

**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiano

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE AERONAVE DE VOO VERTICAL

João Pedro dos Santos Teixeira
Wesley Junio Soares de Oliveira

Instituto Federal Goiano
Campus Trindade
15 de fevereiro de 2024

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

João Pedro dos Santos Teixeira e Wesley Junio Soares de Oliveira

Matrícula:

(2019108202640) 303 e 338

Título do trabalho:

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE AERONAVE DE VOO VERTICAL

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 16 /02 /2024

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA


O(a) referido(a) autor(a) declara:


- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Trindade-GO

16 /02 /2024

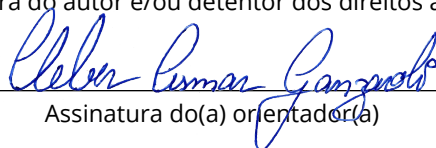
Data

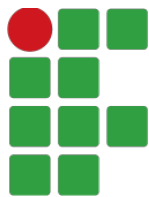
Documento assinado digitalmente
 **JOAO PEDRO DOS SANTOS TEIXEIRA**
Data: 14/02/2024 22:46:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 **WESLEY JUNIO SOARES DE OLIVEIRA**
Data: 14/02/2024 23:18:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)



**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiano

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE AERONAVE DE VOO VERTICAL

João Pedro dos Santos Teixeira
Wesley Junio Soares de Oliveira

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, orientada pelo Dr. Cleber Asmar e coorientado pelo professor Geovane Furriel, aprovado em 08 de Fevereiro de 2024.

Instituto Federal Goiano
Campus Trindade
15 de fevereiro de 2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

T266p Teixeira; Oliveira, João Pedro dos Santos; Wesley
Junio Soares de
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE AERONAVE DE VOO VERTICAL
/ João Pedro dos Santos; Wesley Junio Soares de
Teixeira; Oliveira; orientador Cleber Asmar
Ganzaroli; co-orientador Geovanne Pereira Furriel. --
Trindade, 2024.
96 p.

TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) --
Instituto Federal Goiano, Campus Trindade, 2024.

1. Aeronave. 2. Microcontrolador. 3. Engenharia.
4. Inovadora. 5. Tecnologia. I. Ganzaroli, Cleber
Asmar, orient. II. Furriel, Geovanne Pereira, co-
orient. III. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 10/2024 - CE-TRI/GE-TRI/CMPTRI/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos oito (08) dias do mês de fevereiro de 2024, às 15 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Prof. Me. Robert de Souza Bonuti, Prof. Esp. Roberto Bessa de Araújo, Prof. Dr. Cleber Asmar Ganzaroli, para examinar o Trabalho de Curso intitulado “**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE AERONAVE DE VOO VERTICAL**” dos estudantes **João Pedro dos Santos Teixeira**, Matrícula nº 2019108202640303 e **Wesley Junio Soares de Oliveira**, Matrícula nº 2019108202640338 do Curso de Engenharia Elétrica do IF Goiano – Campus Trindade - Goiás. A palavra foi concedida aos estudantes para a apresentação oral do TCC, houve arguição dos candidatos pelos membros da banca examinadora. Após esta etapa, a banca examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** dos estudantes. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Cleber Asmar Ganzaroli

Orientador

(Assinado Eletronicamente)

Prof Me. Robert de Souza Bonuti

Membro

(Assinado Eletronicamente)

Prof Esp. Roberto Bessa de Araújo

Membro

Observação: Fazer as devidas correções indicadas pela banca no trabalho enviado por e-mail pelos avaliadores.

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- Robert de Souza Bonuti, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/02/2024 17:32:54.
- Cleber Asmar Ganzaroli, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/02/2024 16:53:58.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 15/02/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 572080
Código de Autenticação: f85fada1b7



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Trindade
Av. Wilton Monteiro da Rocha, S/N, Setor Cristina II, TRINDADE / GO, CEP 75380-000
(62) 3506-8000



Documento assinado digitalmente

ROBERTO BESSA DE ARAUJO

Data: 15/02/2024 17:45:33-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

"Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certo para o sucesso é sempre tentar uma vez mais."

THOMAS EDISON

Para aqueles que acreditaram em nosso sucesso, mesmo com todas as adversidades encontradas, dedicamos nosso trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, representando nosso esforço, dedicação e aprendizado ao longo desta jornada acadêmica compartilhada. Em especial, queremos expressar nossa profunda gratidão ao nosso orientador, Dr. Cleber Asmar Ganzaroli, cuja orientação sábia e apoio constante foram fundamentais. Sua paciência e incentivo foram essenciais para a concretização deste projeto.

Às nossas famílias, que sempre estiveram ao nosso lado. Além disso, agradecemos aos professores e colegas de curso que, direta ou indiretamente, influenciaram nosso percurso acadêmico, proporcionando ambiente propício ao aprendizado e crescimento.

RESUMO

A construção e análise da aeronave de decolagem e pouso vertical, inspirada no design do F-35 *Lightning*, destacou-se pela integração harmoniosa de avanços mecânicos e eletrônicos, atingindo patamar elevado de eficiência aerodinâmica e controle de voo. A utilização do microcontrolador ESP32 e do acelerômetro MPU6050 foi decisiva para superar desafios de estabilização e orientação, essenciais na dinâmica de voo vertical. A seleção cuidadosa de materiais, com destaque para o Depron, ofereceu equilíbrio ótimo entre leveza e resistência, crucial para a performance aérea. A montagem meticulosa e a escolha de componentes, como o módulo PCA9685 para a distribuição eficaz de comandos aos servo motores e os motores *brushless*, garantiram a propulsão potente e controle de voo preciso. O projeto enfrentou desafios significativos, especialmente na calibração de sistemas eletrônicos e integração de controles de voo, mas a implementação bem sucedida de soluções técnicas avançadas resultou em testes de qualidade. A solução dos problemas de calibração do acelerômetro MPU6050, crucial para a estabilidade, e a integração eficiente da ESC, fundamentais para o controle dos motores, junto à precisão na seleção e ajuste das hélices, evidenciaram a complexidade e a necessidade de precisão no desenvolvimento aeroespacial. Este projeto não apenas alcançou seus objetivos de criar a aeronave VTOL inovadora, mas também pavimentou o caminho para futuras pesquisas e desenvolvimentos no setor de VANT, demonstrando a aplicabilidade de técnicas avançadas de engenharia e contribuindo significativamente para o avanço da tecnologia de veículos aéreos não tripulados.

Palavras-chave: Aeronave. Microcontrolador. Engenharia. Inovadora. Tecnologia.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF VERTICAL FLIGHT AIRCRAFT

ABSTRACT

The construction and analysis of a vertical takeoff and landing (VTOL) aircraft, inspired by the design of the F-35 Lightning, stood out for its harmonious integration of mechanical and electronic advancements, achieving a high level of aerodynamic efficiency and flight control. The use of the ESP32 controller and the MPU6050 accelerometer was crucial in overcoming stabilization and orientation challenges, essential for vertical flight dynamics. The careful selection of materials, notably Depron, provided an optimal balance between lightness and strength, crucial for aerial performance. The meticulous assembly and choice of components, such as the PCA9685 module for effective command distribution to servo motors and brushless motors, ensured powerful propulsion and precise flight control. The project faced significant challenges, particularly in calibrating electronic systems and integrating flight controls, but the successful implementation of advanced technical solutions resulted in high-quality testing. The resolution of calibration issues with the MPU6050 accelerometer, crucial for stability, and the efficient integration of ESCs, essential for motor control, along with the precision in selecting and adjusting the propellers, highlighted the complexity and precision required in aerospace development. This project not only achieved its goals of creating an innovative VTOL aircraft but also paved the way for future research and developments in the UAV sector, demonstrating the applicability of advanced engineering techniques and significantly contributing to the advancement of unmanned aerial vehicle technology.

Keywords: Aircraft. Microcontroller. Engineering. Innovative. Technology.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS	5
2.1 Princípio de funcionamento	5
2.2 Classificação das aeronaves	6
2.2.1 Bicópteros	7
2.2.2 Classificação dos multirotores	9
2.2.2.1 Tricópteros	10
2.2.2.2 Quadricópteros	12
2.2.2.3 Hexacópteros	13
2.2.2.4 Octocópteros	14
2.3 Constituição dos <i>drones</i>	16
2.4 Considerações finais	16
CAPÍTULO 3 ESTRUTURA MECÂNICA DAS AERONAVES	17
3.1 Materiais estruturais	17
3.2 Configuração estrutural	20
3.3 Hélices	21
3.4 Superfícies de controles	22
3.5 Elementos de sustentação e repouso	23
3.6 Considerações finais	24
CAPÍTULO 4 ESTRUTURA ELETRÔNICA	25
4.1 Atuadores e sensores	25
4.1.1 Motores	25
4.1.2 Controlador eletrônico de velocidade	26
4.1.3 Servo motor	27
4.1.4 Acelerômetros e giroscópios	27
4.2 Força e módulos de processamento e controle	28
4.2.1 Fontes de tensão	28

4.2.2	Controlador de voo	29
4.2.3	Rádio-controle	29
4.3	Programação de aeronaves	30
4.3.1	Linguagens de programação	30
4.3.2	Lógicas de controles	31
4.3.3	Controle Proporcional Integral Derivativo	32
4.3.4	Controle Proporcional Derivativo	33
4.3.5	Controle <i>Fuzzy</i>	33
4.3.6	Controle híbrido <i>Fuzzy</i> -PID	34
4.4	Considerações finais	34
CAPÍTULO 5 METODOLOGIA		37
5.1	Etapas do projeto	37
5.1.1	Construção eletromecânica	38
5.1.1.1	Montagem da estrutura	38
5.1.1.2	Elementos de sustentação	38
5.1.1.3	Sistema de propulsão e controle	40
5.1.1.4	Sensores, dispositivos de comando e potência	41
5.1.2	Programação	44
5.2	Considerações Finais	46
CAPÍTULO 6 RESULTADOS		47
6.1	Resultados da construção mecânica	47
6.2	Resultados da construção eletrônica	53
6.3	Considerações finais	64
CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO		65
7.1	Trabalhos Futuros	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		67

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Definição dos motores adjacentes e de referência.	6
2.2 Exemplos de aeronaves aeróstatos.	7
2.3 Helicóptero de transporte CH-47 Chinook.	8
2.4 Helicóptero de transporte V22-Osprey.	9
2.5 Metodologia de voo do tricóptero.	11
2.6 Metodologia de voo do Tricóptero.	11
2.7 Tipos de configurações dos quadricópteros.	13
2.8 Tipos de configurações hexacópteros.	14
2.9 Tipos de configurações octocópteros.	15
3.1 Estrutura de fibra de carbono.	18
3.2 Estrutura de drone de alumínio.	18
3.3 Aeronave com estrutura de Depron.	19
3.4 Estrutura Impressa com Filamento ABS.	19
3.5 Definição dos eixos da aeronave.	21
3.6 Superfícies de Controles.	23
4.1 Motor Brushless.	26
5.1 Fluxograma de etapas do projeto.	37
5.2 Centro de massa da aeronave calculado.	40
5.3 Fluxograma de ligação ao ESP32	43
5.4 Fluxograma do sistema de controle.	45
6.1 Aeronave montada com Depron de 5mm.	48
6.2 Elementos de suporte pré-fabricados.	49
6.3 Elementos de suporte impressos.	50
6.4 Teste das superfícies de controle.	51
6.5 Hélices utilizadas no projeto.	52
6.6 Fonte de tensão da aeronave.	54
6.7 Módulo PWM para ligação dos servo motores.	55
6.8 Teste de bancada realizado para observar performance do motor.	56
6.9 Motor <i>Brushless</i> utilizado na aeronave.	57
6.10 Servo motor utilizado na aeronave.	58
6.11 Teste de verificação de funcionamento dos motores traseiros.	59
6.12 Teste de verificação de funcionamento do motor central.	59
6.13 Microcontrolador ESP32 utilizado como controlador de voo do projeto.	60

6.14 Controlador eletrônico de velocidade.	61
6.15 Radio controle.	62
6.16 Sensor acelerômetro e giroscópio.	63

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Classificação das aeronaves.	7
2.2 Classificação dos multirotores.	10

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VANT	–	Veículo Aéreo Não Tripulado
VTOL	–	Vertical Take-Off and Landing
RPM	–	Rotações Por Minuto
XPS	–	Poliestireno Extrudado
ABS	–	Acrilonitrila Butadieno Estireno
PETG	–	Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol
PLA	–	Polylactic Acid biopolymer
CG	–	Centro de Gravidade
PWM	–	Modulação por Largura de Pulso
DC	–	Corrente Contínua
CA	–	Corrente Alternada
BLDC	–	Brushless DC
ESC	–	Controlador Eletrônico de Velocidade
IMU	–	Unidade de Medição Inercial
PD	–	Proporcional Derivativo
PI	–	Proporcional Integral
PID	–	Proporcional Integral Derivativo
Li-ion	–	Íon-Lítio
LiPo	–	Lítio-Polímero
ISM	–	Industrial, Scientific e Medic

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ	–	sigma
s	–	segundos
g	–	gravidade
kg	–	quilogramas
A	–	Ampère
cm	–	centímetro
Nm	–	Newton metro

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O rápido avanço tecnológico, junto com altas taxas de eficiência e recursos limitados, está expandindo as aplicações industriais para Veículos Aéreos Não Tripulados. O termo Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) é uma designação abrangente que se refere a aeronaves capazes de voar sem a presença de tripulação, geralmente desenvolvidos para operar em condições perigosas, repetitivas ou em áreas consideradas hostis e de difícil acesso. Uma variedade significativa de modelos de VANT estão disponíveis no mercado, sendo que muitos deles tem ganhado destaque no setor civil, emergindo como uma opção viável no atual panorama comercial (FURTADO et al., 2008).

O termo *drone* não tem uma origem definida, porém há relatos na literatura que datam do século XIX relacionados a balões austríacos não tripulados que transportavam explosivos para atacar alvos na cidade de Veneza, na Itália. A tradução literal de *drone* para o português é "zangão", fazendo alusão a sua operação autônoma e sem a presença de um piloto humano, assemelhando-se ao comportamento dos zangões na natureza. O termo para se referir à aeronaves não tripuladas teve origem durante a Primeira e Segunda Guerras Mundiais, quando os britânicos desenvolveram o *Queen Bee*, este avião controlado por rádio, de baixo custo, foi utilizado como alvo para treinamento de pilotos da artilharia antiaérea (NASCIMENTO; DENADAI, 2021).

Os *drones* possuem uma variedade de aplicações, são diversas áreas que se beneficiam significativamente com suas capacidades, pois são equipamentos dinâmicos com alta tecnologia. Podem ser organizados com estruturas complexas, como inteligência artificial, permitindo tomadas de decisões rápidas, autonomia e confiabilidade. Algumas das principais são: i) setores de saúde, ii) áreas militares, iii) controle de logística, iv) agricultura, entre outras. Nos setores de saúde a sua utilização se evidenciou principalmente durante a pandemia. O segundo setor é um dos mais importantes, pois foi onde surgiram os primeiros modelos dessas aeronaves. Já no terceiro e quarto setores, são áreas em que essa tecnologia está crescendo exponencialmente, pois foram desenvolvidos modelos capazes de realizar com precisão o trabalho que foi designado.

Os VANT têm desempenhado papéis cruciais na área da saúde, realizando avaliações de desastres em áreas de difícil acesso e facilitando a entrega de ajuda humanitária, como: medicamentos, vacinas, bolsas de sangue e outros suprimentos médicos em regiões remotas. Essas aeronaves também asseguram o transporte de amostras e kits

de teste em locais de alto risco de contágio. Adicionalmente, proporcionam acesso rápido a equipamentos médicos durante situações de emergência, contribuindo para salvar vidas (AYAMGA et al., 2021).

Em áreas militares, essa tecnologia pode ser usada no combate e prevenção de incêndios florestais, treinamentos, mapeamento de terrenos ou áreas marítimas no caso da marinha (BRAGA, 2019). As estruturas dos modelos utilizados no setor militar contam com o nível mais alto de tecnologia, são aeronaves que necessitam passar despercebidas por radares ou qualquer outro sistema de defesa. Algumas possuem embarcados sistemas de navegação via satélite, que justifica a necessidade dos componentes de última geração para suprir a vulnerabilidade e a falta de segurança no espaço cibernético (BORNE, 2013). Essas aeronaves, se designadas para ataques aéreos, necessitam ainda mais de atenção em relação a blindagem do sistema, pois são equipadas com armamentos de grande periculosidade.

Se tratando de logística, diversas empresas multinacionais, como a Amazon, estão integrando *drones*, não apenas para a entrega de produtos, mas também para aprimorar a eficiência em outros aspectos logísticos, como: organização de estoques, armazenamento de produtos e monitoramento preciso dos processos internos. Proporcionando uma gestão mais eficiente, segura e controlada das operações. Essa abordagem inovadora não só reflete a busca por soluções tecnológicas avançadas, mas também destaca a adaptabilidade das empresas às crescentes demandas do mercado global. O modal aéreo se destaca como uma opção recomendada para situações de urgência ou para o transporte de produtos de alto valor. Sua notável velocidade e a segurança intrínseca no manuseio desses produtos contribuem para uma maior satisfação do cliente (PEREIRA et al., 2022).

Na área da agricultura, o crescimento exponencial da tecnologia proporcionou avanços significativos para esse setor. Os *drones* se destacam nesse avanço especialmente no conceito de sustentabilidade e na prática da agricultura de precisão. Esses modelos são capazes de fazer a pulverização da lavoura de uma maneira mais eficiente que os aviões, garantindo o uso mais eficaz dos agrotóxicos (ARANTES et al., 2018). Outra aplicação é o acompanhamento do ciclo de plantio através do monitoramento da lavoura, com a análise dos dados é possível identificar áreas com desenvolvimento lento, ou áreas que tem maior incidência de pragas e danos, assim é possível acelerar os processos para recuperação desses problemas. O uso dessas aeronaves estão proporcionando aos agricultores aumentar sua produtividade e diminuir a quantidade de insumos nas plantações, além de acompanhar todo o processo de forma precisa e

reduzir os custos (DA, 2021).

Os *drones* podem ser divididos em modelos de asa fixa e multirotores. Os modelos de asa fixa, similares a aeronaves convencionais, oferecem eficiência energética superior. Seu princípio aerodinâmico permite velocidades consideráveis, o que contribui para voos de longas distâncias com menor consumo. Isso o torna ideal para mapeamentos, vigilância e controle extensivo de áreas. Os modelos multirotores possuem configurações de rotores verticalmente alinhados que permitem decolagens e aterrissagens verticais, além de manobras de voo em baixa velocidade e a capacidade de pairar no ar. No presente contexto, o seguinte trabalho tem como objetivo apresentar análises sobre o desenvolvimento e operação de uma aeronave multirotor de decolagem e pouso vertical (*Vertical Take-Off and Landing-VTOL*), com foco em aspectos técnicos e operacionais (VIEIRA; MARQUES, 2019).

