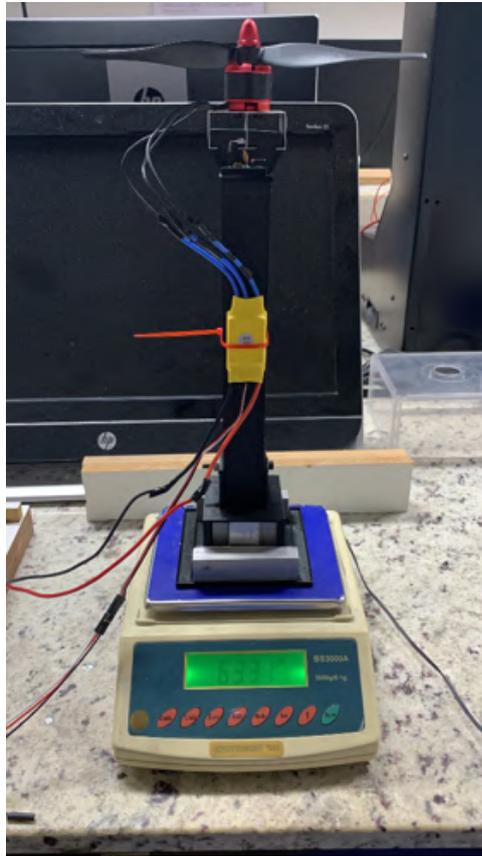


Fonte: A Autora (2022).

As curvas obtidas com os dois motores foram plotadas e seguem descritas na figura 45. Por questões de segurança da base impressa, não foi possível atingir os 100% de potência do motor. É possível observar que para dois motores distintos a curva de calibração da célula de carga foi a mesma como esperado.

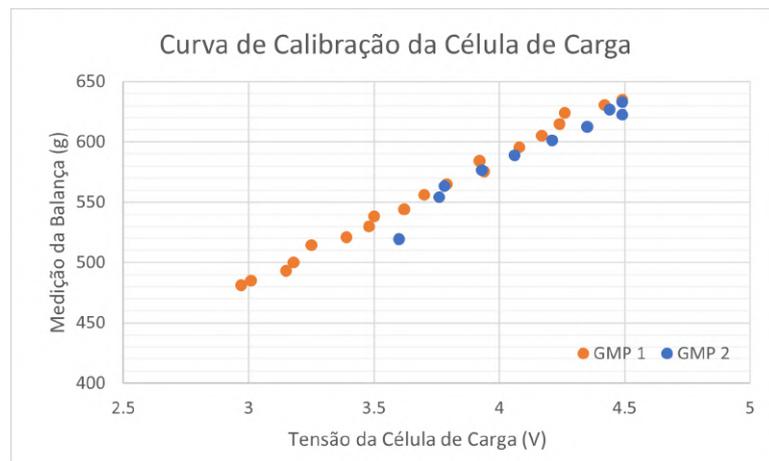
Algumas flutuações foram observadas, mas isso se deve prioritariamente ao comportamento do filtro de dados da célula de carga. Uma vez que as curvas apresentaram um comportamento bem linear, foi realizada uma regressão linear desses dados para ser utilizada nos demais experimentos.

Figura 44 – Massa inicial do experimento com o motor 2



Fonte: A Autora (2022).

Figura 45 – Curva de calibração da célula de carga



Fonte: A Autora (2022).

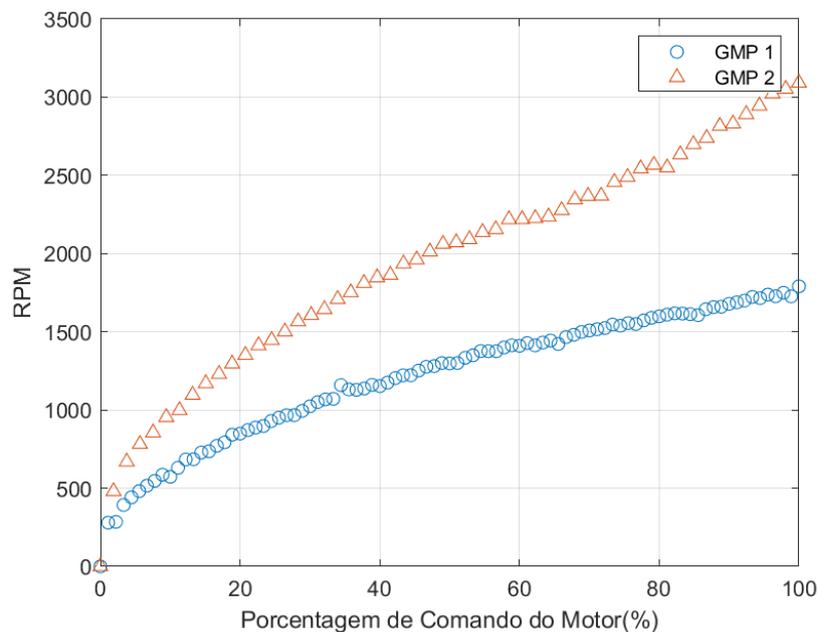
4 RESULTADOS

Além dos experimentos realizados para calibração, novos experimentos foram realizados para a obtenção das relações comando-velocidade, velocidade-empuxo e comando-empuxo dos GMP descritos na tabela 3. Adicionalmente, para fazer a comparação com as curvas de Dias (2021), foi necessário coletar as correntes consumidas para cada um dos comandos enviados ao motor.

4.1 RELAÇÃO COMANDO-VELOCIDADE

A relação entre comando enviado ao motor elétrico e o RPM atingido pela hélice encontra-se descrita na figura 46. A porcentagem do comando enviado ao motor se refere à faixa de PWM iniciando no valor mínimo no qual o motor é acionado até o valor máximo em que a corrente fornecida pela fonte de alimentação é de 4A. É possível observar que esta relação é fortemente dependente dos componentes elétricos utilizados no GMP, uma vez que a similaridade geométrica entre as hélices não deve caracterizar uma diferença expressiva na carga de eixo do motor.

Figura 46 – Relação entre comando enviado ao motor e velocidade de rotação atingida pela hélice



Fonte: A Autora (2022).

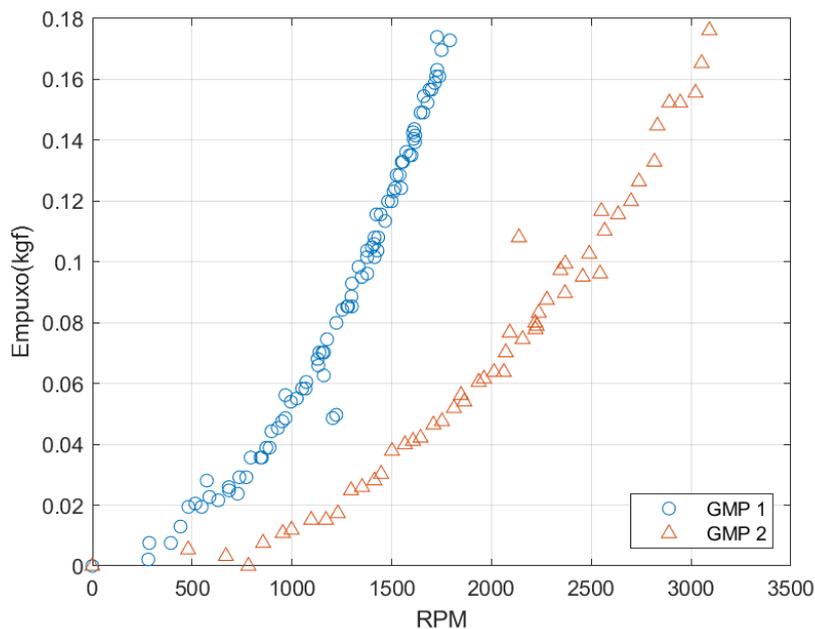
É possível verificar que as leituras de velocidade apresentaram bastante consistência, uma vez que há poucos *outliers* nas curvas, todos referentes ao GMP 1. Foi observado visualmente durante os experimentos que algumas potências de motor geram vibrações que se aproximam de frequências naturais da estrutura, o que acarreta em um aumento

temporário da amplitude do deslocamento da haste do motor. Apesar de extremamente breve, este fenômeno foi atribuído como o causador da ocorrência dos *outliers*, uma vez que pode impactar no alinhamento entre o emissor e receptor de laser.