Este projeto visa desenvolver um modelo real em pequena escala, partindo de ideias fundamentadas e de um projeto já concluído do aeromodelo *Lockheed Martin F-35 Lightning*, com foco em aprimorar a eficácia desse modelo. A proposta busca expandir os conhecimentos em aerodinâmica, eletromecânica, conversão de energia, além de promover o desenvolvimento acadêmico. A iniciativa pretende explorar e aplicar conceitos avançados para a construção de um modelo que represente não apenas a réplica física, mas também a otimização dos sistemas e processos associados à referida aeronave. O objetivo principal é alcançar integração sinérgica de princípios científicos e técnicos, proporcionando breve conhecimento ao campo da engenharia e contribuindo para a formação acadêmica dos envolvidos.

CAPÍTULO 2

VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Neste capítulo, é realizada a análise dos princípios de funcionamento que impulsionam o VANT. Em seguida, será abordado detalhadamente suas classificações, abrangendo categorias específicas e características distintivas de cada modelo. Destaca-se também ao longo do texto, os principais componentes que constituem essas aeronaves.

2.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do VANT é fundamentado na disposição estratégica de seus conjuntos motopropulsores e na integridade de sua estrutura. Os movimentos executados por essa aeronaves são possíveis com a variação da rotação de seus motores. Na configuração desses componentes, geralmente aqueles determinados como adjacentes tem um sentido de rotação oposto (sentido horário) aos que são considerados como motores de referência (sentido anti-horário), conforme a Figura 2.1. Dessa forma, quando tracionados simultaneamente, o deslocamento resultante ocorre na direção vertical, se houver diferenças na velocidade de rotação a aeronave realizará movimentos de inclinação, ocasionando alterações na sua direção (GIANNICO, 2021).

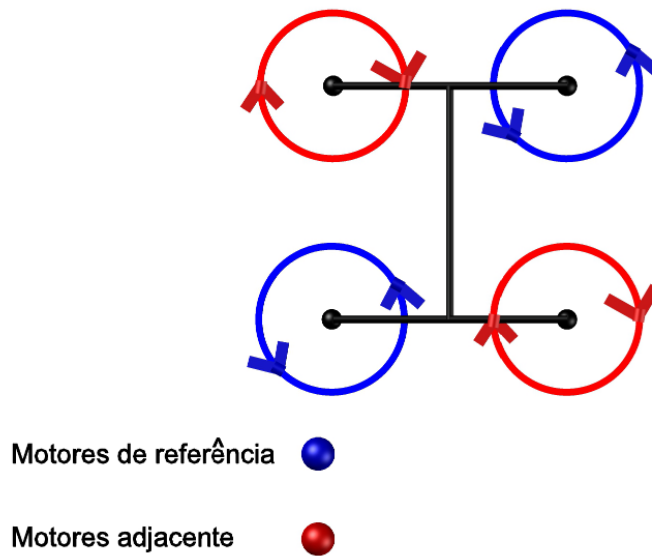


Figura 2.1 - Definição dos motores adjacentes e de referência.

Fonte: Autores, 2024.

A configuração e o estilo de voo dessas aeronaves desempenham papéis que influenciam diretamente o funcionamento desses dispositivos. A sua forma específica impacta diretamente na eficiência aerodinâmica e na estabilidade durante o voo. A disposição dos motores na estrutura e a seleção cuidadosa dos materiais de construção são importantes para manter o desempenho. Assim, a interligação entre o formato da aeronave e seu comportamento durante o voo molda de maneira significativa a qualidade e as aplicações potenciais desses dispositivos tecnológicos.

2.2 Classificação das aeronaves

As aeronaves são classificadas em várias categorias com base em suas características, principalmente em relação ao método de sustentação e propulsão. Conforme estabelecido por autores como [Santana \(2017\)](#) e [Oñate \(2015\)](#), são majoritariamente divididos em dois grupos: aeróstatos e aeródinos ([VILLALOBOS et al., 2018](#)). Os aeróstatos, conforme [Figura 2.2](#), dependem de gases mais leves que o ar para sua sustentação, baseado no princípio de Arquimedes o empuxo é controlado e varia de acordo com o peso da aeronave ([PILOTOS, 2014](#)). Os aeródinos são veículos que excedem o peso do ar e conseguem gerar a sustentação essencial para voar utilizando a interação aerodinâmica com o ar em movimento sobre suas superfícies, seguindo o princípio da terceira lei de Newton ([MIRANDA; RODRIGUES, 2007](#)).

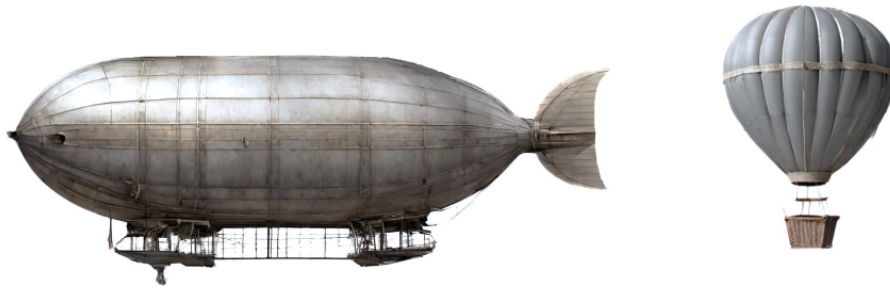


Figura 2.2 - Exemplos de aeronaves aeróstatos.

Fonte: Autores, 2024.

Os aeródinos dispostos na Tabela 2.1 podem ser subdivididos em três tipos principais: asa fixa, asa rotativa e híbridos. Aeronaves de asa fixa obtêm sua sustentação por meio de seus aerofólios fixos. Caracterizadas por sua leveza e maior autonomia, são capazes de cobrir distâncias maiores, mas exigem movimento contínuo para manter a sustentação. Dependendo da posição de suas asas, são classificadas em alta, média, baixa e asa volante. Por outro lado, os veículos de asa rotativa são conhecidos por sua capacidade de decolagem, aterrissagem vertical e a habilidade de realizar voos estacionários. Sua sustentação no ar se deve aos seus aerofólios rotativos, ou seja, suas hélices e seus rotores. Estes são categorizados, com base no número e configuração de seus rotores, como helicópteros, que são aeronaves com rotor principal e rotor de cauda, aeronaves com rotores em configuração tandem, e multirotores (VILLALOBOS et al., 2018).

	Híbridos		
	Asas Fixas	Asas Rotativas	
		Monorotor	Multirotor
Exemplos	Aviões, Planadores	Helicópteros	Tricópteros, Quadcópteros, Hexacópteros, Octocópteros

Tabela 2.1 - Classificação das aeronaves.

2.2.1 Bicópteros

Ao analisar as implicações e características dos bicópteros sob uma perspectiva acadêmica e técnica, identificamos aspectos multifacetados desta configuração específica de aeronave. Esta análise incide sobre os veículos de asas rotativas que utilizam a configuração tandem. Esta configuração, embora menos prevalente que os multirotores, apresenta propriedades e limitações únicas essenciais para a aplicação eficiente e

inovadora dessas aeronaves em diversos contextos (PRIATMOKO; NIRBITO, 2019).

Essas aeronaves são caracterizadas por uma configuração de dois motores, que demanda um sistema de controle complexo para garantir estabilidade, principalmente devido à tendência intrínseca para desafios de estabilidade em manobras e condições de voo variáveis. Em termos de aplicações práticas, eles podem ser úteis em cenários onde a decolagem e aterrissagem vertical são essenciais, como em regiões com espaço limitado para pistas de aeronaves. No entanto, a viabilidade de sua utilização é moderada por preocupações relacionadas ao controle de estabilidade e eficiência energética (PRIATMOKO; NIRBITO, 2019).

A progressão no *design* e funcionalidade dos bicópteros está frequentemente atrelada à inovação tecnológica, particularmente no que se refere ao aprimoramento dos sistemas de controle e propulsão. A aplicação bem-sucedida dessa configuração em aeronaves de maior escala, exemplificada pelo Chinook na Figura 2.3 e pelo V22-Osprey na Figura 2.4, ilustra seu potencial, embora ainda existam desafios e sigilos tecnológicos a serem explorados (PADILHA, 2012).



Figura 2.3 - Helicóptero de transporte CH-47 Chinook.

Fonte: Defesa Aérea e Naval, 2019.



Figura 2.4 - Helicóptero de transporte V22-Osprey.

Fonte: Defesa Aérea e Naval, 2019.

A análise aerodinâmica dos bicópteros revela uma complexa interação entre os componentes estruturais e a dinâmica de voo. A necessidade de uma propulsão eficiente, que gere empuxos significativos, é contrastada com o consumo de energia e os desafios de controle de estabilidade. Este equilíbrio demanda modelos meticulosos e considerações aerodinâmicas avançadas. Os bicópteros representam um campo desafiador e estimulante dentro da engenharia. Eles oferecem oportunidades para inovação e aplicação em cenários onde sua configuração pode ser vantajosa. No entanto, as complexidades associadas ao seu *design* e operação exigem abordagem ponderada e análise técnica aprofundada. O futuro desenvolvimento de bicópteros depende da interseção entre inovação tecnológica, compreensão aerodinâmica e resolução de desafios de estabilidade e eficiência energética. Esta interseção possibilita pesquisa e desenvolvimento contínuos, visando a otimização dessa configuração para uma gama mais ampla de aplicações (PRIATMOKO; NIRBITO, 2019).

2.2.2 Classificação dos multirotores

Os multirotores, em particular, ganharam popularidade devido à sua simplicidade mecânica e facilidade de fabricação. A versatilidade dessas aeronaves, que podem variar de configurações de três a oito rotores ou mais, as torna a escolha preferida em muitas aplicações. A estabilidade e manobrabilidade dos multirotores são incrementadas pela quantidade de rotores, conforme a Tabela 2.2, além da força de propulsão, que permite sustentar cargas maiores (DEMOLINARI, 2016).

Número de Motores	3	4	6	8
Designação	Tricóptero	Quadcóptero	Hexacóptero	Octacóptero

Tabela 2.2 - Classificação dos multirotores.

2.2.2.1 Tricópteros

Tricópteros representam a forma mais elementar dentro das configurações de multirotores disponíveis atualmente. Esta categoria específica de VANT é caracterizada por uma estrutura composta por três braços radiais que se estendem a partir de um núcleo central. A configuração de propulsão inclui três motores, três controladores de velocidade eletrônicos, um servomotor e três hélices. O mecanismo de controle de voo é primariamente fundamentado na modulação das rotações por minuto (RPM) dos motores. A aceleração dos motores para altas rotações resulta na elevação vertical da aeronave, enquanto a redução do RPM leva ao seu declínio progressivo (VALENCIA, 2017).

A metodologia de voo está relacionada ao controle do número de rotações dos motores. Geralmente, o voo é facilitado pela rotação de dois motores em direção oposta ao terceiro, criando uma dinâmica de voo diferenciada, conforme Figura 2.6. Além de proporcionar sustentação vertical, os tricópteros utilizam esta configuração motora para movimentação espacial. O movimento oscilante lateral é alcançado através da redução das rotações do motor situado no lado oposto da direção do giro. Similarmente, o motor de cauda contribui para a manobra do *drone*, alterando sua inclinação e direção. O servomotor acoplado ao motor de cauda adiciona uma camada adicional de controle, permitindo rotação ao redor do eixo central (LUCENA, 2018).

Figura 2.5 - Metodologia de voo do tricóptero.

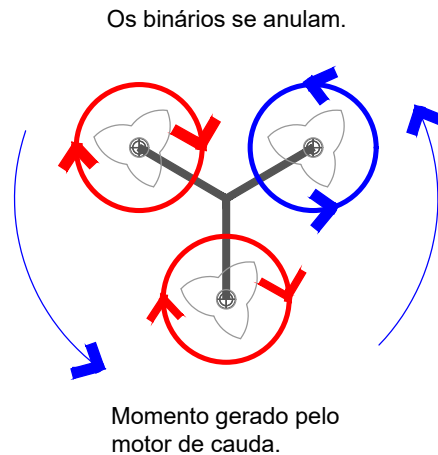


Figura 2.6 - Metodologia de voo do Tricóptero.

Fonte: Autores, 2024.

No que se refere aos argumentos favoráveis à adoção desse modelo de aeronave, destacam-se sua alta manobrabilidade, atribuída ao servomotor traseiro, e a possibilidade de dobrar a estrutura, que facilita o armazenamento e transporte. Esses *drones* possuem estrutura comparativamente mais leve que outros multirotores, além de oferecer espectro amplo de movimentação devido ao seu formato único. Em termos de fabricação, os tricópteros requerem menor número de componentes que seus equivalentes, resultando em soluções mais econômicas. Adicionalmente, esse modelo proporciona campo visual ampliado na parte frontal, aspecto vantajoso para diversas aplicações, como na captação de imagens aéreas (VALENCIA, 2017).

Contraopondo-se a estas vantagens, existem algumas limitações técnicas e desafios associados aos tricópteros. A ausência de redundância nos sistemas motrizes é uma preocupação primária, em caso de falha de um motor, o veículo pode perder controle e estabilidade, levando a um descenso incontrollável. Além disso, a capacidade de suporte de carga é limitada devido ao baixo empuxo gerado pela configuração de três motores. A configuração e manutenção desses sistemas requerem um conhecimento técnico avançado. Em termos de estabilidade e potência são inferiores em comparação a outras configurações de multirotores. A estrutura do chassi, muitas vezes desprovida de carcaças protetoras e a necessidade de operar os motores em altas rotações para o voo são outras desvantagens a serem consideradas (VALENCIA, 2017).

2.2.2.2 Quadricópteros

Os quadricópteros representam a configuração mais prevalente no espectro dos multirotores. Essa categoria é constituída por grupos motopropulsores comumente dispostos no mesmo plano, estrategicamente posicionados nas extremidades dos braços do *drone*. Essa configuração de propulsão permite o equilíbrio eficiente das forças vitais para o controle de voo e estabilidade aerodinâmica (VALENCIA, 2017).

No que diz respeito à metodologia de voo, os quadricópteros operam através da modulação das rotações dos motores para executar movimentos ascendentes e descendentes. A estabilização é alcançada fazendo com que dois dos quatro motores girem em sentido anti-horário, contrabalançando o torque gerado pelos demais. Essa configuração é essencial para manter o equilíbrio dinâmico e permitir controle de voo preciso (TUFAILE, 2017).

Para manobras de rotação em torno do eixo vertical, é necessário desequilíbrio controlado nas forças produzidas pelos motores opostos. Isso é alcançado através da variação proporcional das velocidades dos motores esquerdo e direito. Similarmente, para realizar a rotação em torno do eixo longitudinal (rotação axial), movimento inversamente proporcional é induzido nos motores opostos. A manutenção do equilíbrio entre as forças iniciais e as resultantes durante o voo é crucial, qualquer descompensação pode resultar na perda de controle da aeronave (TUFAILE, 2017).

Os sistemas de giroscópio desempenham papel central na estabilização e no controle inteligente destes modelos. Estes sistemas são responsáveis por monitorar e ajustar continuamente a orientação da aeronave, garantindo voo estável e responsivo. Os *designs* destes modelos, dispostos na Figura 2.7, oferecem versatilidade em termos de configuração estrutural, influenciando em suas manobras e aplicabilidade (BELUSSO, 2019).

A configuração em cruz dos quadricópteros facilita a operação, pois mudanças de direção sobre os eixos vertical e horizontal são realizadas com o controle de apenas um motor. Esta simplicidade contrasta com as estruturas em forma de xis, onde os motores são posicionados a 45° em direção a um dos quatro braços ou na configuração agá. Nestes casos, todos os quatro motores devem ser coordenados simultaneamente para a manobra. Esta configuração é particularmente favorável para o suporte de câmeras, oferecendo um campo de visão amplo, livre da interferência dos motores (MOL, 2020).

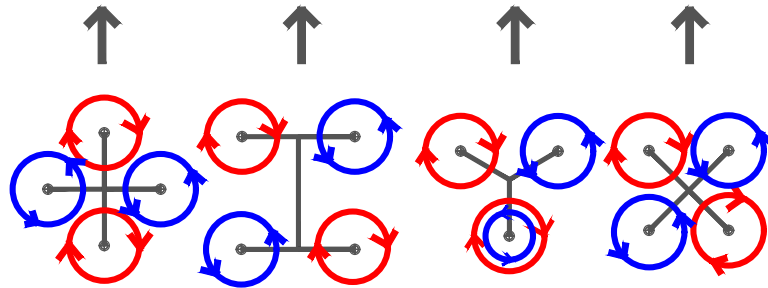


Figura 2.7 - Tipos de configurações dos quadricópteros.

Fonte: Autores, 2024.

Entre as vantagens dos quadricópteros, destacam-se a rápida aceleração, facilidade de manipulação dos componentes, uma estrutura mais simples e robusta, maior capacidade de carga em comparação com tricópteros, e maior agilidade em relação aos hexacópteros. Contudo, há limitações como a estabilidade e velocidade limitadas, falta de redundância em caso de falha de um motor e capacidade de carga limitada. Estas características devem ser meticulosamente consideradas ao empregar quadricópteros em aplicações específicas (VALENCIA, 2017)..

2.2.2.3 Hexacópteros

Os hexacópteros, referem-se a uma configuração específica de multirotores equipados com seis motores, conforme a Figura 2.8. Este tipo de VANT é caracterizado por possuir estrutura composta de seis braços estruturais equidistantes do centro de gravidade, geralmente em formato de hexágono. Cada componente desempenha funções cruciais na dinâmica de voo e na estabilidade aerodinâmica, tornando-o adequado para variadas aplicações que exigem maior capacidade de carga e redundância (ARTALE et al., 2013).

A metodologia de voo dos hexacópteros é similar àquela dos quadricópteros, com a diferença notável no número de motores e hélices. A configuração dos motores é tal que três giram no sentido horário e os outros três em sentido anti-horário (ARTALE et al., 2013). Esta disposição é fundamental para neutralizar o torque e assegurar voos equilibrados. Existem três disposições estruturais predominantes para os he-

xacópteros: a configuração em cruz, em ípsilon e xis, cada configuração oferecendo características específicas de manobrabilidade e estabilidade (VALENCIA, 2017).

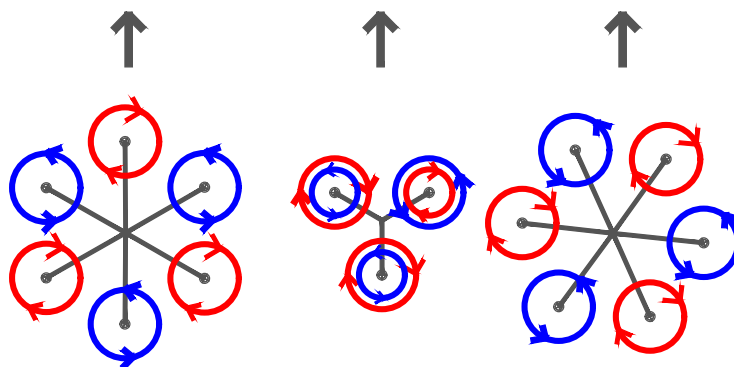


Figura 2.8 - Tipos de configurações hexacópteros.

Fonte: Autores, 2024.

Os hexacópteros possuem vantagens distintas quando comparados aos quadricópteros. Uma das mais notáveis é a estabilidade aprimorada durante o voo, proporcionada pela maior quantidade de motores e hélices. Esta configuração permite também maior capacidade de carga, tornando-os ideais para aplicações que exigem o transporte de cargas mais pesadas. Além disso, a presença de motores adicionais oferecem redundância significativa, aumentando a segurança operacional em caso de falha dos propulsores (VALENCIA, 2017).

No entanto, essas vantagens vem acompanhadas de desvantagens, os hexacópteros geralmente tem custos mais elevados devido à sua complexidade e ao maior número de componentes (VALENCIA, 2017). Eles são menos compactos e exigem mais energia para propulsão, o que pode afetar a duração do voo e a eficiência energética. Além disso, a configuração e a manutenção do hexacóptero exige conhecimento técnico avançado, e suas dimensões maiores tornam o transporte mais desafiador (BARÁNEK; ŠOLC, 2012).

2.2.2.4 Octocópteros

Os octocópteros representam a classe avançada de aeronaves, caracterizados pela presença de oito motores e seus componentes associados, conforme Figura 2.9. O

termo "multicóptero" é frequentemente empregado para descrever essas aeronaves, refletindo a multiplicidade de unidades de propulsão (VALENCIA, 2017). A principal vantagem dessa configuração reside na sua capacidade de gerar potências significativas, facilitando a ascensão do *drone* de forma eficiente e controlada (YEMLE et al., 2019).

A capacidade de carga dos octocópteros é um aspecto notável, permitindo o transporte de equipamentos de alto valor, como câmeras de vídeo de alta qualidade, ou cargas pesadas em variadas aplicações logísticas (YEMLE et al., 2019). Esta característica os torna particularmente adequados para uso profissional, onde a necessidade de transportar cargas substanciais é frequente (MOL, 2020).

A metodologia de voo dos octocópteros também baseia-se no princípio de voo dos quadricópteros. Nesta configuração, metade das hélices gira no sentido horário, enquanto a outra metade gira no sentido anti-horário. Esta disposição de rotação das hélices é essencial para equilibrar as forças geradas.

Para este tipo de multirotor, são possíveis as configurações estruturais: i) a configuração em cruz, ii) em xis, iii) xis coaxial. Cada configuração oferece diferentes características aerodinâmicas e de manobrabilidade, afetando a performance e a aplicabilidade do octocóptero em diferentes cenários de voo (MOL, 2020).

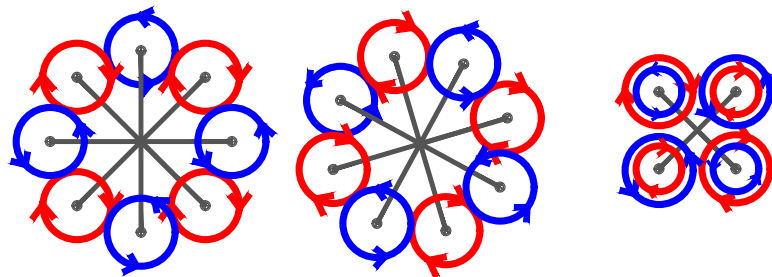


Figura 2.9 - Tipos de configurações octocópteros.

Fonte: Autores, 2024.

Octocópteros representam o marco significativo da evolução dos *drones*, oferecendo capacidades superiores em termos de potência, capacidade de carga e estabilidade de voo. No entanto, a complexidade inerente à sua operação e manutenção, juntamente

com o custo mais elevado associado a esta tecnologia, torna-os mais adequados para aplicações profissionais e situações que exigem capacidades de cargas substanciais e confiabilidade aprimorada (VALENCIA, 2017).

2.3 Constituição dos *drones*

No desenvolvimento engenhoso de um VANT, a atenção se volta para seis componentes primordiais que demandam escolhas criteriosas e integração técnica refinada. Para a construção de aeronaves efetivamente funcionais, são necessários os seguintes componentes: i) estrutura, que constitui a armadura fundamental do sistema, ii) os motores, elementos propulsores que são o fulcro da dinâmica aérea, iii) as hélices, componentes críticos para a criação de empuxo aerodinâmico, iv) os controladores de velocidade eletrônicos (*Electronic Speed Controller-ESC*), dispositivos de gerenciamento de potência que modulam a velocidade dos motores, v) o controlador de voo, um sistema embarcado de alta complexidade que gerencia a estabilidade e a navegação da aeronave, vi) as baterias, que fornecem a energia elétrica necessária para todas as operações da aeronave (CARVALHO et al., 2019).

2.4 Considerações finais

As variadas configurações de aeronaves são características importantes desses dispositivos. Essa flexibilidade contribuiu para disseminação dos *drones* em muitas áreas, permitindo evoluções significativas, além de detalhes que anteriormente não eram levados em consideração, como massa, dinâmica de voo e composição estrutural. Essas partes serão complementadas no próximo capítulo, no qual é discutido a importância desses detalhes.

CAPÍTULO 3

ESTRUTURA MECÂNICA DAS AERONAVES

O próximo capítulo trata dos componentes estruturais dos *drones*, realizando uma análise detalhada dos principais materiais que formam o chassi desses modelos. É explorado a disposição de partes cruciais que sustentam atuadores e sensores, proporcionando a compreensão abrangente da arquitetura dessas aeronaves. Além disso, é destacado aspectos importantes, como o centro de gravidade e características fundamentais que devem ser observadas para reduzir a massa e melhorar a qualidade de voo.

3.1 Materiais estruturais

As placas que compõem a plataforma central devem exibir rigidez para sustentar as forças dinâmicas e manter a estabilidade estrutural em voo, além de servir como área de montagem para os componentes eletrônicos (DEMOLINARI, 2016). Os materiais empregados na composição dessas estruturas, geralmente consistem em ligas leves e robustas, projetadas para suportar a resistência do ar. Em *drones* comerciais, alguns materiais como fibra de carbono e ligas de alumínio, compõem a estrutura dessas aeronaves. Em modelos não comerciais é comum estruturas de poliestireno extrudado e polímeros utilizados em impressoras 3D.

A fibra de carbono, originada do polímero de poliácrlonitrila, é obtida por meio de processos químicos e altas temperaturas, destaca-se na engenharia por sua incrível leveza e resistência à tração (SANTOS, 2019). Possui módulo de elasticidade elevado e capacidade de amortecer vibrações, tornando-se ideal para aplicações que demandam redução de massa, como na fabricação de componentes para VANT, conforme a Figura 3.1. Seu contínuo aprimoramento em termos de processos de fabricação e composições tem ampliado seu uso em diferentes campos técnicos e estruturais (LEBRAO, 2008).



Figura 3.1 - Estrutura de fibra de carbono.

Fonte: Fernando Fernandes, 2016.

As ligas de alumínio são escolhas frequentes na construção de estruturas para *drones*, como na Figura 3.2, devido à sua acessibilidade econômica e características favoráveis de leveza e rigidez. Trilhos ou tubos de alumínio são opções populares nesse contexto, oferecendo estruturas sólidas sem acrescentar muito peso à aeronave. No entanto, um ponto importante a considerar é a limitação desses materiais em absorver as vibrações provenientes dos motores (SANTOS, 2016).

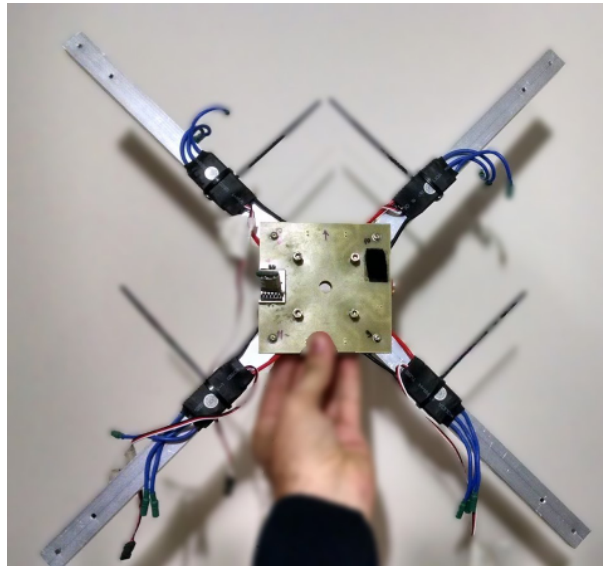


Figura 3.2 - Estrutura de drone de alumínio.

Fonte: Fernando Mota, 2016.

O poliestireno extrudado XPS, amplamente conhecido como Depron, destaca-se como material de escolha para a construção de aeronaves devido à sua combinação única de leveza e resistência, como pode ser observado na Figura 3.3. Sua estrutura

leve torna-o ideal para aeronaves de baixo custo, proporcionando relação excelente entre resistência e peso. Sua natureza robusta e maleabilidade facilitam a modelagem e o design de diferentes componentes aerodinâmicos, permitindo a construção de aeronaves com desempenho satisfatório.

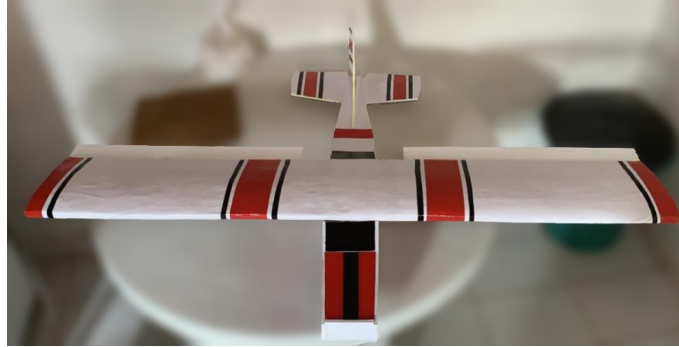


Figura 3.3 - Aeronave com estrutura de Depron.

Fonte: Osmar da Costa Silva Neto, 2021.

Estruturas construídas em impressoras 3D se tornaram alternativas viáveis em projetos de *drones*. Compatíveis com variados tipos de filamentos, desenvolver carcaças leves e robustas é uma tarefa fácil. Se tratando de aeronaves, alguns tipos de filamentos ganham mais destaques como: i) acrilonitrila butadieno estiren (ABS), que tem como característica sua rigidez e resistência a temperaturas mais elevadas, ii) polietileno tereftalato de etileno glicol (PETG), material com alta resistência mecânica e flexível, iii) *Nylon*, material que tem baixo custo, além de ter mais resistência e flexibilidade que os outros materiais, entre outros (BITTENCOURT, 2021).



Figura 3.4 - Estrutura Impressa com Filamento ABS.

Fonte: fillamentum industrial, 2014.

3.2 Configuração estrutural

A concepção estrutural do chassi do *drone* é fundamentalmente articulada em torno do núcleo central, que serve como o eixo de ancoragem para os braços mecânicos. Este núcleo alberga componentes críticos, tais como os dispositivos sensoriais, a unidade de controle de voo e os módulos de armazenamento de energia. Nas terminações dos braços, são acopladas as unidades motrizes, e, dependendo da configuração aerodinâmica específica, suportes adicionais podem ser requeridos para sua instalação (DEMOLINARI, 2016).

O processo de *design* da infraestrutura aeronáutica contemplou três elementos estruturais primordiais: i) as placas centrais, ii) os braços articulados, iii) os suportes para as unidades motrizes. Excluindo, nesta fase inicial, os componentes de interconexão e fixação, a metodologia de projeto adotada foi sequencial, iniciando pelo desenvolvimento dos braços, seguido pela construção das placas principais e culminando na elaboração dos suportes para as unidades motrizes (DEMOLINARI, 2016).

Uma análise de modelos comerciais de estruturas de *drones* revela *insights* relevantes. As placas centrais apresentam múltiplas perfurações, pois além de servir para fixar os componentes, também ajudam na redução do peso da aeronave. Os braços representam proporção significativa das dimensões do VANT, compondo aproximadamente 40% da estrutura (DEMOLINARI, 2016)

A localização do centro de gravidade da aeronave desempenha papel fundamental em assegurar seu equilíbrio durante o voo. Esse ponto, determinado pela harmonização dos momentos entre a frente e a traseira da aeronave, influencia diretamente os movimentos durante as manobras. Este local é determinado pelos momentos gerados em torno dele e pelas forças devido as diferentes massas da aeronave, requerendo a adoção de um ponto de referência para representá-lo (GONÇALVES, 2016).

Os momentos gerados em torno do CG são notados a partir de um plano tridimensional, as rotação nos eixos x, y e z são chamada de Rolamento (*Roll*), Arfagem (*Pitch*) e Guinada (*Yaw*), conforme a Figura 3.5. Os controladores das aeronaves, elementos como: *aileron*, profundor, leme e *flaps*, fazem os movimentos em torno dos eixos acontecerem. O cálculo do CG é dado através da razão entre o somatório dos momentos gerados e a massa total da aeronave (CORREA, 2019).

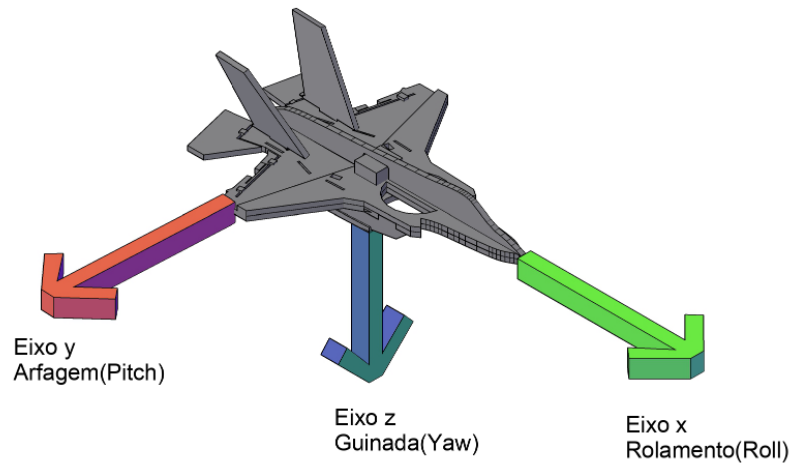


Figura 3.5 - Definição dos eixos da aeronave.

Fonte: Autores, 2024.

O CG demanda atenção especial quando se trata de otimizar o desempenho da aeronave. É importante manter os componentes mais próximos ao centro e distribuir o restante das massas de maneira igual nos extremos. Caso a distribuição fique de forma desproporcional, com mais peso em alguma parte específica, o desequilíbrio vai sobrecarregar os motores. Esses aspectos comprometem a qualidade do voo, além de aumentar o consumo de bateria.

As disposições dos motores nos braços é muito importante, principalmente em modelos que não tem uma simetria exata. Devido ao torque gerado por esses componentes, o desbalanceamento da estrutura vai ocasionar perdas de estabilidade, interferindo na qualidade do voo e podendo acarretar danos físicos a aeronave (ROSA, 2018).

3.3 Hélices

As hélices são vitais para a construção dos *drones*, com seu formato impactando diretamente no empuxo do sistema propulsor. Sua qualidade é influenciada pela combinação com diferentes motores e é determinada por parâmetros como: i) o diâmetro, ii) o número de pás, iii) o passo, iv) a relação de área estendida, v) a área do disco, vi) o ângulo de caimento, vii) o perfil da pá (KAMIENSKI et al., 2016). Em aeronaves híbridas, que combinam tecnologias de propulsão elétrica e a combustão, as hélices híbridas desempenham papéis críticos. Estas hélices são projetadas para otimizar o desempenho em modos de propulsão variados, equilibrando a necessidade

de eficiência aerodinâmica com as demandas energéticas distintas de cada modo de operação, assegurando assim a máxima eficiência e versatilidade em diferentes cenários de voo (ALMEIDA et al., 2023).

Na indústria aeronáutica alguns modelos são percebidos. As hélices de passo fixo, modelo fabricado com ângulo definido, é composta por uma única peça. É ideal para aeronaves de baixo rendimento que buscam apenas eficiência de voo. Hélices de passo controlável já permitem a variação dos ângulos das pás, porém essa variação é feita apenas com a aeronave parada e de forma manual. Tal característica é superada por hélices automática, onde durante o voo, as pás são ajustadas de forma automática, se adequando as condições de voo.

A integridade estrutural das hélices é de extrema importância diante das forças aplicadas durante sua operação. Lâminas incapazes de suportar essas forças enfrentam o risco iminente de deformações ou rupturas, o que pode resultar na perda de eficiência ou mesmo na inutilização do equipamento. Durante a rotação, as hélices são submetidas a forças centrífugas, de torção e flexão. A força centrífuga atua afastando as pás para fora do cubo, enquanto as forças de flexão, geradas pelo torque do ar e pelo deslocamento horizontal da aeronave, tendem a curvar as pás em direções opostas. Simultaneamente, a força de torção aerodinâmica induz maior torção nas pás, pois o centro de rotação está na linha média elástica, enquanto o centro de pressão se situa mais próximo do bordo de ataque, aumentando assim a torção aerodinâmica (CARNEIRO et al., 2022).

As hélices, como elementos essenciais das aeronaves, passaram por mudanças significativas. Essas transformações não se limitaram apenas ao *design*, mas também aos materiais empregados, tais como: i) madeira, ii) ligas de alumínio, iii) fibra de carbono. Apesar das hélices de madeira serem mais suscetíveis às variações climáticas, ainda representam opção atrativa em termos de custo-benefício. O alumínio, cujo desenvolvimento foi impulsionado pelos compósitos, oferece resistência e leveza, tornando-se a escolha superior em relação ao custo e à qualidade de voo. A fibra de carbono, mais leve e resistente que o alumínio, proporciona maior durabilidade, além de serem mais fáceis de realizar reparos (CARNEIRO et al., 2022).

3.4 Superfícies de controles

Os controladores são peças fundamentais na estrutura da aeronave, incumbidos de realizar e coordenar seus movimentos. Os movimentos são executados a partir dos eixos longitudinais (*aileron*s), lateral (profundor) e vertical (leme). A precisão no

controle da aeronave está diretamente ligada à precisa atuação dessas superfícies, determinando sua capacidade de manobra e estabilidade durante o voo (PIMENTEL et al., 2016)

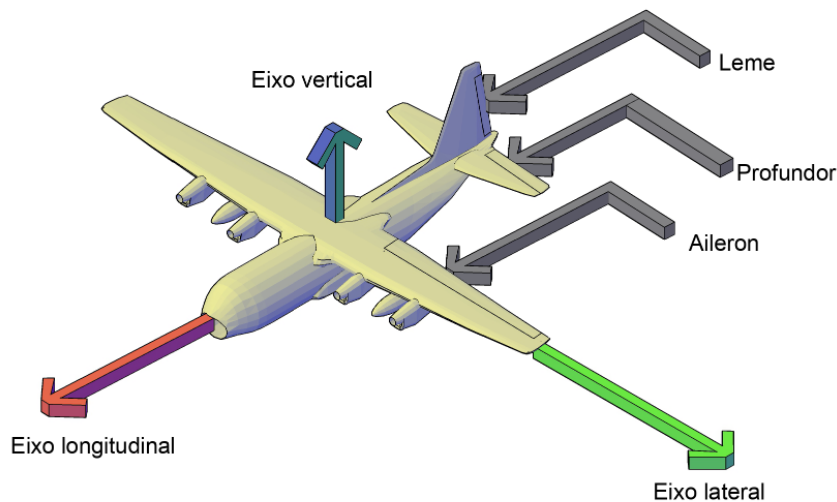


Figura 3.6 - Superfícies de Controles.