4.2 RELAÇÃO VELOCIDADE-EMPUXO

As curvas que relacionam a velocidade de rotação dos motores com os empuxos gerados pelo GMP seguem exibidas na figura 47. Para esta relação, é possível observar oscilações mais expressivas do que em relação às curvas de comando-velocidade, uma vez que as medições da célula de carga sofrem muito mais influência da vibração da estrutura. De qualquer modo, a aplicação dos filtros combinados se mostrou eficaz uma vez que é possível identificar claramente um padrão polinomial para ambos os GMP. De um ponto de vista aerodinâmico, esta curva caracteriza o comportamento da hélice e só precisa ser realizada uma vez.

Figura 47 – Relação entre velocidade atingida pela hélice e empuxo gerado pelo GMP

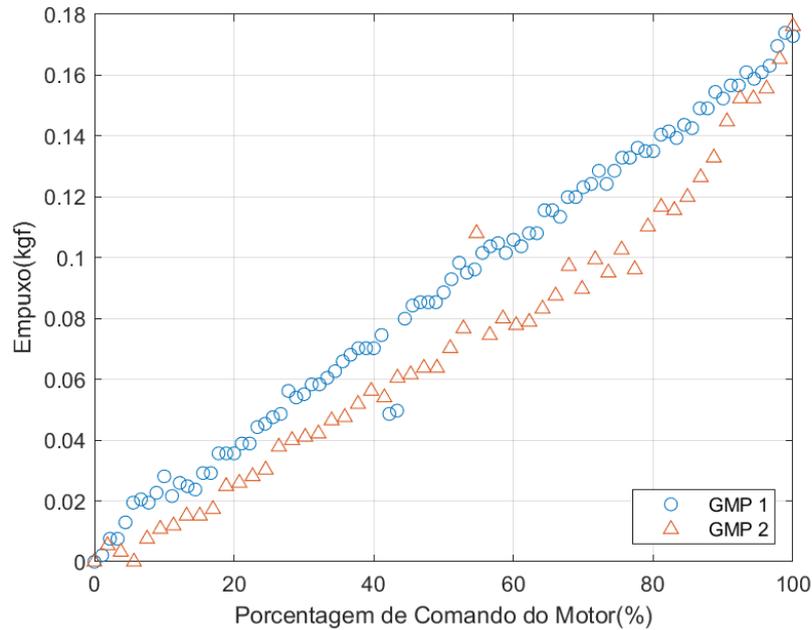


Fonte: A Autora (2022).

4.3 RELAÇÃO COMANDO-EMPUXO

As relações comando-empuxo para ambos os GMP estão apresentadas na figura 48. As curvas apresentaram um comportamento aproximadamente linear considerando a porcentagem de comando, mas caso fossem utilizados valores e PWM que são diretamente enviados ao motor, seria observada uma diferença relevante.

Figura 48 – Relação entre comando enviado ao motor e empuxo gerado pelo GMP

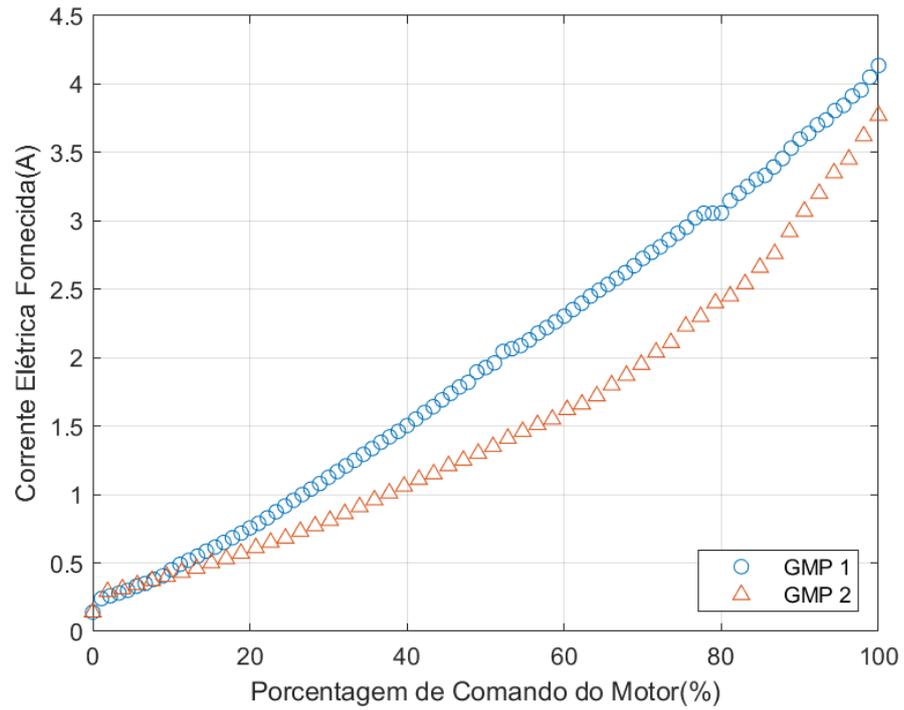


Fonte: A Autora (2022).

4.4 CURVAS DE CORRENTE ELÉTRICA FORNECIDA AO MOTOR

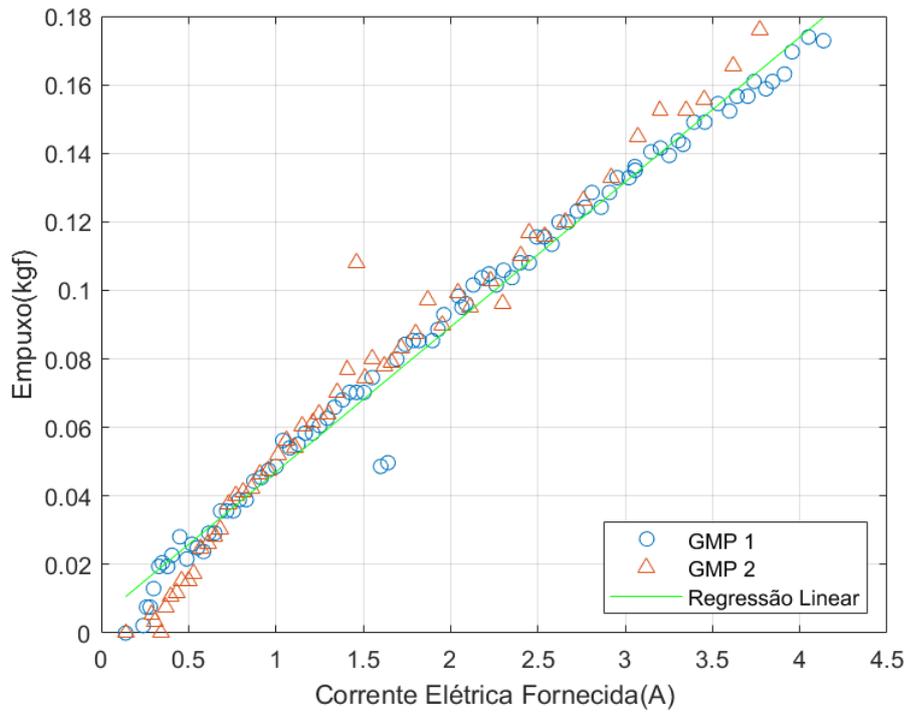
Para verificar a validade da hipótese assumida por Dias (2021) de que a corrente fornecida ao motor se relacionaria de maneira linear com a empuxo gerado pelo GMP, foram obtidos os valores de corrente fornecida por meio de inspeção visual. O valor da corrente fornecida ao GMP foi observado diretamente da fonte de alimentação utilizada durante dez segundos e os cinco valores predominantes neste período foram utilizados para calcular uma média. O memorial de cálculo deste processo para o GMP 1 e 2 encontram-se nos apêndices D e E. No caso das curvas de corrente elétrica fornecida e comando enviado ao motor (figura 49), é possível observar mais uma vez uma grande dependência dos componentes elétricos do GMP. Além disso, os experimentos permitiram verificar que a relação entre a corrente consumida e empuxo gerado apresenta tendência linear em grande parte de sua extensão, como pode ser observado na figura 50. Desse modo, concluiu-se que na ausência de análises com a bancada desenvolvida neste trabalho, a hipótese de Dias (2021) é uma aproximação adequada.