Fonte: Autores, 2024.

Localizados nas asas das aeronaves, os *aileron*s operam tipicamente em direções opostas, gerando diferenciação nas forças de sustentação. Essa diferenciação resulta na inclinação da aeronave, impactando diretamente na realização das curvas. O profundor é responsável por inclinar a aeronave nos sentidos para baixo e para cima. O leme por sua vez é o responsável por girar a aeronave, tanto no sentido horário, quanto no sentido anti-horário (PIMENTEL et al., 2016). Os *flaps*, elementos que também se encontram na parte posterior das asas, aumentam a sustentação em momentos que o veículo está com velocidades mais baixas, se tornando ideal para VTOL, pois aumenta a estabilidade e proporciona mais qualidade de voo.

3.5 Elementos de sustentação e repouso

Os componentes de sustentação assumem funções importantes nas aeronaves. São responsáveis por suportar a complexa estrutura e facilitar sua movimentação no solo. Durante o processo de pouso, desempenham o papel de dissipar toda a energia de impacto através das rodas e amortecedores. A complexidade dessa estrutura é acentuada pela necessidade de simultaneamente garantir robustez e leveza. Essas características são essenciais para evitar interferências durante a decolagem, sendo

muito importante a precisa dimensão desses elementos (ABELING, 2016).

3.6 Considerações finais

As estruturas dos *drones* tornaram-se mais leves e robustas devido ao avanço dos materiais compostos. Essas características são importantes para o progresso desses modelos, pois desencadeiam melhorias em outros componentes, além de aumentar as áreas de aplicações que essas aeronaves atuam. A variedade de VANT disponíveis atualmente inclui uma gama diversificada de tecnologias e dispositivos inteligentes, conforme é discutido no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 4

ESTRUTURA ELETRÔNICA

No capítulo dedicado à estrutura eletrônica dos *drones*, será discutida a análise dos atuadores e sensores empregados nesses dispositivos. Nas próximas seções, será explicado o funcionamento de alguns elementos importantes, abordando suas composições e a lógica subjacente que permite o voo e o pouso preciso dessas aeronaves.

4.1 Atuadores e sensores

As estruturas eletrônicas de *drones* são compostas por atuadores e sensores. Os atuadores são responsáveis por realizar ações físicas, através do sistema motopropulsor e servos motores. Os sensores por sua vez, coletam informações da aeronave e do ambiente. O intermediador desse sistema é o controlador de voo, que por meio dos sinais recebidos, faz o processamento dos dados e designa ações para os atuadores. Esse sistema complexo é necessário para garantir voos precisos e de qualidade.

4.1.1 Motores

Os multirotores são impulsionados por motores elétricos do tipo *brushless*, que são caracterizados pela sua alimentação em corrente contínua e pela ausência de escovas para realizar a mudança de polaridade em seus enrolamentos. Estes motores consistem em uma parte móvel, o rotor, onde está localizado os ímãs permanentes, e uma parte fixa, o estator, composto por uma série de enrolamentos de fio condutor. A interação entre a corrente elétrica que flui através dos enrolamentos e o campo magnético gerado pelos ímãs do rotor resulta na rotação do motor (MOGENSEN, 2016).

Os motores com ímãs permanentes são classificados como: i) corrente contínua (CC), ii) corrente contínua sem escova (*Brushless Direct Current*-BLDC), iii) corrente alternada (CA) síncronos. A popularidade desses motores na aeronáutica deve-se a sua eficiência durante os voos, além de serem leves e compactos. A ausência das escovas nesses componentes permitem reduzir significativamente a quantidade de manutenções, prolongando a vida útil do motor (FERNANDES, 2013). O motor BLDC se caracteriza por possuir três terminais para passagem de corrente, esse modelo é alimentado por meio do controlador que realiza a comutação das bobinas.



Figura 4.1 - Motor Brushless.

Fonte: Jefferson Silva de Souza, 2019.

Para a identificação do BLDC, os fabricantes seguem uma estrutura padrão para facilitar a escolha do motor ideal. De acordo com a figura 4.1, a etiqueta informa o número 2212-1000KV, os primeiros números (2212) indicam as medidas do estator, sendo 22mm o diâmetro e 12mm a altura. O segundo número indica o número de rotações por minuto que o motor pode realizar por cada volt de eletricidade aplicado. Nesse caso 1000RPM a cada 1V. Existem diversos modelos de BLDC no mercado, com diferentes potências (GIANNICO, 2021).

Motores a combustão também são encontrados em *drones*. Embora seu uso seja limitado por possuir massa elevada, eles destacam-se no aumento significativo do tempo de voo. Isso ocorre devido à densidade energética superior dos combustíveis em comparação com baterias convencionais. Alguns estudos demonstram a viabilidade desta abordagem em configurações específicas de multirrotores, evidenciando novas dimensões nas estratégias de geração de energia para *drones* (BARBOSA et al., 2020).

4.1.2 Controlador eletrônico de velocidade

O controlador eletrônico de velocidade, é essencial para o monitoramento da velocidade de rotação dos motores, bem como para a direção e atuação como freio dinâmico. Composto por um circuito integrado, ele atua como intermediário entre o controlador de voo e os motores. O ESC conecta-se ao controlador de voo por meio de três cabos, responsáveis por fornecer alimentação e transmitir o sinal de controle.

Cada motor necessita do controlador de velocidade, atualmente existem placas com saída para até quatro motores. Nas especificações é possível obter a corrente necessária para o funcionamento correto desses atuadores. A sincronização entre o motor e o ESC é fundamental, exigindo precisão devido à alta taxa de alteração do sinal recebido (SANTOS, 2016).

4.1.3 Servo motor

Os servo motores são os atuadores responsáveis por movimentar as superfícies de controle. Destacam-se por suas habilidades em posicionar o braço de forma específica e mantê-lo estável, mesmo sob a influência de forças externas em diferentes direções. Esses atuadores rotativos ou lineares são empregados em variadas aplicações que demandam controle preciso de velocidade. Os servo motores atuam garantindo o torque necessário para a deflexão das superfícies de controle, sendo crucial que sejam dimensionados com precisão. Para garantir o movimento correto da aeronave (MARTINS et al., 2019).

Esse dispositivo possui integrado na sua estrutura: i) o motor CC, ii) o dispositivo de detecção de posição, iii) engrenagens, iv) circuito de controle. O seu funcionamento ocorre por meio de sinais de entrada no formato de modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*-PWM). Esse sinal de alta tensão varia entre 1 e 2 milissegundos, alterando a posição do eixo do servo conforme a largura do pulso, ou seja, 1 milissegundo indica a posição angular 0° do servo, 1,5 milissegundos indicam a posição angular 90° e por fim 2 milissegundos indicam a posição angular 180° (SILVA et al., 2018).

4.1.4 Acelerômetros e giroscópios

O sensor MPU6050 é ideal para aeronaves compactas, sua configuração incorpora acelerômetros e giroscópios no plano tridimensional. Sua precisão é assegurada através dos conversores digitais-analógicos que convertem os sinais captados em sinais digitais para o microcontrolador. Garantindo assim a estabilidade da aeronave durante o voo. Utilizando esse dispositivo, torna-se viável estimar os ângulos de rolagem e arfagem de um corpo em relação ao sistema de referência. As variações do vetor de aceleração da gravidade são mapeadas nos eixos X, Y e Z do acelerômetro, fazendo-se necessário que esse sensor fique posicionado no CG da aeronave (SILVA et al., 2015).

A configuração e a quantidade de sensores influenciam o espaço de navegação e a

amplitude de movimento de um objeto. Nesse contexto, o dispositivo composto por um acelerômetro de três eixos e um giroscópio de três eixos proporciona o total de seis graus de liberdade. Este dispositivo inclui um acelerômetro de 16 bits, com opções de faixa de 2g, 4g, 8g ou 16g, e um giroscópio de 16 bits, com faixa de 250 a 2000°/s (SANTOS et al., 2016).

4.2 Força e módulos de processamento e controle

A próxima seção aborda as fontes de tensão frequentemente encontradas em *drones*. Estes componentes cruciais nas aeronaves, são imprescindíveis para o funcionamento adequado e a condução segura dos voos. Compreender a operação e a interação entre esses elementos asseguram o desempenho otimizado, além de contribuir para a qualidade de voo.

4.2.1 Fontes de tensão

As baterias são componentes que transformam energia química, armazenada em materiais ativos, em energia elétrica através de reações oxidação-redução. Originárias do início do século XX, com as baterias de chumbo-ácido representando as precursoras nesse campo, estas unidades de armazenamento energético são categorizadas em dois tipos fundamentais: primárias (não recarregáveis) e secundárias (recarregáveis). O foco deste estudo recai sobre as baterias secundárias, notavelmente por sua relevância em aplicações de alta demanda energética como os *drones*, onde a utilização de baterias primárias seria economicamente inviável (BARBOSA et al., 2020).

As baterias de íons de lítio, ou baterias LI-on/LIPO, são dispositivos de armazenamento de energia que utilizam sal de lítio como eletrólito. Estas baterias são conhecidas por sua leveza, capacidade de serem fabricadas em variados tamanhos e formas, e por apresentarem alta densidade energética. A alta taxa de descarga dessas baterias é fundamental para atender às demandas energéticas dos motores elétricos de VANT. A capacidade de armazenamento de carga da bateria LIPO está diretamente relacionada ao número de células que a compõem. A tensão indicada para o armazenamento desse modelo é 3,7V, os números de células são identificados como: 1S, 2S, 3S, assim suscetivamente até arranjos com 10 células. Portanto uma bateria 3S terá $(3,7+3,7+3,7)$ 11,1V (GIANNICO, 2021).

As baterias de lítio ganharam destaque nas últimas décadas, especialmente com a ascensão dos dispositivos móveis. O desenvolvimento contínuo em tecnologias de lítio, particularmente em relação à segurança, tem sido fundamental. As baterias Li-ion

e lítio-polímero (LiPo) dominam o mercado devido à sua alta densidade energética e segurança aprimorada, apesar dos desafios associados ao risco de acidentes se mal manuseadas (BARBOSA et al., 2020).

4.2.2 Controlador de voo

O controlador de voo, considerado o cérebro da aeronave, é responsável pela operação adequada dos motores para atingir o movimento desejado. Este dispositivo complexo inclui várias entradas e saídas, além de sensores integrados que determinam a posição da aeronave em tempo real. O controlador processa informações dos sensores e instruções de direção, transmitindo comandos precisos aos motores. Muitos controladores modernos incorporam uma Unidade de Medição Inercial (*Inertial Measurement Unit*-IMU), que mede a velocidade, orientação e forças gravitacionais atuantes na aeronave, tornando os multirotores dispositivos de voo inteligente (JESUS; SIMOES, 2021).

Os controladores de voo emergem como elementos centrais na arquitetura de *drones*, desempenhando papel integral no gerenciamento de baixo nível destas aeronaves. Essa gestão é efetivada primordialmente pela análise metódica e mapeamento de sinais, dados dos sensores, além daqueles emanados por controle via rádio. Estes sinais são transmutados em comandos que são dinamicamente direcionados aos motores (JESUS; SIMOES, 2021).

O desenvolvimento de sistemas de controle de voo para *drones* está na vanguarda da inovação tecnológica, incorporando desde algoritmos Proporcional, Integral e Derivativos (PID) tradicionais até abordagens mais avançadas baseadas em redes neurais e inteligência artificial. A capacidade de adaptar-se a ambientes dinâmicos e complexos, juntamente com a modularidade e flexibilidade dos sistemas, são cruciais para avançar no campo dos Veículos Aéreos Não Tripulados, seja em aplicações práticas ou em contextos de simulação avançada.

4.2.3 Rádio-controle

O sistema de rádio-controle, composto por um par de transmissor e receptor, faz parte dos componentes essenciais para o controle de aeronaves. Esses dispositivos atuam emitindo sinais por ondas de rádio (transmissor) que são recebidos (receptor) e enviados para os microcontroladores (WARDYOY et al., 2022). A configuração de transferência e recepção dos dados é realizada através dos canais do rádio, a quantidade de canais varia de acordo com cada modelo. A operação do rádio controle

pode ser realizada tanto de forma manual, com operador, tanto como automática por meio de bases no solo (RANGEL et al., 2009).

Os transmissores modernos destacam-se pela sua multifuncionalidade, oferecendo gama diversificada de recursos. Dispositivos equipados com múltiplos canais não se limitam apenas ao controle dos movimentos fundamentais da aeronave; eles estendem sua capacidade para regular outros componentes essenciais, como o trem de pouso, sistema de luzes e câmeras a bordo. Os modelos mais avançados operam em diversas frequências, proporcionando conexão estável, eficiência e ampliando a segurança das operações aéreas.

O conjunto de bandas *Industrial, Scientific and Medic* (ISM), por ser uma faixa livre e sem fiscalização, teve impactos negativos no uso dos controles via rádio. O aumento exponencial no número de dispositivos que compartilham as mesmas frequências resultou em interferências e perdas de sinal especialmente em ambientes densamente povoados. Este cenário é agravado pelo fato de que tecnologias amplamente utilizadas, como *Wi-Fi* e *Bluetooth*, operam nessas faixas de frequência comuns (DEMOLINARI, 2016). Em resposta a esses desafios, houve evoluções no setor de rádio-controle, introduzindo inovações como a telemetria. Essa tecnologia permite que os pilotos monitorem dados importantes das aeronaves em tempo real, proporcionando controles mais precisos e seguros (ARAUJO, 2018).

4.3 Programação de aeronaves

A programação dos *drones* é tão importante quanto os componentes fundamentais desses dispositivos. Por meio de algoritmos complexos, os dados são recebidos, passam por processamentos detalhados, e por fim, são encaminhados com precisão aos atuadores, esses responsáveis pela execução das operações. Alguns aspectos são importantes na programação e devem ser levados em consideração. São eles: i) as linguagens de programação, ii) os tipos de controles que vão ser implementados, iii) os protocolos de comunicações.

4.3.1 Linguagens de programação

Os tipos de linguagens de programação (LP) são partes importantes que interferem diretamente nas aplicações das aeronaves. Sua escolha depende da compatibilidade do programador e dos tipos de tarefas que serão realizadas. A linguagem C e sua derivada C++ são comumente utilizadas por suas variadas aplicações e capacidades. O *python* por sua vez, se caracteriza por sua simplicidade, além de executar tarefas

de alto nível.

Caracterizada como uma linguagem de propósito geral, a linguagem C foi inicialmente desenvolvida para programação de sistemas operacionais. Sua flexibilidade e eficiência conferem-lhe uma notável adaptabilidade a diversas aplicações, sendo crucial na programação estruturada (JUNIOR et al., 2005). Com base em C, surgiu sua derivada C++, com alta compatibilidade com *hardwares*, essa LP orientada a objeto permitiu a implementação eficiente de variadas soluções. Enquanto a linguagem C permanece como ferramenta poderosa para manipulação de bits, bytes e estruturação de dados, o C++, com sua extensão orientada a objetos, proporciona conjuntos robustos de recursos para lidar com projetos mais complexos e exigentes (ALBIERO; BIASI, 2016).

Na programação dos *drones*, essa LP de baixo nível é a melhor opção, pois envolve a coordenação direta do *hardware* e o *firmware* do *drone*. A programação de baixo nível abrange operações fundamentais, como a leitura de dados da unidade de medição inercial (Inertial Measurement Unit-IMU) para manter a aeronave estável no ar, a monitoração contínua dos níveis da bateria e a interpretação dos bytes de entrada do receptor de rádio (ALBIERO; BIASI, 2016).

O *python* se caracteriza por sua quantidade de bibliotecas dedicadas à análise de dados e possuir comunidades robustas de usuários ativos. Sua linguagem interativa e dinâmica justifica sua popularidade no âmbito das grandes empresas. Com a capacidade de analisar grandes quantidades de dados de forma eficiente, além da facilidade de aprendizagem, tornam essa LP ideal para aplicações com inteligência artificial (OLIVEIRA, 2021).

O uso do *python* na programação de *drones* é evidenciado ao considerarmos a segunda camada de programação, correspondente a linguagem de alto nível desses dispositivos aéreos. Ao tratar o VANT como unidade integrada, essa LP permite operações de alto nível, como: comandos para decolagem, navegação entre pontos pré-programados, manutenção de altura e seguimento de objetos. A linguagem *python*, por sua intuitividade e dinâmica, se torna opção atrativa, visto que a Linguagem C e C++ de alto nível é mais complexa (BARBOSA; PERICO, 2019).

4.3.2 Lógicas de controles

As lógicas de controle desempenham funções importantes na operação eficiente de sistemas dinâmicos como *drones*. A classificação inicial dos sistemas de controle

é baseada na escolha entre malha aberta e malha fechada. Na primeira, a ação de controle é independente da saída, os comandos de controle são emitidos sem levar em conta a saída real do processo, permitindo variações livres sem *feedback* imediato. Em contraste, sistemas de malha fechada operam com pontos de referências, ajustando automaticamente os comandos de controle para alcançar esse referencial. Esse ajuste é influenciado pela realimentação da lei de controle implementada (TEIXEIRA et al., 2010).

Apesar de serem menos complexos e mais econômicos, sistemas de malha aberta podem ter limitações na compensação de perturbações. Já em sistemas de malha fechada, a saída impacta diretamente na ação de controle, buscando atingir o valor desejado para a variável controlada. Sensores convertem as variáveis controladas em sinais elétricos, fornecendo entradas aos controladores, que acionam os atuadores para intervir no processo. A escolha entre malha aberta e malha fechada é determinada pelas exigências específicas do sistema, considerando fatores como complexidade, custo e capacidade de resposta a perturbações (TEIXEIRA et al., 2010).

4.3.3 Controle Proporcional Integral Derivativo

O Controlador PID é uma estratégia de controle sistemático amplamente utilizada no setor industrial, reconhecida por sua eficiência em diversas condições operacionais e por sua estrutura funcional intuitiva. O algoritmo incorpora três componentes essenciais: o coeficiente proporcional, o coeficiente integral e o coeficiente derivativo (GASPARINO, 2014). O controlador proporcional-derivativo (PD) e o controlador Proporcional-Integral (PI) são sistemas de controle com duas ações distintas, sendo que o controlador PD combina ações proporcional e derivativa. Na ação de controle derivativa desse controlador, a resposta está ligada à taxa de variação do erro do sistema (MORAIS, 2017).