Figura 49 – Relação entre comando enviado ao motor e corrente elétrica fornecida pela fonte de alimentação



Fonte: A Autora (2022).

Figura 50 – Relação entre corrente fornecida e empuxo gerado



Fonte: A Autora (2022).

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi apresentado o projeto e a fabricação de uma bancada para aferição de tração de GMP de pequeno porte. Este tipo de GMP pode ser utilizado sobretudo em VANTs de asas fixas ou rotativas, nos quais a modulação da propulsão é imprescindível para o seu controle e a correta identificação das características propulsivas da aeronave permite a verificação de seus limites operacionais em termos estruturais, aerodinâmicos e de performance, sendo indispensável por exemplo para determinar o peso máximo de decolagem.

O conceito vertical para o desenvolvimento desta bancada induz à ocorrência do *efeito solo* nas hélices, um fenômeno aerodinâmico que impulsiona a geração de tração por GMP na proximidade de superfícies horizontais, no entanto, uma vez que existem diversas referências disponíveis para a contabilização deste efeito, como apresentado na seção 3, optou-se por prosseguir com este modelo o que tornou a modelagem mecânica do projeto mais simples e rápida.

A versatilidade de ensaiar diferentes motores na mesma bancada foi planejada para maximizar o potencial didático da bancada, permitindo que os alunos possam utilizar a bancada para realizar a identificação dos GMP para seus diversos projetos, desde que se encaixem no limite máximo de 1 kgf de empuxo e 11 polegadas de diâmetro.

O processamento dos dados obtidos pela bancada se apresentou como um desafio, visto que as leituras realizadas sobretudo pela célula de carga têm forte influência do comportamento vibracional do motor, combinado à natureza turbulenta da força de sustentação gerada na hélice. A partir de uma frequência de amostragem de 100Hz, observou-se que os ruídos do sinal da célula de carga ocorriam em frequências muito próximas do sinal contínuo de interesse para a aquisição de dados, desafiando a eficácia dos filtros digitais implementados.

Para contornar este problema, foram aplicados dois filtros combinados, sendo um deles de média móvel. Apesar de sua eficácia ter sido comprovada, sua implementação foi bastante trabalhosa, dado que o número de amostras a ser coletadas pelo filtro deveria ser cuidadosamente ajustado com a frequência do ruído a ser eliminado.

Ao término deste trabalho, foi possível obter as relações de comando-velocidade, velocidade-empuxo e comando-empuxo para cada um dos GMP testados. Verificou-se também que a hipóteses de linearidade entre a corrente elétrica fornecida ao GMP e o empuxo gerado não se aplica e pode resultar em perdas de eficácia das ações de controle caso seja utilizada para projetar controladores para drones, por exemplo. Todos os objetivos propostos foram atingidos, no entanto, existe espaço para diversas melhorias em trabalhos futuros.

O primeiro ponto de melhoria seria a investigação experimental da influência do

efeito solo no GMP ensaiado. Isto pode ser atingido realizando experimentos com hastes de diferentes alturas ou mesmo com uma haste fixa cujo comprimento seja variável. O segundo ponto de melhoria seria a realização de um estudo detalhado das frequências naturais da estrutura, o que permitira identificar com mais facilidade comportamentos vibracionais do GMP com potencial para causar ressonância estrutural, o que dificulta de forma relevante a implementação de filtros digitais.

REFERÊNCIAS

- 3DLAB. **Manufatura Aditiva: saiba o que é e o que ela representa**. 2019. Disponível em: <<https://www.3dlab.com.br/o-que-e-manufatura-aditiva/>>. Acesso em: 25/01/2022. Citado na página 28.
- AUTOMATION, A. for A. **What is a Brushless DC Motor and How Does It Work?** 2022. Disponível em: <<https://www.automate.org/blogs/what-is-a-brushless-dc-motor-and-how-does-it-work>>. Acesso em: 08/03/2022. Citado na página 21.
- BALANÇAS, L. **Célula de Carga PL capacidade 50kg a 150kg**. 2022. Disponível em: <<https://www.liderbalancas.com.br/produtos/celula-de-carga-pl/>>. Acesso em: 10/01/2022. Citado na página 24.
- BRESCIANI, T. Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter. **MSc theses**, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 7, 18, 19 e 20.
- BURR-BROWN. **Instrumentation Amplifier With Precision Voltage Reference - INA125**. [S.l.], 1997. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- CESTARI, F. C.; SOARES, R. d. S. **Desenvolvimento de bancada automatizada para ensaios mecânicos não destrutíveis do grupo motopropulsor de aeronaves rádio controladas**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade de Taubaté, 2019. Citado na página 29.
- CHEESEMAN, I. Helicopter theory. w. johnson. princeton university press. 1980. 1090 pp. illustrated. £ 52.90. **The Aeronautical Journal**, Cambridge University Press, v. 85, n. 842, p. 123–123, 1981. Citado na página 30.
- CHOI, S.-C. et al. Enabling drone as a service: Onem2m-based uav/drone management system. In: IEEE. **2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)**. [S.l.], 2017. p. 18–20. Citado na página 14.
- COUTINHO, V. G. **Construção de uma bancada para aferição do empuxo de motores glow e estudo da influência da adição de nitrometano ao combustível**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021. Citado na página 29.
- CREALITY. **Creality Ender-3**. 2021. Disponível em: <<https://www.creality.com/br/goods-detail/ender-3-3d-printer>>. Acesso em: 10/01/2022. Citado na página 28.
- DELAIR. **Delair UX11 Line**. 2020. Disponível em: <<https://delair.aero/delair-commercial-drones/#overflowvisible>>. Acesso em: 10/01/2022. Citado na página 17.
- DIAS, J. d. N. S. A. **Construção de Plataforma de Teste para Algoritmo de Controle de Drones**. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal de Pernambuco, 2021. Citado 9 vezes nas páginas 5, 6, 14, 15, 16, 17, 32, 51 e 53.
- DJI. **PHANTOM 4 PRO V2.0**. 2022. Disponível em: <<https://www.dji.com/br/phantom-4-pro-v2>>. Acesso em: 10/01/2022. Citado na página 17.

HOOFT, . N. P. W. G. 't. **Quotable Quote**. 2023. Disponível em: <<https://www.goodreads.com/quotes/10154046-a-man-who-knows-everything-this-reportedly-was-my-reply>>. Acesso em: 25/09/2023. Citado na página 4.

LEICHTWEIS, A. C. D. **Desenvolvimento de uma Bancada para Testes de um Motor de Pistão Tipo *Glow***. Dissertação (B.S. thesis) — Faculdade Horizontina, 2016. Citado na página 29.

LOVIZON, A. **Projeto, construção e verificação de um dinamômetro para o grupo motopropulsor de aeronaves do aerodesign**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade de Caxias do Sul, 2019. Citado na página 29.

MADRUGA, S. P. et al. Projeto de sistema de controle embarcado para controle de voo de quadricópteros. Universidade Federal da Paraíba, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

MATUS-VARGAS, A.; RODRIGUEZ-GOMEZ, G.; MARTINEZ-CARRANZA, J. Ground effect on rotorcraft unmanned aerial vehicles: a review. **Intelligent Service Robotics**, Springer, p. 1–20, 2021. Citado na página 30.

MURILO, F. **Sistemas Analógicos e Digitais**. 2019. Disponível em: <<https://www.muriloleal.com.br/>>. Acesso em: 25/01/2022. Citado na página 24.

NASA. **Propeller Propulsion**. 2021. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/propeller.html>>. Acesso em: 08/03/2022. Citado na página 21.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica: Eletromagnetismo (vol. 3)**. [S.l.]: Editora Blucher, 2015. v. 3. Citado na página 25.

OGATA, K. **Discrete-time control systems**. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc., 1995. Citado na página 23.

PHILLIPS SEMICONDUCTORS. **Low power quad op amps - LM124/224/324/324A/SA534/LM2902**. [S.l.], 1995. Citado na página 38.

POWERS, C. et al. Influence of aerodynamics and proximity effects in quadrotor flight. In: SPRINGER. **Experimental robotics**. [S.l.], 2013. p. 289–302. Citado na página 30.

PROPELLERS, A. **High Performance Propeller Systems**. 2022. Disponível em: <<https://www.propellor.com/>>. Acesso em: 10/01/2022. Citado na página 21.

ROBÓTICA, A. C. **Strain Gauge - Extensômetro de Resistência Elétrica**. 2022. Disponível em: <<https://www.autocorerobotica.com.br/strain-gauge-extensometro-de-resistencia-eletrica>>. Acesso em: 25/01/2022. Citado na página 25.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da engenharia aeronáutica**. [S.l.]: Cengage learning, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 14, 20 e 22.

SÁ, R. C. Construção, modelagem dinâmica e controle pid para estabilidade de um veículo aéreo não tripulado do tipo quadrirotor. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

SILVA, F. L. F. da. Comissionamento e estudo dos materiais pla e abs processado através da manufatura aditiva. Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, 2019. Citado na página 32.

TANNER, P. E. et al. Experimental investigation of rotorcraft outwash in ground effect. In: **Proceedings of the 71th Annual Forum of the American Helicopter Society**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–26. Citado na página 30.

TEAM, A. **An Arduino-based rocket motor thrust test stand**. 2018. Disponível em: <<https://blog.arduino.cc/2018/12/17/an-arduino-based-rocket-motor-thrust-test-stand/>>. Acesso em: 22/01/2022. Citado na página 29.

TEAM, A. **What is Arduino?** 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 29/01/2022. Citado na página 26.

TEAM, A. **Arduino Uno R3**. 2022. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>>. Acesso em: 01/02/2022. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

WELDLING, M. **Sensores**. 2010. Disponível em: <<https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em: 08/03/2022. Citado na página 22.

WIKIPÉDIA. **Ponte de *Wheatstone***. 2018. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_de_Wheatstone>. Acesso em: 31/01/2022. Citado na página 25.

YAMAMOTO, N.; UCHIDA, N. Improvement of image processing for a collaborative security flight control system with multiple drones. In: IEEE. **2018 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)**. [S.l.], 2018. p. 199–202. Citado na página 14.

APÊNDICE A – TABELA DE CUSTOS DE FABRICAÇÃO DA BANCADA

Tabela A.1 – Tabela de principais custos de fabricação da bancada (valores aproximados).

Componentes	Preço (R\$)
Base	30,00
<i>Arduino Uno</i>	90,00
Célula de carga	30,00
Emissor de laser	9,00
Receptor de laser	16,00
Peças em PLA (preenchimento de 25%)	20,00
Placa para aquisição de dados da célula de carga	85,00
Custo total aproximado	280,00

Fonte: Autora.

Tabela A.2 – Descrição dos componentes e custos da placa de aquisição dos dados da célula de carga (valores aproximados).

Componentes	Quantidade	Preço Total (R\$)
INA145	1	50,00
LM324	1	3,00
Borne KRE (2 vias)	3	9,00
Plug "banana"	3	8,00
Resistores	4	1,00
Capacitores	2	1,00
Placa de circuito impresso	1	5,00
<i>Trimpot</i>	2	8,00
Custo total aproximado		85,00

Fonte: Autora.

APÊNDICE B – ROTINA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

```

1  #define motor_pin 9 // Pino 9 utilizado para controle do motor
2  #define interrupt_pin 2 // Pino 2 utilizado para receptor do
   laser
3  #include <Servo.h> // Adiciona biblioteca Servo.h
4  Servo ServoMotor; // Declara objeto ServoMotor da classe Servo
5
6  // ----- DECLARACAO DE VARIAVEIS ----- //
7  volatile int power = 20;
8  volatile int pulse_counter = 0;
9  float speed_rpm = 0;
10 float cell_voltage = 0;
11 bool automatic = false;
12 float fs = 100;
13 float T = 1/fs;
14 long current_time_micros = 0,
15 long delta_time = 0;
16 int k;
17 int initial_pwm = 23;
18 int max_pwm = 75;
19 // ----- //
20
21 //----- PARAMETROS DO FILTRO DIGITAL -----/
22 float b[] = {0.00000080423564219334, 0.00000402117821096670,
   0.00000804235642193341, 0.00000804235642193341,
   0.00000402117821096670, 0.00000080423564219334};
23 float a[] = {1.0000000000000000, -4.593421399807689,
   8.455115223510134, -7.794918318044449, 3.598902768053915,
   -0.665652538171362};
24 const int order_filter = 5;
25 volatile float y_k[order_filter+1];
26 volatile float x_k[order_filter+1];
27 float input_signal = 0,
28 filtered_signal = 0;
29 int number_samples = 100;
30 // ----- //
31
32
33 void setup()

```

```

34 {
35   Serial.begin(115200); // Baud rate da comunicaco serial
36   pinMode(interrupt_pin, INPUT_PULLUP); // Define pino 2 como
      entrada digital com resistor de pull up por hardware (evita
      ruído no receptor do laser)
37   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interrupt_pin),
      IncreaseCounter, RISING); // Ativa interrupcao no pino 2 a
      cada borda de subida do sinal do receptor
38   ServoMotor.attach(motor_pin); // Inicializa o objeto ServoMotor
      ligado ao pino 9
39
40   Serial.println("Aguardando 5 segundos...");
41   delay(5000); // Aguardando setup do objeto ServoMotor
42
43   Serial.println("Inicio do programa!");
44   ServoMotor.write(power);
45   current_time_micros = micros();
46 }
47
48 void loop()
49 {
50
51   if (automatic == true)
52   {
53     Serial.println("// ----- MODO AQUISICAO AUTOMATICA DE DADOS
      ----- //");
54
55     for(power = initial_pwm-1; power <= max_pwm; power++)
56     {
57       //----- ACIONAMENTO DO MOTOR -----//
58       ServoMotor.write(power); // Envia comando ao motor
59       delay(2000);
60       //-----//
61
62       //----- VELOCIDADE DE ROTACAO -----//
63       for(int i = 0; i <= 5; i++)
64       {
65         speed_rpm += GetSpeedRPM();
66       }
67       speed_rpm = (speed_rpm/5);
68       //-----//
69

```

```

70 //----- TENSAO DA CELULA DE CARGA -----//
71 current_time_micros = micros();
72 k = 0;
73 while(k < 200)
74     {
75         delta_time = micros()-current_time_micros;
76         if(delta_time >= T*1000000)
77             {
78                 current_time_micros = micros();
79                 input_signal = analogRead(A0)*0.004887585;
80                 /*
81                 if (power == 129){
82                     number_samples = 150;
83                     filtered_signal = MovingAverageFilter(
84                         input_signal);
85                 }
86                 else if(power == 130){
87                     number_samples = 150;
88                     filtered_signal = MovingAverageFilter(
89                         input_signal);
90                 }
91                 else{
92                     filtered_signal = FilterSignal(input_signal);
93                 }
94                 */
95                 if (power == 50 ){
96                     number_samples = 120;
97                     filtered_signal = MovingAverageFilter(
98                         input_signal);
99                 }
100
101                 else if(power == 51){
102                     number_samples = 120;
103                     filtered_signal = MovingAverageFilter(
104                         input_signal);
105                 }
106                 else if(power == 74){
107                     number_samples = 130;