A aplicação do controlador PID em VANT ilustra a utilização desta técnica em sistemas dinâmicos e complexos. A interação entre os coeficientes PID e as variáveis dos *drones* exige calibrações precisas, possibilitando controle efetivo da estabilidade e manobrabilidade do aparelho. O processo de ajuste dos parâmetros é fundamental e requer entendimento profundo tanto da dinâmica desses dispositivos quanto dos princípios de controle, garantindo assim desempenho ótimo e respostas adaptativas a variações no ambiente ou na carga (GASPARINO, 2014).

4.3.4 Controle Proporcional Derivativo

O conceito de tempo derivativo no controlador PD é um aspecto chave, representando o avanço temporal introduzido pela ação derivativa. Este parâmetro permite que o controlador preveja e reaja a mudanças futuras no erro do sistema, o que é fundamental para aprimorar a estabilidade e a resposta dinâmica do sistema (MORAIS, 2017).

É importante salientar que a ação de controle derivativa não é utilizada isoladamente, pois ela atua sobre a taxa de variação do erro e não diretamente sobre o erro em si. Se o erro for constante, a saída do controlador derivativo puro seria inexistente. Por essa razão, a ação derivativa é geralmente empregada em conjunto com a ação proporcional, resultando no controlador PD. Este controlador é frequentemente combinado com a ação integral para formar o controlador PID, que é amplamente utilizado em várias aplicações industriais devido à sua eficácia em lidar com diferentes tipos de erros e perturbações do sistema (MORAIS, 2020).

O impacto da ação derivativa é particularmente notável no regime transitório do sistema, onde pode efetivamente moderar a velocidade de variação da variável controlada. Isso é essencial para evitar flutuações rápidas e excessivas na resposta do sistema a perturbações externas ou durante o início do processo. Em resumo, a inclusão da ação derivativa no controlador proporciona mecanismos de previsão e resposta rápida, melhorando significativamente a estabilidade e a precisão do controle em diversas gamas de aplicações (MORAIS, 2017).

4.3.5 Controle *Fuzzy*

O termo *fuzzy* reflete a habilidade de lidar com informações que são incertas, imprecisas ou ambíguas, semelhantes à forma como os humanos processam informações e tomam decisões em condições de incerteza (JÚLIO, 2010). Esse controlador possui abordagens inovadoras em sistemas de controles. Fundamentada na imitação do raciocínio humano, abrange as nuances e a adaptabilidade características do pensamento humano. Esta técnica integra a lógica de multi-valores, aspectos da teoria probabilística e princípios de inteligência artificial para simular de maneira eficaz o processo de tomada de decisão humano (MORAIS, 2020).

Em contraste com os sistemas de controle tradicionais, que se baseiam em modelos matemáticos, o *fuzzy* se concentra na modelagem das ações derivadas do conhecimento empírico de especialistas. Ele utiliza termos linguísticos, descrições verbais e

conceitos que podem ser vagos ou imprecisos, como: quente, frio, rápido, ou lento, para definir regras e diretrizes de controle (MORAIS, 2020). Essa lógica representa abordagens revolucionárias no campo do controle automático. Especialmente em situações onde modelos matemáticos precisos não estão disponíveis ou são inadequados (JÚLIO, 2010).

4.3.6 Controle híbrido *Fuzzy*-PID

A implementação de controladores PID em sistemas supervisórios enfrenta desafios, particularmente no que tange à limitação de ajustes paramétricos automatizados. Nesse contexto, o PID regula exclusivamente as variáveis do processo, demandando intervenções manuais por parte de operadores para a recalibração dos coeficientes de controle, especialmente quando desvios são identificados em relação à trajetória operacional predefinida (MORAIS, 2017).

Solução promissora para esses desafios é a integração da lógica *Fuzzy* ao sistema PID. Esta abordagem permite que o controle supervisório seja executado pela lógica *fuzzy*, suplantando a necessidade de intervenção humana. Esta sinergia não apenas potencializa a capacidade do sistema de manejar ambientes não-lineares, mas também habilita a configuração dos parâmetros de controle com base na expertise de especialistas. Assim, dispensam as exigências de modelos matemáticos explícitos das plantas. As inferências decorrentes da lógica *fuzzy*, derivadas do acervo cognitivo de especialistas, podem ser aplicadas para a gestão eficaz das variáveis de saída, culminando em sistemas de controles autônomos, ágeis e eficientes (MORAIS, 2017).

O modelo exemplar dessa metodologia é o esquema de controle híbrido *Fuzzy*-PID. Neste arranjo, o controlador *fuzzy* assume a supervisão da saída do processo. O PID, processa os dados de erro entre a saída real e o *setpoint* desejado e executa o controle do sistema com base nos ajustes propostos pelo *fuzzy*. O controlador *fuzzy* supervisório tem a função de detectar e comunicar os ajustes necessários para corrigir quaisquer discrepâncias, garantindo assim o controle preciso e adaptativo do processo (MORAIS, 2017).

4.4 Considerações finais

Os componentes eletrônicos associados a programação permitem o funcionamento correto do VANT. A sinergia entre *hardware e software*, não apenas otimiza o controle, mas também amplia as possibilidades de implementação de recursos avançados. As etapas de integração dos componentes juntamente com os sistemas de proces-

samento e controle serão detalhados no capítulo seguinte, consolidando o que foi descrito nos capítulos anteriores.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

No presente capítulo, é descrito a metodologia de projeto empregado na criação do *drone* VTOL, inspirado na aerodinâmica e nas funcionalidades do jato militar F-35 e no projeto de Nicholas Rehm. Esse modelo capaz de decolar e pousar verticalmente possui características únicas. Sua carcaça conta com uma turbina posicionada atrás da cabine que facilita a elevação da aeronave, além de tubos de apoio centralizados para a descida vertical equilibrada.

5.1 Etapas do projeto

O processo de construção dessa aeronave desenvolve-se de maneira estruturada, como pode ser observado no fluxograma da Figura 5.1. Com base no propósito do projeto, inicia-se a busca de componentes que atendam a esse requisito, em sequência tem-se a junção das partes mecânicas, que abrigam os componentes elétricos e eletrônicos. Com a junção dessas partes, o modelo ganha forma, permitindo iniciar a fase de programação, na qual deve ser ajustada precisamente para garantir voos de qualidade e evitar danos a estrutura física.

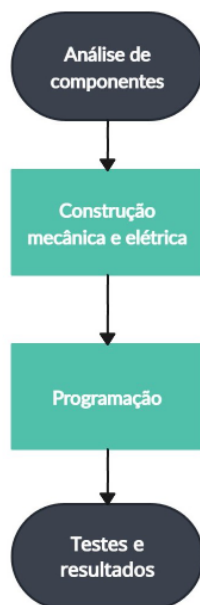


Figura 5.1 - Fluxograma de etapas do projeto.

Fonte: Autores, 2024.

5.1.1 Construção eletromecânica

Esta parte do projeto é dedicada a construção mecânica e eletrônica, focando em alcançar eficiência aerodinâmica e minimizar o peso da aeronave. Análises meticolosas são realizadas para garantir que o *design* proposto seja viável em termos de dinâmica de voo e integridade mecânica. O dimensionamento do sistema do *drone* leva em conta alguns componentes como base, como é o caso dos motores. Esse componente determina o modelo de hélices, o controlador de velocidade, além da bateria. As características desses elementos são importantes para garantir o funcionamento correto do dispositivo.

5.1.1.1 Montagem da estrutura

Dentre os variados materiais analisados para a construção deste projeto aeronáutico, o Depron emergiu como a escolha mais adequada devido às suas propriedades distintas. Este material é altamente valorizado por sua combinação ideal de resistência, flexibilidade e rigidez, características essenciais para a construção de aeronaves que exigem precisão e eficiência aerodinâmica. O Depron não apenas atende aos requisitos estruturais do projeto, mas também contribui significativamente para a otimização do desempenho geral.

A fase de construção iniciou-se com o recorte das peças individuais, seguida pela meticolosa etapa de colagem em molde especialmente projetado. Este processo foi executado com extrema precisão, garantindo que cada componente se alinhasse perfeitamente, respeitando as especificações técnicas do projeto. A sobreposição de algumas partes foi realizada de maneira estratégica, visando alcançar estabilidade e resistência, o que é crucial para manter a integridade estrutural e aerodinâmica da aeronave.

Os elementos de controle foram integrados por meio de dobradiças de *nylon*, o que proporciona movimentos suaves e seguros, inibindo as vibrações e permitindo os servo motores atuarem de forma precisa. O uso das dobradiças proporciona graus maiores de liberdade as superfícies de controle, assim as curvas e manobras são executadas rapidamente.

5.1.1.2 Elementos de sustentação

A parte importante nesta fase é a incorporação de suportes para pouso, essenciais para operações seguras de decolagem e aterrissagem. Estes suportes são fabricados utilizando a impressora 3D Ender, essa escolha inovadora permite flexibilidade no

design e redução de custos. O material escolhido para impressão desses suportes é o Ácido Polilático (*Polylactic Acid-PLA*), esse termoplástico biodegradável é derivado de recursos renováveis, como amido de milho ou cana-de-açúcar. O PLA é conhecido por sua facilidade de impressão, baixa contração durante o resfriamento, e relativa resistência, sendo ideal para a produção de peças leves e duráveis, como os suportes de pouso do VANT.

Esse material contribui não apenas para a eficiência do projeto, mas também para sua sustentabilidade ambiental. Além disso, o projeto inclui suportes específicos para a movimentação dos *flaps* e do profundor, elementos de controle e estabilidade da aeronave durante o voo. Estes suportes são projetados para otimizar a resposta dos componentes aerodinâmicos, garantindo a pilotagem precisa e segura. A integração desses suportes, impressos com a mesma tecnologia 3D e material PLA, asseguram harmonia estrutural e funcional com o resto do *drone*, enfatizando a inovação e eficiência deste projeto de engenharia.

O projeto da aeronave também incorpora fios de sustentação de alta qualidade, que auxiliam na transmissão de forças mecânicas dos servomotores para os *flaps* e o profundor. Esses fios foram selecionados por suas propriedades únicas: são leves, resistentes e possuem uma flexibilidade moderada, que permitem ser moldados conforme as necessidades do projeto. Esta flexibilidade é importante para garantir que os fios possam se adaptar às diversas configurações durante o voo, sem comprometer a integridade ou a eficiência do sistema de controle. Ao conectar os servomotores aos elementos de controle aerodinâmico, esses fios possibilitam a movimentação precisa da aeronave nos eixos X, Y e Z, fundamental para a manobrabilidade e estabilidade. A escolha desses fios reflete o compromisso do projeto em alcançar equilíbrio entre leveza, resistência e aerodinâmica.

O centro de gravidade é fator importante em qualquer aeronave, pois afeta diretamente a estabilidade e a manobrabilidade durante o voo. O cálculo do CG é realizado através de uma fórmula específica, que considera a distribuição de massa de todos os componentes do *drone*. Essencialmente, o CG é o ponto onde o peso está equilibrado em todas as direções. A fórmula geral para calcular o CG é:

$$CG = \frac{\sum(\text{peso} \cdot \text{distância})}{\sum \text{peso}} \quad (5.1)$$

Para a determinação deste ponto, os componentes não devem estar inseridos na estrutura, é determinado somente a localização desses dispositivos. O peso refere-

se à massa de cada componente, a distância é obtida através do intervalo de cada elemento ao ponto de referência. No projeto o CG foi calculado com precisão, como ilustrado na Figura 5.2, para garantir um voo estável e controlado.

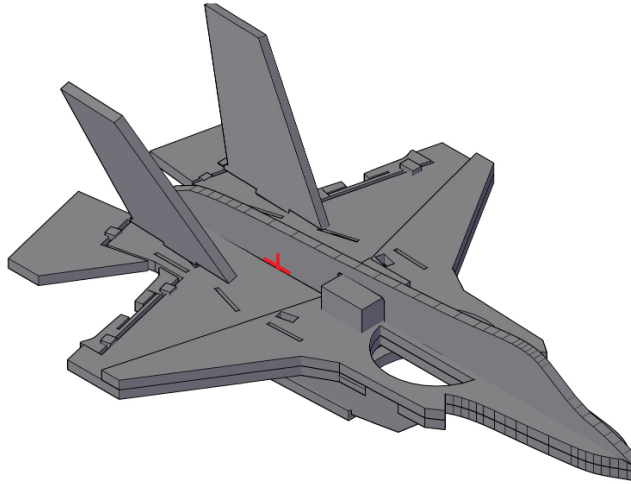


Figura 5.2 - Centro de massa da aeronave calculado.

Fonte: Autores, 2024.

5.1.1.3 Sistema de propulsão e controle

A escolha dos motores *brushless Aeolus 2207 2550KV* para o projeto foi fundamentada em suas características técnicas, que os tornam ideais para aplicações que exigem alta potência, velocidade e leveza. Estes motores são conhecidos por sua eficiência e alta rotação, sendo capazes de girar a 2550RPM por volt aplicado, proporcionando forças de empuxo significativa. Esta alta taxa de rotação é especialmente benéfica para *drones* que necessitam de movimentos rápidos e ágeis, permitindo controle preciso e resposta imediata aos comandos.

Além disso, o design compacto e leve desses motores contribui para a eficiência geral, mantendo o peso ao mínimo sem comprometer o desempenho. A redução de peso é fator crucial nessas aeronaves, pois influencia diretamente a duração da bateria e a agilidade durante voo. A capacidade desses motores de gerar forças de empuxo elevadas, apesar de seu tamanho reduzido, permite que o *drone* levante e manobre com facilidade, mesmo em condições de voo mais exigentes. A combinação de alta rotação, potência e *design* compacto faz deste modelo de motor a escolha certa para projetos que buscam alto desempenho, agilidade e qualidade.

A integração desses atuadores com as hélices GF6045, é capaz de sustentar peso de aproximadamente 1,948kg, conforme fabricante. As hélices de passo fixo GF6045, é projetada para voos esportivos, possui comprimento de 6 polegadas e passo de 4,5 polegadas. A disposição estratégica do sistema de propulsão na estrutura da aeronave proporciona o equilíbrio do *drone* VTOL. O sentido de rotação dos motores é ajustado no ESC para garantir o funcionamento correto da aeronave de acordo com o modo de voo estabelecido pelo piloto via radio-controle.

Os micro servo motores, apesar do seu tamanho reduzido é capaz de executar com excelência sua função. A localização desses componentes é estabelecida de forma a aproveitar a máxima eficiência durante os movimentos mecânicos. Assim o peso do sistema motopropulsor junto ao atrito do ar durante o voo não interfere na atuação do servo motor. O ajuste de posição destes dispositivos é realizado na programação e deve atender ao modo de voo em que está programado. Durante as manobras aéreas eles atuam em conjunto, sendo necessário estar calibrados para não causar vibrações e danos a estrutura.

Os servos são conectados ao módulo PWM, pois garantem a segurança ao ESP32, além de contribuir para comunicação eficiente dos servo motores. Esses dispositivos tem alta compatibilidade com variados microcontroladores e são de fácil programação. É importante ressaltar que a conectividade desses servos ao módulo PWM não apenas assegura a estabilidade do ESP32, mas também otimiza a distribuição de carga sobre ele. Com a capacidade de suportar até 16 dispositivos, as placas oferecem solução escalável, reduzindo a sobrecarga nos microcontroladores e consequentemente, promovendo maior desempenho para o *drone*.

5.1.1.4 Sensores, dispositivos de comando e potência

A fase subsequente envolve a implementação do controlador eletrônico de velocidade. A ESC *SpeedyBee BLS 50A* foi escolhida para o projeto com três motores devido a série de características que a tornam ideal para esta aplicação específica. Sua capacidade de distribuir corrente contínua de até 50 amperes por canal é fundamental para garantir que cada motor *brushless* receba a quantidade necessária para operar eficientemente. Essa capacidade de corrente elevada é importante para aeronaves que requerem resposta rápida e potente, como é o caso do veículo VTOL, onde a agilidade e a força são primordiais. Além disso, a *SpeedyBee BLS 50A* é conhecida por sua confiabilidade e durabilidade, aspectos essenciais para garantir a segurança e a longevidade do *drone* em condições variadas de voo.

Outro aspecto a ser levado em consideração na escolha desta ESC é sua compatibilidade com a bateria LiPo, proporcionando sinergia perfeita entre a fonte de energia e o controle dos motores. A capacidade da *SpeedyBee* de gerenciar eficientemente a distribuição de energia para os motores ajuda a otimizar o desempenho do *drone*, garantindo respostas rápidas dos motores às instruções de voo e gestão eficaz do consumo de energia. Essa ESC também oferece programação flexível e é compatível com diversos tipos de motores, sendo opção versátil e adaptável para diferentes configurações e exigências, reforçando assim sua escolha.

A ESP32 WROOM-32D destaca-se em aplicações complexas e exigentes devido à sua impressionante combinação de capacidade de processamento, quantidade de portas lógicas e versatilidade em comunicação. Este módulo incorpora um poderoso microcontrolador de duplo núcleo *Tensilica Xtensa LX6*, operando em frequência de até 240MHz, tornando-o altamente capaz de executar programas longos e robustos, essenciais em projetos avançados de automação e controle. Além disso, o ESP32 oferece generosa quantidade de entradas e saída de uso geral (*General Purpose Input/Output-GPIO*), incluindo portas analógicas e digitais. Essas portas são fundamentais para a integração e controle de múltiplos componentes, como os cinco servomotores previstos no projeto, fornecendo flexibilidade suficiente para manipulação precisa e resposta rápida.

A capacidade de comunicação da ESP32 também é aspecto fundamental para sua seleção. Com suporte para *WiFi e Bluetooth*, ela oferece múltiplas opções de conectividade, essenciais para a comunicação eficaz com a ESC e outros dispositivos. Especificamente, a compatibilidade com o receptor do rádio controle *Turnigy 9X* é um ponto chave, permitindo integração sem problemas e controle remoto eficiente. A adequação da ESP32 para gerenciar as demandas de comunicação e controle em ambientes onde precisão e confiabilidade são fatores chave, como o controle dos servomotores e a gestão da ESC, justifica plenamente sua escolha, como pode ser percebido na Figura 5.3. Sua capacidade de lidar com tarefas múltiplas e complexas, mantendo a comunicação estável e eficiente, torna-a indispensável na execução de sistemas avançados de controle e automação do *drone*.