```

```

108         filtered_signal = MovingAverageFilter(
109             input_signal);
110     }
111     else if(power == 75){
112         number_samples = 110;
113         filtered_signal = MovingAverageFilter(
114             input_signal);
115     }
116     else{
117         filtered_signal = FilterSignal(input_signal);
118     }
119
120     k++;
121 }
122 }
123 //-----//
124
125 //----- EXIBIR VALORES CALCULADOS -----//
126 Serial.print(power);
127 Serial.print(","); // Delimitador
128
129 Serial.print(speed_rpm);
130 Serial.print(","); // Delimitador
131
132 Serial.println(filtered_signal);
133 //-----//
134
135 }
136
137 automatic = false;
138 power = 0;
139
140 }
141
142 else
143 {
144     if (Serial.available() > 0)
145     {
146         power = Serial.parseInt(); // Recebe valor inserido pelo
147             usuario na Serial (inteiro variando entre 50 - 130)

```

```

147
148     if (power == 15) // Este valor de comando aciona a
        automacao de aquisicao de dados!
149         {
150             automatic = true;
151         }
152
153     else
154     {
155         ServoMotor.write(power); // Envia comando ao motor
156
157         //----- VELOCIDADE DE ROTACAO -----//
158         for(int i = 0; i <= 5; i++)
159             {
160                 speed_rpm += GetSpeedRPM();
161             }
162
163         speed_rpm = (speed_rpm/5);
164         //-----//
165
166         current_time_micros = micros();
167         k = 0;
168         while(k < 200)
169         {
170             delta_time = micros()-current_time_micros;
171             if(delta_time >= T*1000000)
172             {
173                 current_time_micros = micros();
174                 input_signal = analogRead(A0)*0.004887585;
175                 //filtered_signal = MovingAverageFilter(
176                     input_signal);
177                 /*
178                 if (power == 129){
179                     number_samples = 150;
180                     filtered_signal = MovingAverageFilter(
181                         input_signal);
182                 }
183
184                 else if(power == 130){
185                     number_samples = 150;
186                     filtered_signal = MovingAverageFilter(
187                         input_signal);

```

```
185         }
186
187     else{
188         filtered_signal = FilterSignal(input_signal);
189     }
190
191     /*
192     if (power == 50 ){
193         number_samples = 120;
194         filtered_signal = MovingAverageFilter(
195             input_signal);
196     }
197
198     else if(power == 51){
199         number_samples = 120;
200         filtered_signal = MovingAverageFilter(
201             input_signal);
202     }
203
204     else if(power == 74){
205         number_samples = 130;
206         filtered_signal = MovingAverageFilter(
207             input_signal);
208     }
209
210     else if(power == 75){
211         number_samples = 110;
212         filtered_signal = MovingAverageFilter(
213             input_signal);
214     }
215
216     else{
217         filtered_signal = FilterSignal(input_signal);
218     }
219
220     Serial.print(",");
221     Serial.print(input_signal);
222     Serial.print(",");
223     Serial.println(filtered_signal);
224     k++;
225 }
```

```
223         }
224
225         ClearSerial(); // Limpar o canal do Serial
226     }
227
228     }
229 }
230 ServoMotor.write(power);
231 }
232
233 void ClearSerial(){
234     char any;
235     while(Serial.available()>0)
236     {
237         any = Serial.read();
238     }
239 }
240
241 void IncreaseCounter()
242 {
243     pulse_counter++;
244 }
245
246 float GetSpeedRPM ()
247 {
248     float current_speed = 0;
249     pulse_counter = 0;
250     delay(1000);
251     current_speed = pulse_counter*15;
252     return(current_speed);
253 }
254
255 float GetLoadCellVoltage ()
256 {
257     float cell = 0;
258     int samples = 100;
259
260     for (int i = 0; i < samples; i++)
261     {
262         cell += analogRead(A0)*0.004888;
263     }
264
```

```

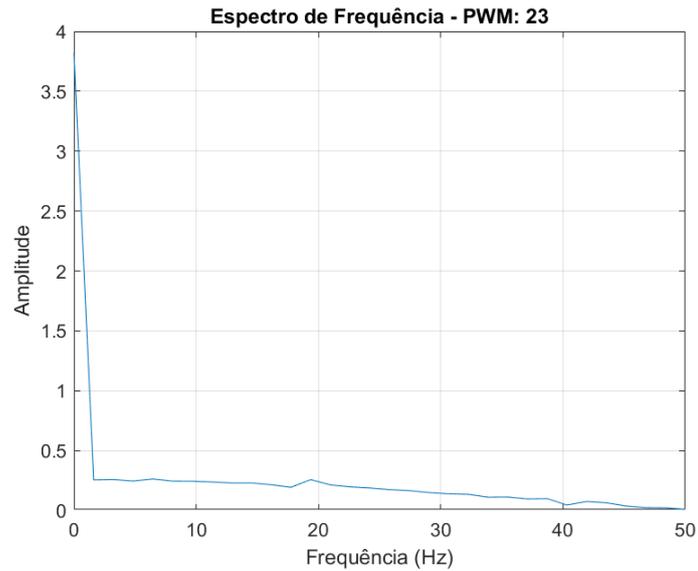
265     cell = (cell/samples);
266     return(cell);
267 }
268
269 float FilterSignal(float input_signal)
270 {
271     float y;
272
273     x_k[0] = input_signal;
274     y_k[0] = 0;
275
276     for (int j=0; j<=order_filter; j++)
277     {
278         y_k[0] = y_k[0] + x_k[j]*b[j];
279     }
280     for(int j=0; j<order_filter; j++)
281     {
282         y_k[0] = y_k[0] - y_k[j+1]*a[j+1];
283     }
284     y_k[0] = y_k[0]/a[0];
285     y = y_k[0];
286
287     for(int j=order_filter;j>=1;j--)
288     {
289         y_k[j] = y_k[j-1];
290         x_k[j] = x_k[j-1];
291     }
292     return y;
293 }
294
295
296 float MovingAverageFilter(float input_signal) {
297
298     static float average = 0.0;
299     static int index = 1;
300
301     if (index == 0 || index == number_samples) {
302         index = 1;
303         average = 0.0;
304     }
305
306     average = average + (input_signal - average) / index++;

```

```
307  
308     return average;  
309 }
```

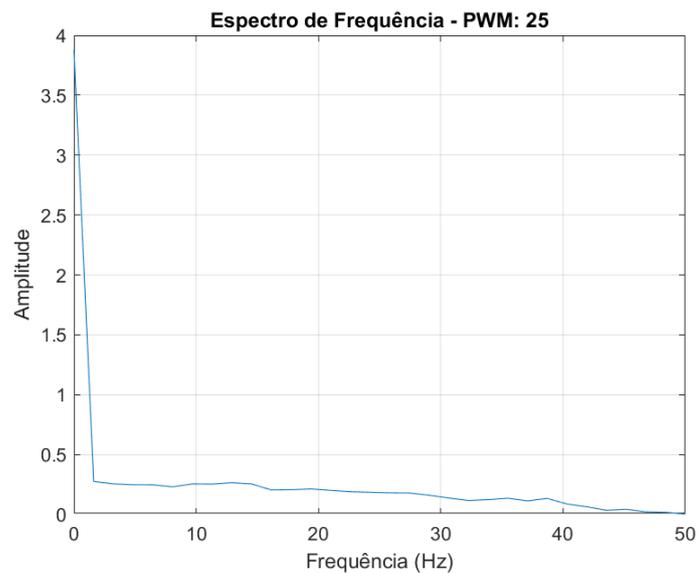
APÊNDICE C – ESPECTROS DE FREQUÊNCIA DAS LEITURAS DA CÉLULA DE CARGA DO GMP 2 ANALISADOS PARA PROJETO DE FILTRO COMBINADO

Figura C.1 – Espectro de Frequência do PWM 23 do GMP2.