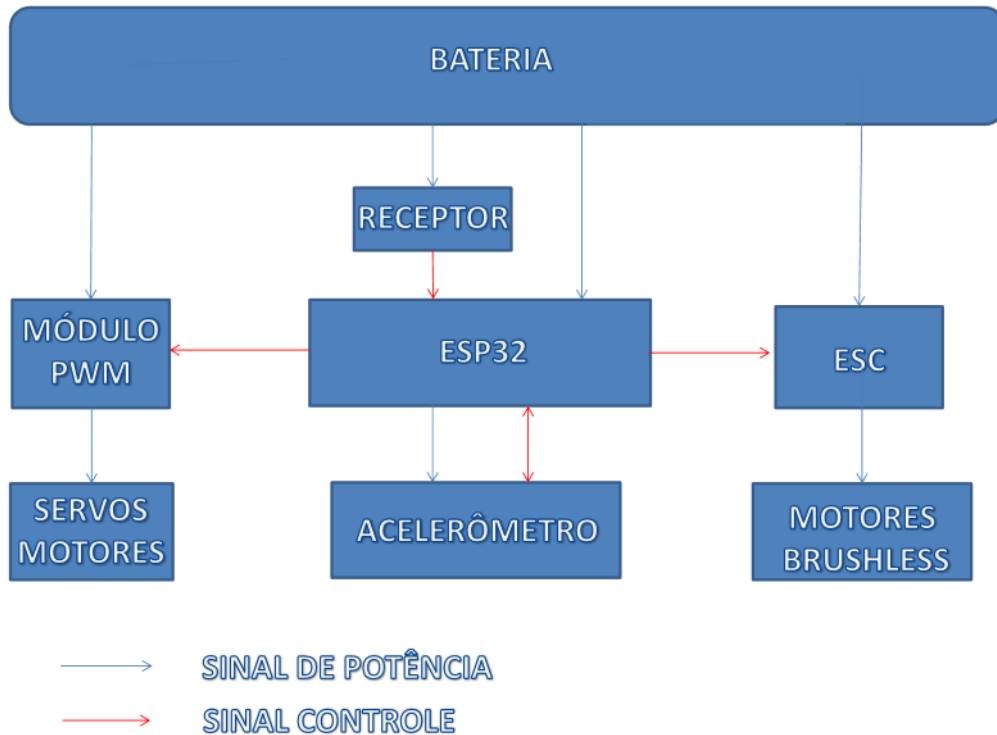


Figura 5.3 - Fluxograma de ligação ao ESP32

Fonte: Autores, 2024.

A escolha da bateria LiPo de 2000mAh para aplicações específicas baseia-se em várias características técnicas vantajosas. Primeiramente, a configuração 4S refere-se a quatro células em série, oferecendo tensão nominal de 18.8V, ideal para aplicações que exigem cargas altas, como determinados tipos de *drones*, rádio controle e ESC. A capacidade de 2000mAh indica a quantidade de carga que a bateria pode armazenar, proporcionando equilíbrio entre tamanho, peso e duração da carga para sessões de uso moderado a intenso.

A bateria foi criteriosamente selecionada para atender às demandas energéticas de do sistema que inclui três motores, cinco servos motor, um microcontrolador ESP32, um ESC e um receptor de rádio de 9 canais. Sendo capaz de fornecer energia suficiente para sustentar as operações prolongadas do *drone*. Os motores, conhecidos por sua eficiência e alta relação potência-peso, exigem fontes de energia robustas para operar em sua capacidade máxima. A capacidade da bateria garante autonomia adequada, permitindo que os motores operem por períodos suficientes sem a necessidade de recargas frequentes. Além disso, os servos motor, componentes que

realizam o controle de movimentos e orientações em diversas aplicações, requerem fontes de energia estáveis e confiáveis. A bateria oferece a corrente necessária para garantir que eles funcionem de maneira eficiente e responsiva.

A tecnologia LiPo é notável pela sua capacidade de fornecer correntes de descarga, o que é fundamental para atender às demandas dinâmicas de carga. Sendo responsável por alimentar a unidade de controle ESP32 e o receptor de rádio. O ESP32, como microcontrolador sofisticado, requer fontes confiáveis para seu desempenho otimizado, especialmente em aplicações que demandam processamentos avançados de dados e conectividade. O receptor de rádio, responsável por realizar a comunicação com o controle remoto, também se beneficia da fonte de energia estável fornecida pela bateria LiPo. Esta escolha assegura que o sistema como todo funcione de maneira integrada e eficiente, com todos os componentes recebendo a energia adequada para seu funcionamento ideal.

5.1.2 Programação

A programação do *drone* é composta por composições sofisticadas de instruções e procedimentos que coordenam a funcionalidade e manobrabilidade da aeronave. No cerne desta engrenagem digital está o ESP32, poderoso microcontrolador de sistema em um chip (*System-on-a-Chip-SoC*) que aloca e executa o software de controle. Este SoC é responsável por interpretar os comandos do usuário e traduzi-los em ações mecânicas precisas, permitindo respostas de forma ágil e estável aos sinais de entrada recebidos.

A análise subsequente desse sistema de programação oferece a exploração aprofundada das várias camadas de operação, desde o início da sequência de voo até o processamento de dados dos sensores e a execução dos comandos. Com estruturas de análises meticulosas, é possível compreender melhor cada componente interativo que compõe o sistema de voo automatizado, como observado na Figura 5.4. Destacando a sinergia entre hardware e software que permite que essas máquinas complexas voem com tanta eficiência.

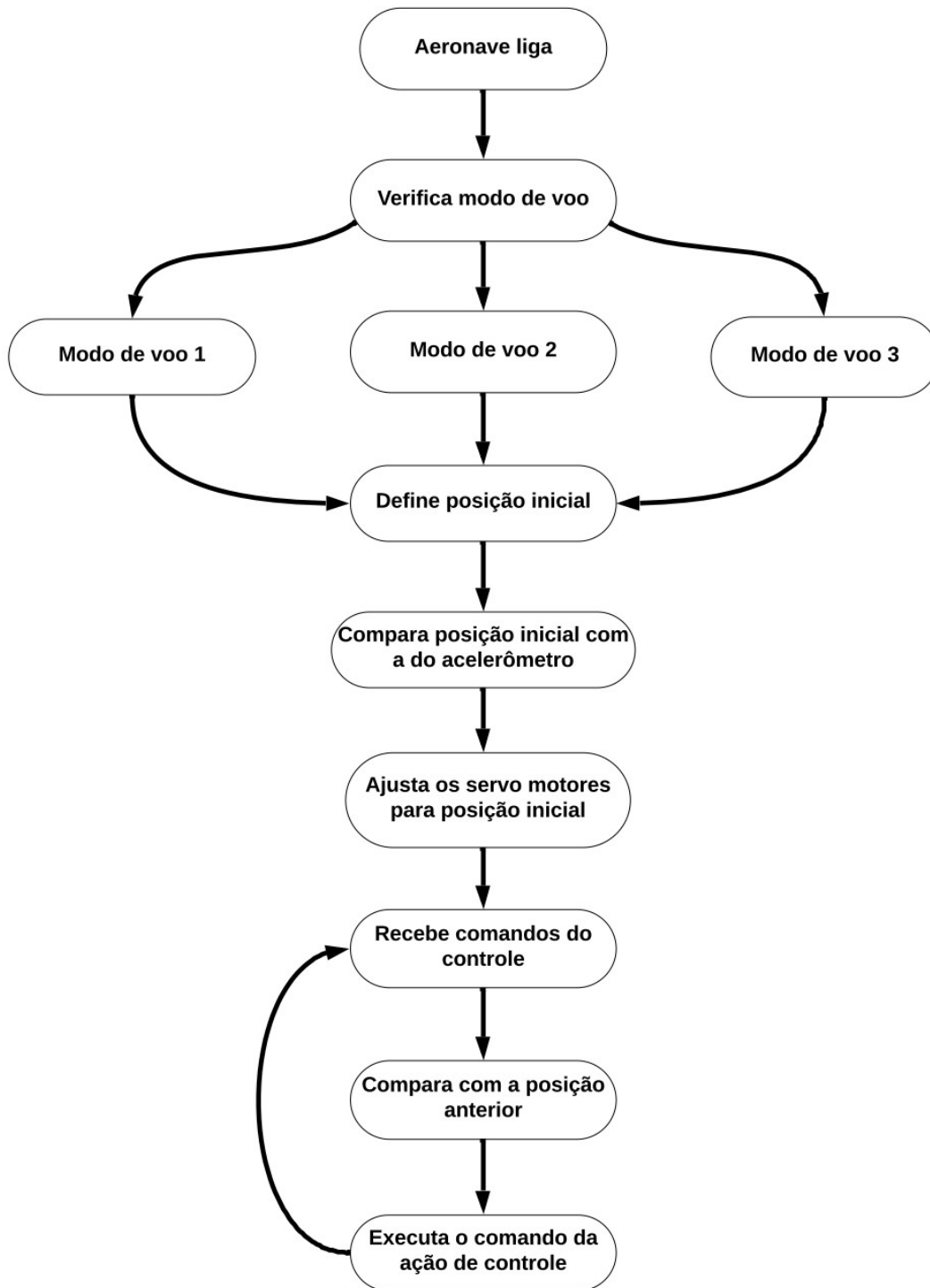


Figura 5.4 - Fluxograma do sistema de controle.

Fonte: Autores, 2024.

O fluxograma descreve o funcionamento do sistema de controle de voo automatizado, mais especificamente, da aeronave de decolagem e aterrissagem vertical. Inicialmente, a sequência operacional é ativada pela energização do sistema, seguida

imediatamente pela fase de espera, onde os sinais do transmissor de rádio-controle são monitorados. Esta etapa é importante, pois assegura que a aeronave só progrida para as fases subsequentes do voo quando o sinal válido é estabelecido, garantindo que o operador tenha controle total antes do início das manobras.

Posteriormente, o sistema executa a comparação crítica entre os dados em tempo real fornecidos pelo acelerômetro e os valores de referência para verificar se a aeronave está corretamente alinhada em relação ao plano horizontal. Esta verificação faz parte da medida preventiva que assegura que o *drone* não apresente desvios angulares que possam comprometer a estabilidade ou a trajetória do voo. Confirmada a orientação correta, o sistema processa as informações através do algoritmo de controle PID, que é o núcleo do sistema de estabilização. O controlador PID ajusta dinamicamente as saídas de controle para os atuadores, mitigando erros entre o estado atual e o desejado, e adapta-se continuamente.

Avançando para a determinação do modo de voo, que define o comportamento operacional do *drone*. Os modos de voo são pré-programados e selecionados com base em critérios definidos pelo operador ou condições ambientais, e podem variar de manutenção de posição estática, a manobras de alta agilidade ou transições para voo horizontal de alta velocidade. Cada modo de voo está associado a conjuntos distintos de parâmetros de controle que são aplicados para otimizar o desempenho da aeronave sob as condições específicas. Selecionado o modo de voo, o sistema de controle processa os comandos de entrada do piloto, comparando-os com a posição e atitude anteriores da aeronave, assim calcula as correções necessárias para alcançar o novo estado desejado. Este processo contínuo de realimentação e ajuste é o que permite executar os comandos de voo com precisão e estabilidade, adaptando-se de forma responsiva às intenções do operador e às condições do ambiente.

5.2 Considerações Finais

A metodologia, juntamente com as inovações técnicas empregadas na criação do VTOL, abordou a seleção de materiais até a implementação do sistema de controle. A integração destas tecnologias refletem o compromisso e a excelência na engenharia aeronáutica. Em sequência, tem-se a próxima fase do projeto, que traz a análise dos resultados obtidos e as discussões pertinentes. O foco é avaliar o desempenho do *drone* em condições operacionais reais, discutindo os dados coletados, a aerodinâmica e os desafios enfrentados. Esta análise não apenas validará as escolhas feitas, mas também fornecerá *insights* valiosos para futuras inovações e aplicações práticas no campo da aviação.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

No capítulo a seguir, está presente a etapa final do projeto do *drone* VTOL, aqui são detalhados os desdobramentos práticos e as avaliações técnicas do trabalho realizado. Os resultados que foram alcançados, tanto em termos de construção mecânica quanto nos aspectos elétricos e eletrônicos que fundamentam a funcionalidade da aeronave. A meticulosa integração das partes mecânicas, a precisão na implementação dos sistemas elétricos, e a eficiência das soluções eletrônicas para a transmissão de sinais entre os componentes são escrutinadas. A análise abrangente fornece a visão holística do projeto, sublinhando o sucesso na execução e as áreas para futuras investigações e melhorias.

6.1 Resultados da construção mecânica

O uso do Depron na construção desse modelo foi escolhido estrategicamente, visando otimizar tanto a eficiência quanto a performance do voo. Por ser composto de material espumoso, revela-se como escolha acertada para a aeronave, contribuindo para a sua capacidade de voo ao oferecer fuselagem robusta sem sacrificar a economia de peso, essencial para tal tecnologia. Suas características contribuíram para manter a integridade estrutural em diferentes condições atmosféricas e durante manobras de alta velocidade. A montagem final da estrutura, ilustrada na Figura 6.1, revela a precisão e o cuidado com que cada peça de Depron foi cortada e montada, resultando na estrutura aerodinâmica forte e esteticamente agradável.

As linhas da estrutura mostram o *design* aerodinâmico, realçadas através da coloração branca do material, fazendo destacar as semelhanças com o modelo F-35. A aeronave é conhecida por sua excelente manobrabilidade e capacidade de atingir altas velocidades, características que foram buscadas neste projeto. A utilização do Depron permitiu reproduzir algumas das propriedades aerodinâmicas, embora em escala menor e com adaptações específicas para o contexto dos *drones*. O perfil aerodinâmico, com asas e fuselagem modeladas de maneira a maximizar a eficiência do voo, refletem o estudo cuidadoso feito com base no modelo espelhado.



Figura 6.1 - Aeronave montada com Depron de 5mm.

Fonte: Autores, 2024.

A construção de componentes utilizando a impressora 3D Ender, foi determinante na materialização do projeto da aeronave. Os suportes de pouso são peças fundamentais que asseguram a estabilidade do veículo em seu estado de inércia. A precisão da impressora, previamente calibrada para garantir a máxima acurácia, resultou em peças robustas e perfeitamente alinhadas com as especificações técnicas do *design*. Esta etapa não apenas reforça a viabilidade da fabricação aditiva na aviação de *drones*, mas também ressalta a importância de cada componente para a integridade estrutural e funcionalidade do conjunto. Com suportes de pouso bem estruturados e engenhosamente projetados, assegura-se o equilíbrio primordial para a aeronave, essencial para o momento crítico em que ela transcende da imobilidade para o dinamismo do voo.

Na engenharia de precisão da aeronave não tripulada, a construção de componentes como os suportes de transferência de força para o profundor assumem papéis de destaques. A impressora 3D foi calibrada meticulosamente para fabricar essas peças com alto grau de precisão, assegurando que cada suporte se encaixasse e funcionasse de acordo com as exigências rigorosas do projeto. Esses suportes, ao interligarem-se com os servo motores, foram importantes para a eficácia do profundor na manipulação da direção da aeronave. A integridade estrutural desses suportes é fundamental para garantir que as instruções de manobra sejam traduzidas em movimentos aerodinâmicos precisos, permitindo que o *drone* responda de maneira ágil e controlada durante o voo, principalmente quando está superando a inércia e iniciando seu des-

locamento.

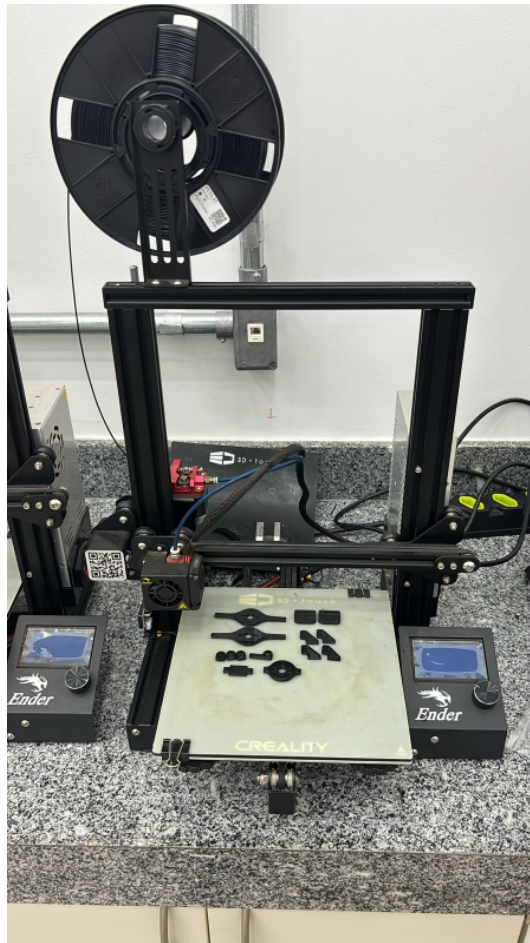


Figura 6.2 - Elementos de suporte pré-fabricados.

Fonte: Autores, 2024.

A construção dos suportes dos motores, conforme a Figura 6.2, asseguram a entrega de força motriz necessária para a elevação e movimentação da aeronave. Utilizando a impressora 3D, cada suporte foi fabricado com precisão garantindo a fixação segura dos motores, que são os propulsores da aeronave. A calibração da impressora permitiu que as peças fossem produzidas com tolerâncias apertadas, resultando em componentes robustos e confiáveis. A Figura 6.3 detalha o processo de impressão e a qualidade final dos suportes construídos com filamento biopolímero ácido polilático (Polylactic acid biopolymer-PLA), enfatizando a importância da precisão na construção desses elementos fundamentais. Essas estruturas não apenas suportam os motores, mas também são projetadas para dissipar eficientemente o calor gerado, mantendo a integridade do sistema de propulsão durante voos prolongados.



Figura 6.3 - Elementos de suporte impressos.

Fonte: Autores, 2024.

Na junções das superfícies de controle à estrutura principal, os elementos auxiliares como as braçadeiras de *Nylon*, desempenharam papel significativo. Esse componente permitiu movimentos suaves e precisos, aumentando o ângulo de movimentação das superfícies de controle, permitindo os servo motores trabalharem de forma contínua sem divergências. Os testes realizados para análise de atuação desses dispositivos foi executado antes de montar qualquer outro circuito, como pode ser observado na Figura 6.4.



Figura 6.4 - Teste das superfícies de controle.

Fonte: Autores, 2024.

Os fios de sustentação desempenharam papel importante na dinâmica de voo, atuando como intermediários essenciais na transferência de força dos servo motores para os componentes estruturais. Durante a montagem, esses fios foram ajustados e alinhados para garantir encaixe perfeito nas peças impressas em 3D. Esta precisão no posicionamento é fundamental para uma transferência de movimento eficiente, permitindo que o *drone* responda com agilidade e precisão aos comandos de voo. O meticuloso arranjo dos fios de sustentação não só otimiza a eficácia mecânica mas também minimiza o atrito e o desgaste, contribuindo para a longevidade do sistema e para a execução de manobras complexas com estabilidade e controle aprimorados. A integração harmoniosa desses fios com as peças impressas é um testemunho da engenharia de detalhes aplicada, assegurando que cada movimento seja convertido em ação proporcional e precisa, vital para o desempenho superlativo do *drone* em voo.