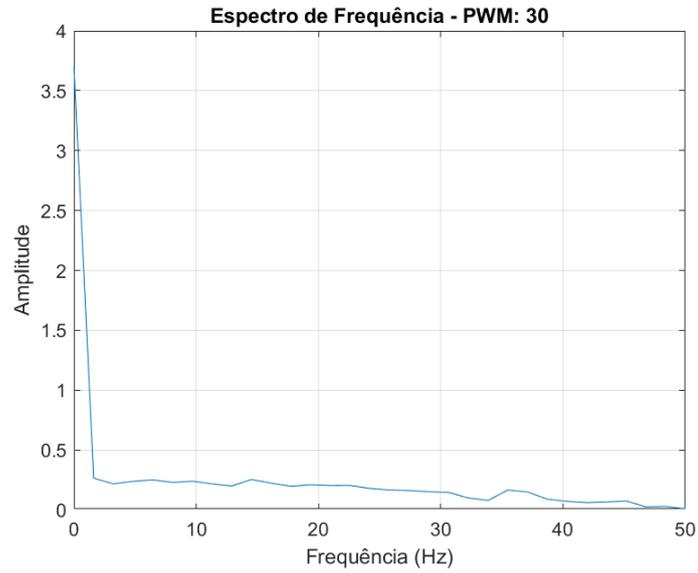
Fonte: Autora.

Figura C.2 – Espectro de Frequência do PWM 25 do GMP2.



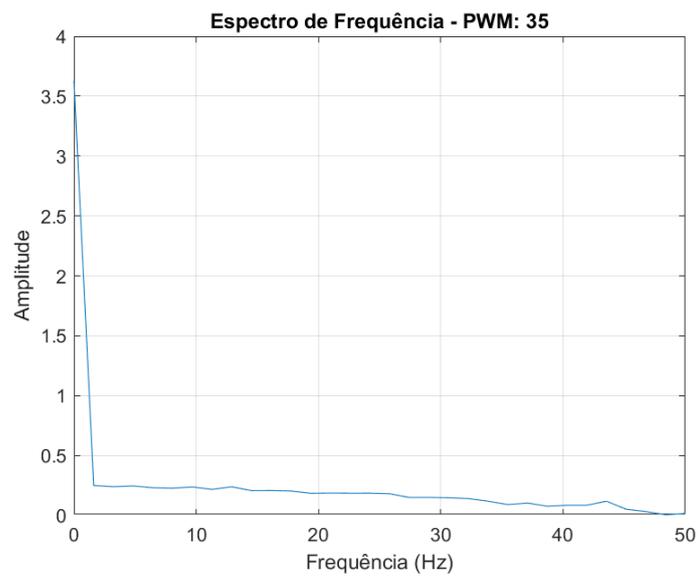
Fonte: Autora.

Figura C.3 – Espectro de Frequência do PWM 30 do GMP2.



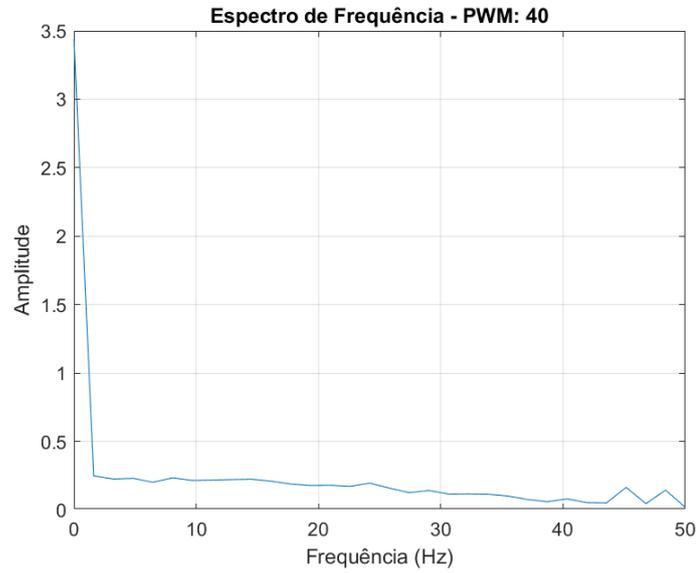
Fonte: Autora.

Figura C.4 – Espectro de Frequência do PWM 35 do GMP2.



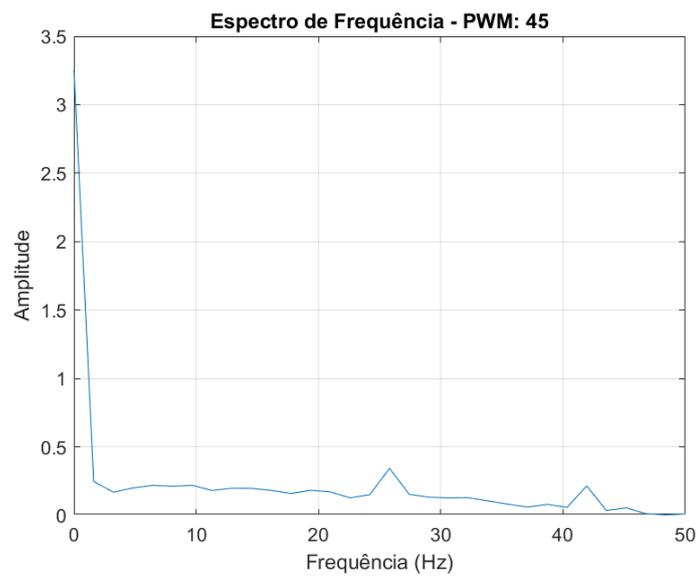
Fonte: Autora.

Figura C.5 – Espectro de Frequência do PWM 40 do GMP2.



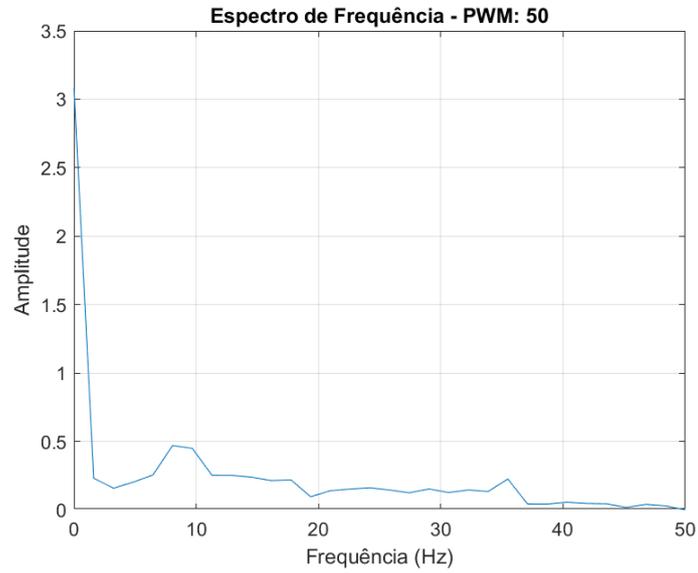
Fonte: Autora.

Figura C.6 – Espectro de Frequência do PWM 45 do GMP2.



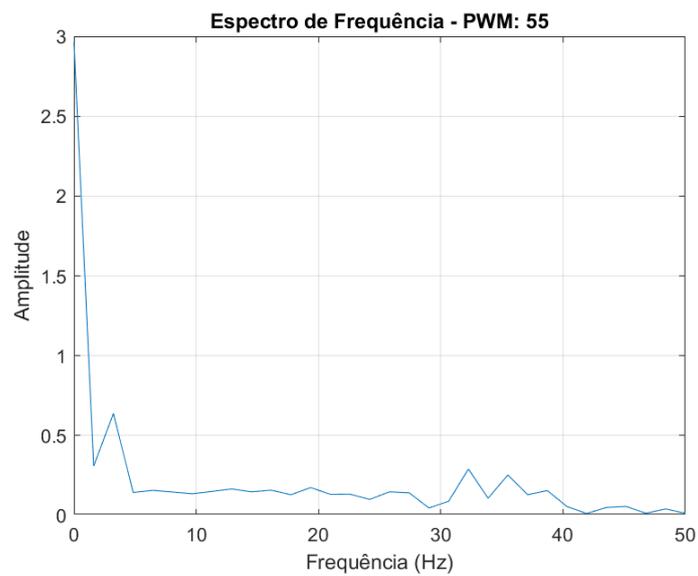
Fonte: Autora.

Figura C.7 – Espectro de Frequência do PWM 50 do GMP2.



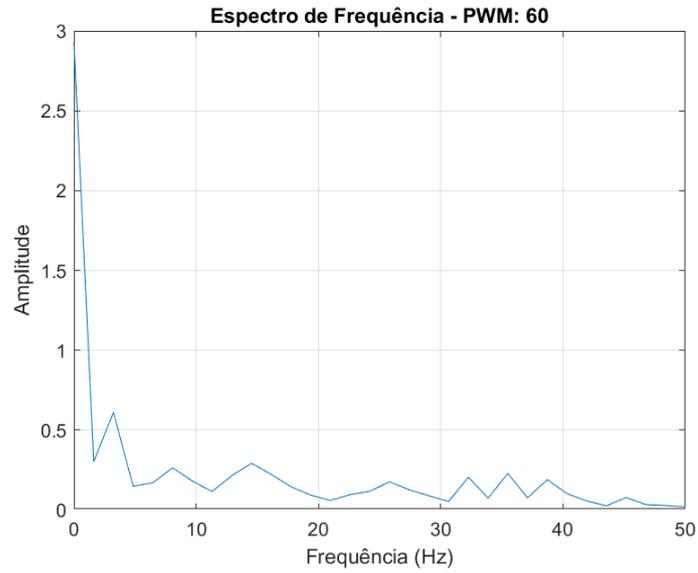
Fonte: Autora.

Figura C.8 – Espectro de Frequência do PWM 55 do GMP2.



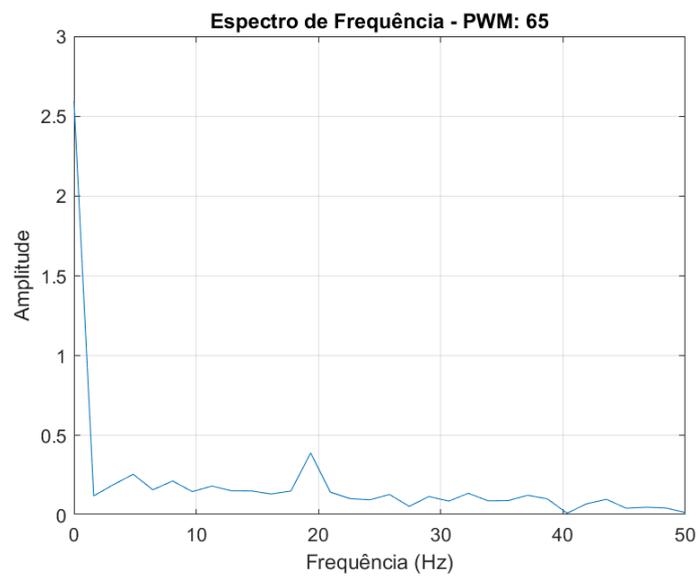
Fonte: Autora.

Figura C.9 – Espectro de Frequência do PWM 60 do GMP2.



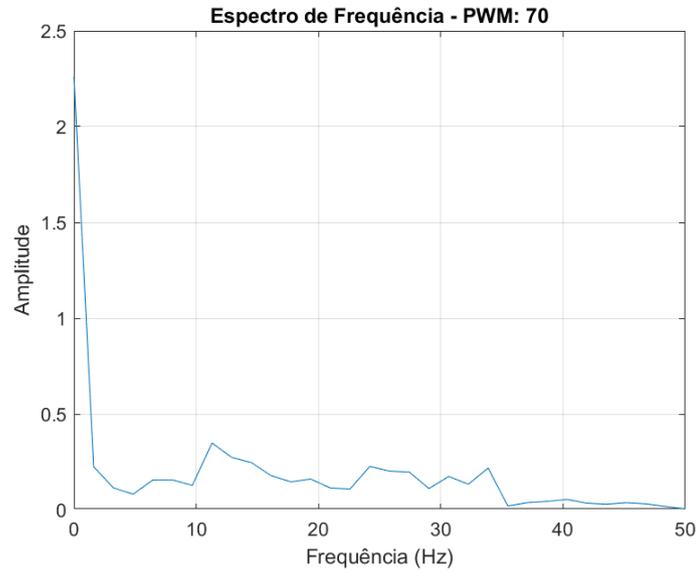
Fonte: Autora.

Figura C.10 – Espectro de Frequência do PWM 65 do GMP2.



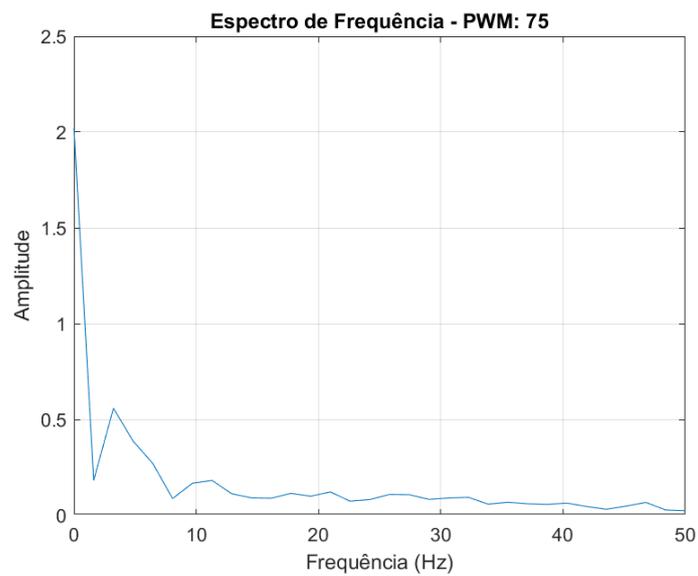
Fonte: Autora.

Figura C.11 – Espectro de Frequência do PWM 70 do GMP2.



Fonte: Autora.

Figura C.12 – Espectro de Frequência do PWM 75 do GMP2.



Fonte: Autora.

**APÊNDICE D – INSPEÇÃO VISUAL DA CORRENTE ELÉTRICA
FORNECIDA PELA FONTE AO GMP 1**

Tabela D.1 – Amostras coletadas para cálculo da corrente elétrica fornecida ao GMP 1 em função da porcentagem de comando máximo.

Comando (%)	Amostras (A)					Média (A)
	1	2	3	4	5	
0.0	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
1.1	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
2.2	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
4.4	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
5.6	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
6.7	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
7.8	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
8.9	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
10.0	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
11.1	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
12.2	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
13.3	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
14.4	0.59	0.58	0.59	0.58	0.59	0.59
15.6	0.62	0.61	0.62	0.61	0.62	0.62
16.7	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
17.8	0.68	0.69	0.68	0.69	0.68	0.68
18.9	0.72	0.71	0.72	0.72	0.72	0.72
20.0	0.76	0.75	0.76	0.75	0.76	0.76
21.1	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
22.2	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
23.3	0.87	0.88	0.87	0.88	0.87	0.87
24.4	0.92	0.91	0.91	0.92	0.91	0.92
25.6	0.96	0.96	0.95	0.96	0.96	0.96
26.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
27.8	1.04	1.04	1.05	1.04	1.03	1.04
28.9	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
30.0	1.13	1.12	1.13	1.13	1.12	1.13
31.1	1.17	1.16	1.18	1.16	1.17	1.17
32.2	1.20	1.22	1.21	1.21	1.21	1.21
33.3	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25

Continua na próxima página

Tabela D.1 – *Continuação da tabela*

Comando (%)	Amostras (A)					Média (A)
	1	2	3	4	5	
34.4	1.29	1.30	1.29	1.29	1.30	1.29
35.6	1.34	1.33	1.34	1.34	1.33	1.34
36.7	1.37	1.38	1.39	1.38	1.39	1.38
37.8	1.43	1.42	1.43	1.41	1.42	1.42
38.9	1.46	1.46	1.47	1.46	1.46	1.46
40.0	1.50	1.51	1.52	1.50	1.49	1.50
41.1	1.55	1.55	1.55	1.55	1.56	1.55
42.2	1.60	1.60	1.60	1.59	1.61	1.60
43.3	1.64	1.64	1.65	1.63	1.65	1.64
44.4	1.70	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69
45.6	1.73	1.73	1.75	1.75	1.74	1.74
46.7	1.77	1.79	1.81	1.79	1.77	1.79
47.8	1.82	1.82	1.81	1.82	1.83	1.82
48.9	1.91	1.90	1.90	1.88	1.89	1.90
50.0	1.94	1.92	1.92	1.93	1.93	1.93
51.1	1.96	1.97	1.97	1.96	1.95	1.96
52.2	2.06	2.05	2.04	2.04	2.03	2.05
53.3	2.07	2.09	2.05	2.07	2.05	2.07
54.4	2.10	2.09	2.07	2.08	2.10	2.09
55.6	2.13	2.13	2.13	2.12	2.14	2.13
56.7	2.18	2.17	2.18	2.19	2.18	2.18
57.8	2.22	2.20	2.21	2.23	2.24	2.22
58.9	2.26	2.26	2.27	2.27	2.25	2.26
60.0	2.32	2.31	2.31	2.30	2.28	2.30
61.1	2.36	2.34	2.35	2.36	2.35	2.35
62.2	2.40	2.39	2.41	2.40	2.39	2.40
63.3	2.46	2.45	2.45	2.45	2.44	2.45
64.4	2.48	2.49	2.49	2.50	2.51	2.49
65.6	2.54	2.54	2.54	2.53	2.53	2.54
66.7	2.58	2.58	2.58	2.59	2.57	2.58
67.8	2.63	2.62	2.62	2.61	2.63	2.62
68.9	2.67	2.67	2.68	2.68	2.66	2.67
70.0	2.73	2.73	2.73	2.72	2.72	2.73
71.1	2.77	2.77	2.78	2.77	2.78	2.77
72.2	2.81	2.82	2.80	2.81	2.81	2.81

Continua na próxima página

Tabela D.1 – *Continuação da tabela*

Comando (%)	Amostras (A)					Média (A)
	1	2	3	4	5	
73.3	2.86	2.85	2.87	2.87	2.86	2.86
74.4	2.91	2.92	2.92	2.90	2.90	2.91
75.6	2.95	2.96	2.95	2.96	2.95	2.95
76.7	3.00	3.01	3.02	3.05	3.03	3.02
77.8	3.07	3.07	3.05	3.05	3.04	3.06
78.9	3.06	3.07	3.05	3.02	3.09	3.06
80.0	3.06	3.07	3.05	3.02	3.09	3.06
81.1	3.11	3.12	3.18	3.17	3.16	3.15
82.2	3.21	3.20	3.19	3.20	3.21	3.20
83.3	3.25	3.25	3.25	3.26	3.25	3.25
84.4	3.32	3.31	3.30	3.30	3.29	3.30
85.6	3.34	3.33	3.33	3.31	3.35	3.33
86.7	3.39	3.39	3.40	3.41	3.38	3.39
87.8	3.46	3.46	3.45	3.44	3.47	3.46
88.9	3.53	3.53	3.54	3.54	3.52	3.53
90.0	3.61	3.60	3.60	3.59	3.59	3.60
91.1	3.65	3.64	3.65	3.64	3.62	3.64
92.2	3.70	3.72	3.68	3.70	3.71	3.70
93.3	3.74	3.73	3.75	3.74	3.73	3.74
94.4	3.83	3.81	3.80	3.82	3.77	3.81
95.6	3.85	3.85	3.84	3.83	3.85	3.84
96.7	3.91	3.92	3.91	3.91	3.91	3.91
97.8	3.96	3.96	3.97	3.95	3.94	3.96
98.9	4.06	4.06	4.04	4.04	4.05	4.05
100.0	4.16	4.08	4.10	4.14	4.20	4.14

**APÊNDICE E – INSPEÇÃO VISUAL DA CORRENTE ELÉTRICA
FORNECIDA PELA FONTE AO GMP 2**

Tabela E.1 – Amostras coletadas para cálculo da corrente elétrica fornecida ao GMP 2 em função da porcentagem de comando máximo.

Comando (%)	Amostras (A)					Média (A)
	1	2	3	4	5	
0.0	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
1.9	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
3.8	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
5.7	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
7.5	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
9.4	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
11.3	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
13.2	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
15.1	0.50	0.49	0.50	0.49	0.49	0.49
17.0	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
18.9	0.56	0.57	0.57	0.56	0.56	0.56
20.8	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
22.6	0.65	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65
24.5	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
26.4	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
28.3	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
30.2	0.82	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
32.1	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
34.0	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
35.8	0.96	0.95	0.96	0.95	0.96	0.96
37.1	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
39.6	1.06	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06
41.5	1.10	1.10	1.11	1.11	1.11	1.11
43.4	1.16	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
44.3	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
47.2	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
49.1	1.31	1.31	1.30	1.30	1.31	1.31
50.9	1.36	1.35	1.35	1.36	1.36	1.36
52.8	1.42	1.41	1.41	1.41	1.42	1.41
54.7	1.46	1.46	1.46	1.45	1.45	1.46

Continua na próxima página

Tabela E.1 – *Continuação da tabela*

Comando (%)	Amostras (A)					Média (A)
	1	2	3	4	5	
56.6	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
58.5	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
60.4	1.57	1.55	1.55	1.56	1.58	1.56
62.3	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61
64.2	1.67	1.68	1.67	1.66	1.67	1.67
66.0	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72
67.9	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
69.8	1.87	1.88	1.87	1.88	1.87	1.87
71.7	1.96	1.95	1.93	1.94	1.95	1.95
73.6	2.04	2.02	2.03	2.02	2.03	2.03
75.5	2.11	2.11	2.14	2.10	2.12	2.12
77.4	2.24	2.23	2.22	2.22	2.23	2.23
79.2	2.35	2.30	2.29	2.30	2.32	2.31
81.1	2.41	2.42	2.43	2.44	2.43	2.43
83.0	2.53	2.53	2.52	2.54	2.53	2.53
84.9	2.66	2.67	2.68	2.65	2.66	2.66
86.8	2.76	2.77	2.78	2.79	2.78	2.78
88.7	2.91	2.92	2.93	2.92	2.90	2.92
90.6	3.06	3.07	3.02	3.05	3.04	3.05
92.5	3.21	3.20	3.19	3.18	3.22	3.20
94.3	3.33	3.34	3.32	3.31	3.30	3.32
96.2	3.43	3.44	3.46	3.42	3.47	3.44
98.1	3.60	3.62	3.61	3.57	3.63	3.61
100.0	3.73	3.75	3.79	3.76	3.79	3.76