As hélices selecionadas para o projeto, observadas na Figura 6.5 foram dimensionadas de acordo com a recomendação da fabricante dos motores, garantindo o encaixe perfeito e a integração sem falhas ao *design* compacto do modelo. Este modelo de hélices, supriu as necessidades de desempenho, com o sistema motopropulsor tendo força de sustentação de 1,948kg, foi suficiente para aguentar o peso de 654,04 gramas do VANT. Assim enfatizando a importância da combinação harmoniosa entre

motor e hélice para maximizar a eficiência aerodinâmica e o desempenho do sistema de propulsão. A escolha criteriosa desses componentes é fundamental para otimizar tanto a capacidade de manobra quanto a autonomia de voo, assegurando que o *drone* atenda às expectativas de operação em diversos cenários.



Figura 6.5 - Hélices utilizadas no projeto.

Fonte: Autores, 2024.

Ao detalhar o modelo e a funcionalidade das hélices, observa-se que a precisão no dimensionamento e na forma aerodinâmica foi crucial para atingir um equilíbrio ideal entre a força de empuxo e o consumo energético. A eficácia com que essas hélices trabalham em conjunto com os motores é testemunho da engenharia precisa envolvida na seleção de componentes compatíveis, garantindo que a aeronave tenha capacidade de realizar decolagens e pousos com suavidade e agilidade desejadas. A sinergia entre as hélices e os motores não apenas eleva o nível de desempenho do *drone*, mas também sublinha a importância da seleção meticulosa de componentes, que são essenciais para a realização do projeto de engenharia aeronáutica de sucesso.

Para o cálculo do centro de gravidade do *drone*, estabeleceu-se como ponto de referência o nariz da aeronave. Com base nesse ponto começamos a calcular o momento, onde pegamos o peso de cada componente conforme fabricante e medimos a distância desse componente ao ponto de referência. Os componentes criados através de impressão 3D foram pesados para obter sua massa. Com o peso total da aeronave, levando em consideração o peso da estrutura em Depron, obtivemos o seguinte CG:

$$CG = \frac{\sum(\textit{peso} \cdot \textit{dist\~{a}ncia})}{\sum \textit{peso}} \quad (6.1)$$

$$CG = \frac{0,218282850000000003 \textit{ kg} \cdot \textit{ m}}{0,61804 \textit{ kg}}$$

$$CG \approx \frac{0,218282850000000003}{0,61804}$$

$$CG \approx 0,3530446464204558 \textit{ m}$$

$$CG \approx 35,3044 \textit{ cm}$$

Essa meticulosa determinação do CG é fundamental para a estabilidade e manobrabilidade da aeronave, refletindo o sucesso em superar obstáculos técnicos durante o processo. A solução de cada desafio, desde ajustes dimensionais até a integração precisa de componentes, evidencia o rigor e a dedicação empregados. A conclusão bem sucedida desta parte importante do projeto não só demonstra a competência técnica envolvida, mas também garante a funcionalidade otimizada do *drone*, culminando em desempenho aéreo excepcional.

6.2 Resultados da construção eletrônica

A bateria escolhida para alimentar a aeronave, observada na Figura 6.6 garantiu o sucesso dos testes de voo, fornecendo energia de forma consistente e duradoura. Durante os testes, a durabilidade da bateria superou as expectativas, sustentando longos períodos de testes sem a necessidade de recargas frequentes, o que foi importante para a avaliação de desempenho em condições reais. A capacidade da bateria em manter os motores operando em eficiência máxima é testemunho da sua adequação ao projeto e da atenção dada à seleção de componentes de alta qualidade. Além

disso, o carregador de baterias Lipo, permitiu monitorar a carga desse componente, garantindo realização dos testes com cargas altas.



Figura 6.6 - Fonte de tensão da aeronave.

Fonte: Autores, 2024.

Atualmente, a bateria não só fornece energia para os motores principais, mas também garante o funcionamento perfeito de todos os servo motores através do módulo PWM. A alimentação adequada dos servo motores é um fator determinante para a realização de manobras ágeis e precisas, o que foi evidenciado pelos resultados obtidos durante os testes. A consistência na entrega de energia é crítica para manter a resposta imediata aos comandos, a bateria utilizada cumpriu essas exigências com excelência. Sua performance sólida reforça a confiança na capacidade do *drone* em executar tarefas complexas, ressaltando a engenharia avançada por trás da escolha e instalação deste componente.

O módulo PWM PCA 9685, observado na Figura 6.7 foi incorporado ao projeto como um núcleo central de distribuição de comandos e potência para os servo motores, desempenhando com excelência sua função na precisão e eficácia do controle de voo. Este componente permite a modulação sofisticada da largura de pulso, que é essencial para o ajuste fino da posição dos servo motores. A capacidade de gerar múltiplos canais PWM de maneira independente e simultânea é crucial para o sistema, garantindo que o microcontrolador não ficasse sobrecarregado. No processo de desenvolvimento do *drone*, o módulo provou ser a escolha certa, adaptando-se perfeitamente ao sistema eletrônico integrado da aeronave. A sua capacidade de operar em vasta gama de frequências permitiu uma comunicação fluida e precisa com os servo motores, garantindo que os movimentos fossem executados com exatidão. A implementação deste módulo permitiu a distribuição equilibrada de potências entre

os diferentes atuadores, sendo essencial para manter a estabilidade e controlabilidade em diversos regimes de voo.

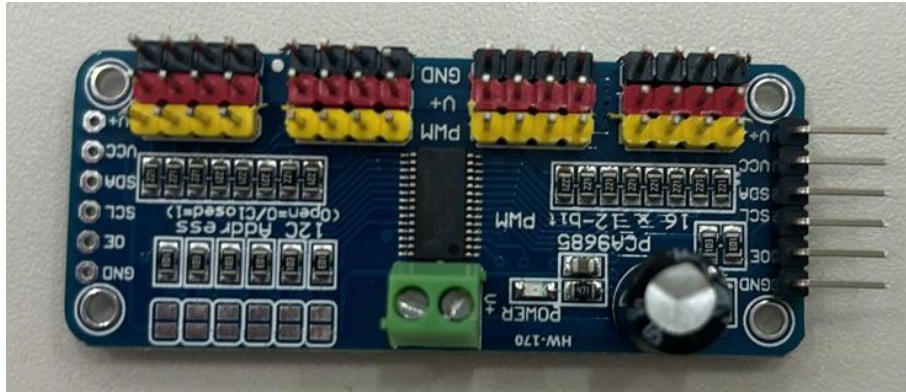


Figura 6.7 - Módulo PWM para ligação dos servo motores.

Fonte: Autores, 2024.

Os motores *brushless* superaram as expectativas em termos de performance, tal afirmação foi comprovada durante testes de bancada realizados, como observado na Figura 6.8. Assim foi percebido a capacidade notável em gerar a força de empuxo necessária para a decolagem e sustentação do voo. A eficiência energética destes motores, combinada com a alta taxa de rotação, traduz-se em uma resposta de aceleração ágil e controle de voo preciso, fundamentais para as manobras. A escolha desses motores foi realizada de forma minuciosa, considerando a otimização da relação entre o torque produzido e o consumo de energia, o que se revelou benéfico para prolongar a duração das baterias e, por conseguinte, o tempo de voo.

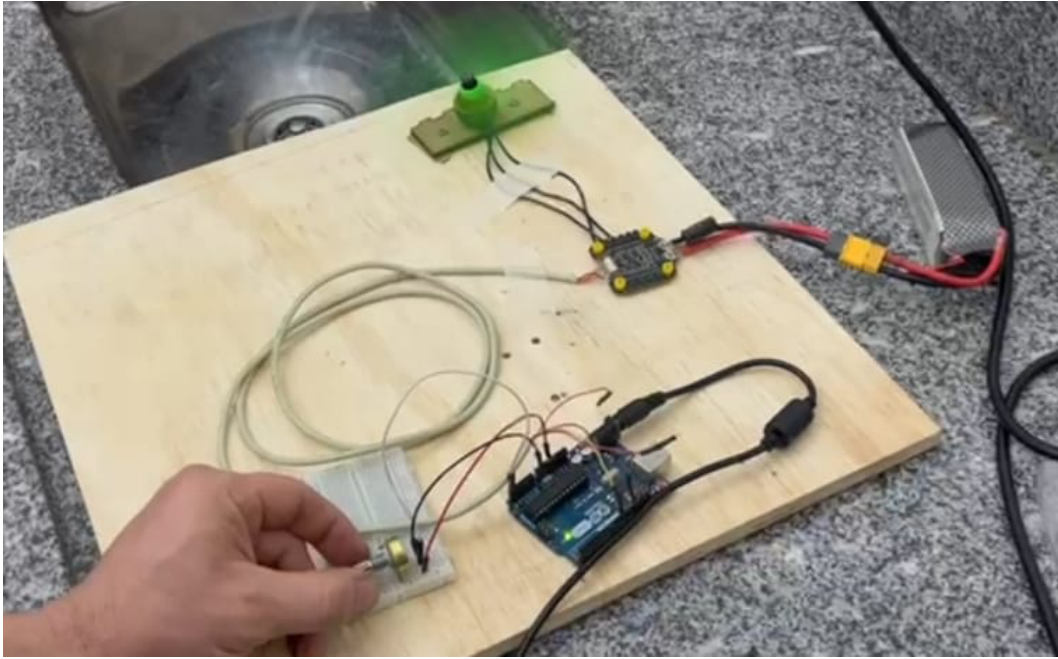


Figura 6.8 - Teste de bancada realizado para observar performance do motor.

Fonte: Autores, 2024.

O *design* compacto e a leveza dos motores Aeolus 2207 2550KV, observados na Figura 6.9, foram essenciais para a integração no sistema propulsor do *drone*, influenciando de maneira substancial no cálculo do centro de gravidade da aeronave. Sua massa reduzida e dimensões condensadas possibilitaram a distribuição equilibrada de peso ao longo do chassi, o que é vital para a estabilidade aerodinâmica e a eficácia do voo. Além disso, o perfil otimizado dos motores permitiu que fossem alojados sem comprometer o espaço necessário para outros componentes críticos do sistema, tais como a bateria e o controlador de voo, assegurando uma estrutura enxuta.



Figura 6.9 - Motor *Brushless* utilizado na aeronave.

Fonte: Autores, 2024.

Em termos técnicos, os motores possuem características que os destacam no campo da aviação. Sua arquitetura interna, projetada para minimizar a resistência elétrica, resulta na transferência de energia eficientemente, permitindo que a aeronave execute comandos com prontidão e exatidão. O rotor de neodímio de alta performance em conjunto com estatores de precisão, confere aos motores a capacidade de produzir empuxos significativos sem o sacrifício da eficiência energética. Isso significa que mesmo sob demandas de alta potência, os motores mantêm a operação fria, reduzindo o risco de superaquecimento e consequentes danos aos componentes eletrônicos adjacentes, garantindo assim a longevidade e a confiabilidade do sistema propulsor.

Os servo motores implementados no projeto, como observado na Figura 6.10 operaram com exatidão e precisão notáveis em suas tarefas designadas. No entanto, durante a fase de calibração, enfrentamos dificuldades ao ajustar a amplitude de movimento angular. Para alcançar a precisão necessária, foram efetuadas marcações meticulosas e ajustes nos cabos de transmissão de força, responsáveis pela articulação das superfícies de controle. Essas ações visavam otimizar a eficácia dos servo motores, assegurando o máximo desempenho em manobras aéreas.



Figura 6.10 - Servo motor utilizado na aeronave.

Fonte: Autores, 2024.

Adicionalmente, durante a integração dos servo motores ao sistema de controle baseado na ESP32, surgiram desafios relacionados à incompatibilidade de programação, que resultaram em oscilações indesejadas e vibrações nos atuadores. Intervenções precisas na codificação e revisão detalhada dos algoritmos de controle foram necessárias para mitigar essas interferências. Após intensivos ciclos de testes e reajustes, os servo motores atingiram o nível de performance que satisfizesse as demandas operacionais do *drone*, com respostas suaves e estáveis, garantindo o sucesso dos procedimentos de calibração e programação empregados no desenvolvimento do projeto aeronáutico.

Durante o processo de integração do microcontrolador ESP32 no sistema do *drone*, foram enfrentados desafios relacionados a compatibilidade de programação com a ESC, responsável por regular a velocidade dos motores. A complexidade residia no protocolo *One Shot 125*, sinal utilizado na comunicação da ESC com o microcontrolador. Ajustes meticulosos no *firmware* da ESP32 foram executados, com o intuito de alinhar os sinais emitidos com os parâmetros de entrada exigidos pela ESC. Essa calibração permitiu a comunicação mais harmoniosa entre o microcontrolador e o sistema de propulsão, porém ao ligar os três motores simultaneamente foi apresentado respostas erráticas devido a interferências nos comandos. Os testes realizados de forma separada podem ser observados nas Figuras 6.11 e 6.12.



Figura 6.11 - Teste de verificação de funcionamento dos motores traseiros.

Fonte: Autores, 2024.



Figura 6.12 - Teste de verificação de funcionamento do motor central.

Fonte: Autores, 2024.

No término da fase de testes e ajustes, a ESP32, representada na Figura 6.13 demonstrou-se eficaz no comando do sistema de propulsão, com desempenho que atendeu às expectativas do projeto. A estabilidade do voo e a precisão da manobrabilidade foram notavelmente aprimoradas, refletindo o sucesso das intervenções

técnicas realizadas. A adaptação da programação da ESP32, aliada às soluções de engenharia aplicadas, resultou na interface de controle que funcionou de forma satisfatória, garantindo a operação segura e eficiente da aeronave. Essa experiência destacou a importância da flexibilidade e da capacidade de resolução de problemas no campo da engenharia de sistemas embarcados e aeroespaciais.

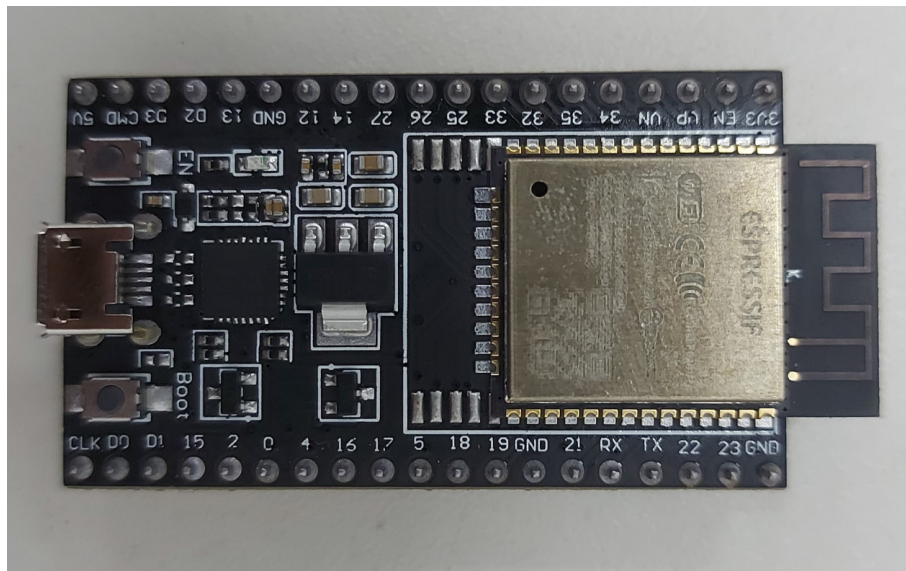


Figura 6.13 - Microcontrolador ESP32 utilizado como controlador de voo do projeto.

Fonte: Autores, 2024.

O controlador eletrônico de velocidade, como observado na Figura 6.14 gerenciou a operação dos motores com precisão durante os testes. Na montagem do *drone*, foi dada atenção especial a execução das soldas técnicas na placa da ESC, assegurando conexões robustas e confiáveis com os motores. Os cabos de ligação foram cuidadosamente ajustados para assegurar percurso limpo e organizado, evitando qualquer potencial interferência eletromagnética ou desgaste físico que pudesse comprometer a integridade do sistema.

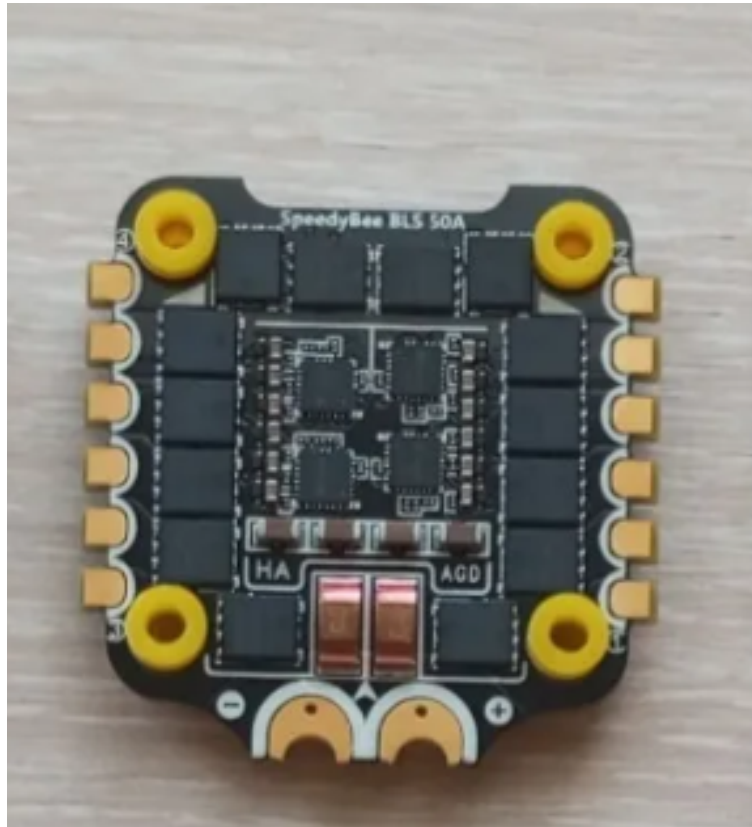


Figura 6.14 - Controlador eletrônico de velocidade.

Fonte: Autores, 2024.

No processo de montagem, a proximidade dos cabos em relação à ESC foi prioridade, visando minimizar a resistência elétrica e maximizar a eficiência da transmissão de energia. Esta estratégia resultou na resposta dinâmica e ágil dos motores às instruções de controle, aspecto crítico para o desempenho da aeronave. A ESC, como peça vital para a operacionalidade do VANT, foi submetida a rigorosos processos de testes, onde demonstrou capacidade superior de suportar as demandas de energia impostas pela bateria e os requisitos de comunicação com a controladora ESP32. Ao término da montagem, as expectativas em relação à ESC foram atendidas. Ela se comportou excepcionalmente bem, o que garantiu o controle refinado sobre os motores. A sinergia entre a ESC e os demais componentes eletrônicos evidenciou o sucesso na escolha e no *design* do sistema de controle, comprovando a eficácia da abordagem adotada para a distribuição de potência e comando dentro da arquitetura eletrônica do *drone*.

O controle *Turnigy 9X*, observado na Figura 6.15 destaca-se por suas características robustas e versatilidade, tornando-o a escolha ideal para o projeto. Este controle

oferece nove canais, o que é mais do que suficiente para operar VANT complexos, permitindo o controle de múltiplas funções simultaneamente. Além disso, sua frequência de operação de 2.4 GHz garante comunicação estável e minimiza as interferências, essencial para manter o controle preciso do *drone* em ambientes diversos. A ergonomia e a facilidade de uso do *Turnigy 9X* também são notáveis, proporcionando ao operador uma experiência confortável e intuitiva durante o voo. A eficiência na resposta aos comandos e a capacidade de customização de funções, como visto na imagem a ser incluída, reforçam a adequação deste controle para operações de *drones* avançadas.



Figura 6.15 - Radio controle.

Fonte: Autores, 2024.

A integração e calibração do acelerômetro no projeto da aeronave enfrentaram desafios significativos, tanto em termos de programação quanto de ajuste fino do dis-

positivo. Este sensor tão importante para o controle de estabilidade e orientação da aeronave, como observado na Figura 6.16, exigiu atenção meticulosa aos detalhes para garantir sua precisão e confiabilidade. No início, a calibração do sensor revelou-se uma tarefa complexa, devido a sensibilidade do sensor as variações de movimento e a necessidade do equilíbrio preciso para medir a aceleração e a orientação espacial corretamente. A programação envolvida no processo de calibração demandou ajustes cuidadosos dos parâmetros para sincronizar o sensor com as dinâmicas específicas da aeronave, passo crítico para o sucesso das operações de voo.

Superando esses obstáculos, este sensor provou ser componente valioso para o projeto, entregando resultados que superaram as expectativas iniciais. Após o processo rigoroso de ajustes na programação, o sensor começou a fornecer dados precisos e confiáveis, importantes para o controle de estabilidade. A capacidade de medir com precisão a aceleração e a orientação espacial permitiu controle mais fino dos movimentos. Este teste não apenas validou a escolha do MPU6050 para o projeto, mas também destacou a importância da calibração e da programação adaptativa para a integração eficaz desses componentes.

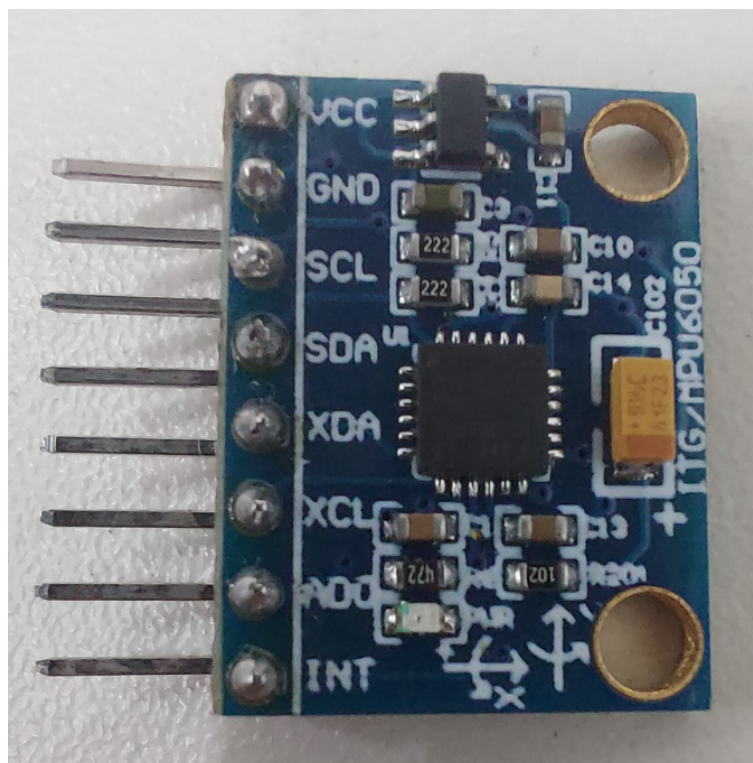


Figura 6.16 - Sensor acelerômetro e giroscópio.

Fonte: Autores, 2024.

6.3 Considerações finais

A análise meticulosa dos componentes e a integração eficiente das partes mecânicas e eletrônicas culminaram em um desempenho satisfatório do *drone*, demonstrando a viabilidade do projeto na prática. Os ajustes precisos na programação, a seleção estratégica dos materiais, e a sinergia entre motores, hélices, e o sistema de controle ressaltaram a capacidade da aeronave em cumprir com as expectativas estabelecidas, evidenciando o equilíbrio entre inovação tecnológica e aplicabilidade prática. Esta conclusão do capítulo de resultados não apenas sublinha os êxitos alcançados, mas também prepara o terreno para o capítulo final, onde serão discutidas as implicações globais do projeto, suas limitações, e as direções futuras para pesquisa e desenvolvimento no campo dos veículos aéreos não tripulados.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

A conclusão deste trabalho reflete o percurso desafiador e enriquecedor na construção da aeronave de voo vertical, inspirada no renomado modelo F-35. O processo abrangeu desde a concepção mecânica e eletrônica até a execução prática, enfrentando e superando diversos obstáculos técnicos e operacionais. A montagem do material Depron apresentou desafios significativos, especialmente na precisão do corte e na montagem, exigindo abordagem meticulosa para assegurar a integridade estrutural e a aerodinâmica necessárias. Além disso, a comunicação entre os diversos componentes eletrônicos exigiu harmonização cuidadosa para garantir que o sistema integrado operasse de forma coesa e eficiente.

A calibração do centro de gravidade (CG) emergiu como aspecto crítico, exigindo ajustes precisos no posicionamento e no peso dos componentes para otimizar a estabilidade e a manobrabilidade da aeronave. Este processo foi fundamental para assegurar que a aeronave pudesse sustentar o voo vertical com sucesso, equilibrando de forma eficaz as forças aerodinâmicas e o controle de voo. As dificuldades encontradas na soldagem técnica, especialmente na conexão dos componentes eletrônicos, demandaram atenção meticulosa aos detalhes e à qualidade das conexões para evitar falhas que poderiam comprometer a funcionalidade do sistema.

A superação desses desafios não foi apenas a prova da capacidade técnica envolvida, mas também testemunho do processo iterativo de aprendizado e adaptação. Cada obstáculo superado representou oportunidade para o refinamento do projeto e para aprofundar o entendimento dos princípios que regem a engenharia aeronáutica, mecatrônica e elétrica. Este processo culminou na realização bem sucedida do projeto, mostrando a viabilidade da construção do VTOL, capaz de executar decolagens e pousos verticais.

Este trabalho não apenas contribui para o avanço acadêmico e técnico na área de engenharia elétrica, mas também abre caminho para futuras pesquisas e desenvolvimentos. As lições aprendidas e as soluções encontradas para os desafios enfrentados fornecem base sólida para a exploração de novas ideias e conceitos na construção de aeronaves não tripuladas. A conclusão deste projeto marca não o fim, mas o início de novas jornadas de inovação, onde os limites da tecnologia aeronáutica continuam a ser testados e expandidos.

7.1 Trabalhos Futuros

- Implementação de redes neurais para melhorar a capacidade de aprendizado do controlador de voo, permitindo que o *drone* se adapte e otimize seu desempenho.
- Realizar estudos para otimizar o consumo de energia do sistema, garantindo que a aeronave opere de forma eficiente e sustentável.
- Implementar técnicas de compensação de erros de *hardware* para corrigir desvios e imperfeições nos componentes físicos.
- Alterar o *design* e o material da estrutura do chassi, garantindo estruturas robustas e seguras.
- Integrar sensores para detectar obstáculos e evitar colisões durante o voo.
- Projetar o controlador de voo com sistemas redundantes e capacidade de detecção de falhas para garantir a segurança e a estabilidade em caso de mau funcionamento de componentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELING, A. Dimensionamento de um conjunto trem de pouso para aerodesign. 2016. 24
- ALBIERO, V.; BIASI, H. H. D. Desenvolvimento de um drone autônomo guiado por meio de técnicas de visão computacional. **Unoesc & Ciência-ACET**, v. 7, n. 1, p. 35–44, 2016. 31
- ALMEIDA, P. B. F. d. et al. Otimização paramétrica de hélices de drone híbrido para desempenho na água por meio de algoritmos evolutivos. Florianópolis, SC., 2023. 22
- ARANTES, B. H. T. T.; LIMA, A. P. A.; ARANTES, L. T.; COSTA, E. M.; VENTURA, M. V. A. Aplicações com drone na agricultura. **Anais da Semana Agrônômica da Faculdade Evangélica de Goianésia**, v. 8, n. 2018, 2018. 2
- ARAÚJO, S. R. M. Controle para automatização de um quadricóptero. 2018. 30
- ARTALE, V.; MILAZZO, C.; RICCIARDELLO, A. Mathematical modeling of hexacopter. **Applied mathematical sciences**, Kore University of Enna, v. 7, n. 97, p. 4805–4811, 2013. 13
- AYAMGA, M.; AKABA, S.; NYAABA, A. A. Multifaceted applicability of drones: A review. **Technological Forecasting and Social Change**, Elsevier, v. 167, p. 120677, 2021. 2
- BARÁNEK, R.; ŠOLC, F. Modelling and control of a hexa-copter. In: IEEE. **Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC)**. [S.l.], 2012. p. 19–23. 14
- BARBOSA, L. M. L.; PEREIRA, I. D. D. O.; NASCIMENTO, R. M.; DANTAS, A. N.; ALBUQUERQUE, R. L. de; LOBATO, L. F. de J. Procedimento para escolha de fonte de energia para drone quadrotor compacto. 2020. 26, 28, 29
- BARBOSA, P. F. M.; PERICO, D. H. **Desenvolvimento de material didático para ensino a distância de python básico**. 2019. 31
- BELUSSO, D. V. Sistema autônomo de navegação para um veículo aéreo não tripulado do tipo quadricóptero. Universidade de Passo Fundo, 2019. 12
- BITTENCOURT, M. R. **Filamentos de impressora 3D**. 2021.
<https://www.camboriu.ifc.edu.br/labifmaker/wp-content/uploads/sites/19/2021/10/CT01 – Filamentos – de – impressora – 3D.pdf>. Acesso em : 05 de Janeiro 2024. 19
- BORNE, T. A game of drones: robôs, ciberespaço e segurança no século xxi. 2013. 2

- BRAGA, C. da C. A ação de drones na guerra naval. **Revista Marítima Brasileira**, v. 139, n. 04/06, p. 79–110, 2019. 2
- CARNEIRO, M. d. B. et al. Análise estrutural de hélices de aeronaves. Joinville, SC., 2022. 22
- CARVALHO, B. R.; OLIVEIRA, M. H.; CUNHA, T. N.; OLIVEIRA, L. C. Drone para pulverização agrícola e de inseticidas. 2019. 16
- CORREA, P. J. S. Estudo de caso: estabilidade estática e dinâmica projeto sae-aerodesign mamutes do cerrado 2018. 2019. 20
- DA, A. P. Uso de drone na agricultura 4.0. 2021. 3
- DEMOLINARI, H. C. Projeto de construção um drone hexacóptero. 2016. 9, 17, 20, 30
- FERNANDES, M. L. Modelação e controlo de motores dc brushless. 2013. 25
- FURTADO, V. H.; GIMENE, R.; JÚNIOR, J. C.; JÚNIOR, J. A. Aspectos de segurança na integração de veículos aéreos não tripulados (vant) no espaço aéreo brasileiro. In: SN. **Anais do VII Simposio de Transporte aereo-Sitraer7**. [S.l.], 2008. p. 506–517. 1
- GASPARINO, H. P. Projeto e concepção de um quadcopter utilizando o controle pid. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2014. 32
- GIANNICO, R. H. Desenvolvimento e estudo de vant (veículo aéreo não tripulado). 2021. 5, 26, 28
- GONÇALVES, L. F. **Projeto estrutural de um aeromodelo nos requisitos da competição SAE Brasil aerodesign-classe regular**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. 20
- JESUS, F. S. de; SIMOES, M. A. Controladores de voo dirigidos a drones quadricopteros: aferindo o controle de baixo nivel em um ambiente simulado. 2021. 29
- JUNIOR, M. A. C.; VIRTUOSO, G. H.; MARTINS, P. J. Propriedades desejáveis a uma linguagem de programação: Uma análise comparativa entre as linguagens c, c++ e java. **Anais SULCOMP**, v. 1, 2005. 31
- JÚLIO, F. X. **Controlador Fuzzy aplicado a um sistema de controle de posição acionador por motores de indução trifásicos**. 2010. 33, 34
- KAMIENSKI, M. A. et al. Análise experimental em hélices: ensaio simplificado de tração estática. 2016. 21
- LEBRAO, G. W. Fibra de carbono. **Revista Plástico Sul**, v. 3, 2008. 17

LUCENA, A. N. d. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado com sustentação e propulsão híbrida**. Dissertação (Mestrado) — Brasil, 2018. 10

MARTINS, M. S. et al. Testes de bancada para a obtenção do consumo de corrente e determinação dos torques dos servomotores em uma aeronave rádio controlada não tripulada. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2019. 27

MIRANDA, M. B.; RODRIGUES, L. E. M. J. **Contrato de Transporte Aéreo-A Aplicabilidade do Código Brasileiro de Aeronáutica, do Novo Código Civil e do Código de Defesa do Consumidor**. 2007. 6

MOGENSEN, K. N. Motor-control considerations for electronic speed control in drones. **Analog Applications Journal [online]**. Texas Instruments, 2016. 25

MOL, R. **Introdução aos drones: O que são e como funcionam os drones?. Agosto.2020**. 2020. Disponível em: <<https://www.makehero.com/blog/o-que-e-como-funciona-um-drone/>>. Acesso em: 02 de Janeiro 2024. 12, 15

MORAIS, E. R. d. Desenvolvimento de um controlador híbrido fuzzy-pid para estabilização de um voo do tipo quadricóptero na realização de um voo autônomo vertical. Brasil, 2017. 32, 33, 34

MORAIS, M. L. d. Estudo e simulação de diferentes lógicas de controle de temperatura em processo fermentativo. Universidade Federal de São Carlos, 2020. 33, 34

NASCIMENTO, A. J. da S.; DENADAI, M. S. Drone, a história desta tecnologia. **Tekhne e Logos**, v. 12, n. 2, p. 48–56, 2021. 1

OLIVEIRA, B. Q. de. Adequação de imagens com filtro infravermelho utilizando drones na agricultura. 2021. 31

OÑATE, d. M. M. Tipología de aeronaves pilotadas por control remoto. **JL Esteban Herreros (Coordinador), Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil (págs. 49-57)**. Madrid: Gráficas Arias Montano, 2015. 6

PADILHA, L. **Defesa Aérea Naval**. 2012. Disponível em: <<https://www.defesaaereanaval.com.br/aviacao/boeing-oferece-ch-47-chinook-de-olho-no-interesse-no-v-22-por-israel>>. Acesso em: 26 de Dezembro 2023. 8

PEREIRA, J. de O.; JUSTO, L. F.; MEDEIROS, N. A. de; PRATES, C. C. Amazon: um estudo de caso, como a gigante empresa se tornou referência na entrega de produtos? **ANAIS DA MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CESUCA-ISSN 2317-5915**, n. 16, p. 577–598, 2022. 2

PILOTOS, F. de. **AERONAVES E MOTORES -> Capítulo I - Aeronaves**. 2014. Disponível em: <<https://formacaopiloto.blogspot.com/2014/07/>>

aeronaves-e-motores-capitulo-i-aeronaves.html>. Acesso em: 25 de Dezembro 2023. 6

PIMENTEL, P. A. M.; SANTOS, M. D. D.; CLAUDIO, A.; KIELING, S. L. M. d. Q. Determinação de parâmetros das superfícies de controle (ailerons, leme, profundor) para estabilidade longitudinal estática de um protótipo de aerodesign rádio-controlado. 2016. 23

PRIATMOKO, M.; NIRBITO, W. Design analysis of ducted propeller for bicopter drone propulsion. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S.l.], 2019. v. 685, n. 1, p. 012008. 8, 9

RANGEL, R. K.; KIENITZ, K. H.; BRANDÃO, M. P. Sistema de inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando veículos aéreos não-tripulados. Sep, 2009. 30

ROSA, M. A. S. Controle para automatização de um quadricóptero. 2018. 21

SANTANA, C. E. E. **Propuesta de sistema multi-UAV para aplicaciones de cobertura de área**. [S.l.: s.n.], 2017. 6

SANTOS, C. P.; VIEIRA, M. E.; SÉRGIO, L.; STEVAN, J. Sensores inerciais aplicados à marcha humana no esporte. **Seminário de Eletrônica e Automação—SEA**, 2016. 28

SANTOS, D. F. A. d. Processo de fabricação de um drone. Universidade de Taubaté, 2019. 17

SANTOS, F. **Drone: Construa O Seu Do Zero – Parte 2**. 2016. Disponível em: <https://www2.decom.ufop.br/imobilis/drone-zero-parte-2/>. Acesso em: 05 de Janeiro 2024. 18, 27

SILVA, A. D. da C.; LEAL, L. F. L.; NETO, O. P. de F.; LIRA, J. G. de A. Método de avaliação do estado de funcionamento dos servo motores de uma aeronave rádio controlada. 2018. 27

SILVA, B.; SCHIRMER, A. S.; BARRIQUELLO, C. H.; ABASCAL, C.; NESVERA, D. A.; SILVA, G. J.; BAGGIO, J. E.; DEUTSCH, R. Measures of attitude angles of a quadricopter with a complementary filter. In: **Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Joinville-SC**. [S.l.: s.n.], 2015. 27

TEIXEIRA, E. H. C. G. et al. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. [S.l.]: Editora Blucher, 2010. 32

TUFAILE, F. M. Análise dinâmica e projeto de controle de um quadricóptero. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITECNICA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2017. 12

VALENCIA, E. G. México exportador de drones a república de Chile. Eduardo González Valencia, 2017. 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16

VIEIRA, A. G. B.; MARQUES, G. R. Confecção drone quadricóptero. **Anais do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Evangélica de Goiás-UniEVANGÉLICA**, v. 2, n. 1, p. 9–14, 2019. 3

VILLALOBOS, J. L. C.; MENCHACA, A. E. J.; TERRAZAS, A. L.; VÁZQUEZ, F. M. El mundo de los drones: tipos de drones y sus principales usos. **FINGUACH. Revista De Investigación Científica De La Facultad De Ingeniería De La Universidad Autónoma De Chihuahua**, v. 4, n. 14, p. 3–5, 2018. 6, 7

WARDOYO, A. S.; SARY, I. P.; MAULANA, I. T. An analysis of the performance of autonomous navigation on an ardupilot-controlled rover. **Ultima Computing: Jurnal Sistem Komputer**, v. 14, n. 2, p. 82–87, 2022. 29

YEMLE, S.; DURGUDE, Y.; KONDHALKAR, G.; POL, K. Design & analysis of multi-frame for octo & quad copter drones. **Int. Res. J. Eng. Technol.(IRJET)**, v. 6, n. 06, p. 2395–0056, 2019. 15

