



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

JOSÉ CLEILTON DO NASCIMENTO SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE UM DRONE AUTÔNOMO MULTIROTOR DE BAIXO
CUSTO PARA APLICAÇÕES DE ENTREGAS**

REDENÇÃO – CE

2024

JOSÉ CLEILTON DO NASCIMENTO SOUSA

DESENVOLVIMENTO DE UM DRONE AUTÔNOMO MULTIROTOR DE BAIXO
CUSTO PARA APLICAÇÕES DE ENTREGAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Computação, do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto.

REDENÇÃO – CE

2024

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Sousa, José Cleilton do Nascimento.S725d

Desenvolvimento de drone autônomo multirrotor de de baixo custo para aplicações de entrega / José Cleilton do Nascimento Sousa. -Redenção, 2024.

79f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Computação, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto.

1. Drones. 2. Controle. 3. Autônomo. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 629.1326

JOSÉ CLEILTON DO NASCIMENTO SOUSA

DESENVOLVIMENTO DE UM DRONE AUTÔNOMO MULTIROTOR DE BAIXO
CUSTO PARA APLICAÇÕES DE ENTREGAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Computação, do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Data de aprovação: 03/12/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Prof^a. Dra. Lígia Maria Carvalho Sousa

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Prof. Dr. Francisco Olimpio Moura Carneiro

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Dedico esse trabalho a Deus.

Aos meus pais, Graça Sales e Cleilson Sousa.

E a todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão do mesmo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus, pela força, sabedoria e por ter me guiado ao longo dessa jornada, mantendo minha fé firme mesmo diante das adversidades.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo apoio constante e pelos ensinamentos que me moldaram e me trouxeram até aqui.

À minha namorada, Ruthceli Praciano, por estar sempre ao meu lado, me ajudando, incentivando e compreendendo os desafios enfrentados ao longo deste processo.

Aos meus professores, especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto, pela orientação, paciência e pelo conhecimento compartilhado, essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu grande amigo de classe e de vida, Lucas Pinheiro, que, apesar das minhas brincadeiras que o irritaram constantemente, esteve ao meu lado desde o início dessa trajetória.

E a todos os meus familiares e colegas, que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização deste momento, minha eterna gratidão. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada demonstração de carinho foram fundamentais para que eu alcançasse este objetivo.

Our fields of experience have no more definite boundaries than have our fields of view. Both are fringed forever by a more that continuously develops, and that continuously supersedes them as life proceeds.
(William James, 1912: 38)

RESUMO

Nos últimos anos, os drones têm se destacado como uma tecnologia inovadora, conquistando crescente popularidade devido à sua versatilidade e à vasta gama de aplicações, que incluem desde a entrega de mercadorias até missões de monitoramento ambiental. Esses dispositivos estão gradualmente substituindo aeronaves de maior porte, principalmente devido à sua praticidade, flexibilidade e custos operacionais reduzidos. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo de um drone quadricóptero, projetado para transportar produtos de forma precisa e mensurada. A pesquisa envolveu uma análise aprofundada das legislações que regulamentam o uso de drones no espaço aéreo brasileiro, destacando os critérios e os desafios para a implementação dessa tecnologia no Brasil. Além disso, foram abordados diferentes modelos de drones e suas aplicações, discutindo os principais componentes dessas aeronaves e as técnicas de controle utilizadas em sua operação. O trabalho também apresentou os métodos de montagem e calibração do drone, utilizando o software ArduPilot para o planejamento de voos autônomos por meio da controladora de voo PixHawk. Outro ponto relevante foi a análise de desempenho do equipamento, considerando critérios como carga máxima transportada, autonomia de voo e precisão das entregas. O intuito foi identificar as possíveis aplicações práticas do drone em diferentes cenários. Por se tratar de um projeto multidisciplinar, o desenvolvimento deste trabalho exigiu conhecimentos prévios em áreas como eletrônica, mecânica, software, aeronáutica e pilotagem de drones.

Palavras-chave: Drones; Prototipagem, Voo Autônomo; PixHawk; ArduPilot; Sistemas de Controle; Legislação; Entregas; Logística.

ABSTRACT

In recent years, drones have emerged as an innovative technology, gaining increasing popularity due to their versatility and wide range of applications, including goods delivery and environmental monitoring missions. These devices are gradually replacing larger aircraft, mainly because of their practicality, flexibility, and reduced operational costs. This work aims to develop a low-cost prototype of a quadcopter drone designed to transport products accurately and in a measured manner. The research involved an in-depth analysis of the legislation regulating drone use in Brazilian airspace, highlighting the criteria and challenges for implementing this technology in Brazil. Furthermore, various drone models and their applications were discussed, addressing the main components of these aircraft and the control techniques used for their operation. The study also presented the drone assembly and calibration methods, using the ArduPilot software for autonomous flight planning through the PixHawk flight controller. Another key aspect was the performance analysis of the equipment, evaluating factors such as maximum payload, flight autonomy, and delivery precision. The goal was to identify practical applications of the drone in different scenarios. As a multidisciplinary project, the development of this work required prior knowledge in areas such as electronics, mechanics, software, aeronautics, and drone piloting.

Keywords: Drones; Prototyping; Autonomous Flight; PixHawk; ArduPilot; Control Systems; Legislation; Deliveries; Logistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mercado global de drones.	18
Figura 2 – Drone de entregas da iFood.	18
Figura 3 – Principais tipos de drones.	26
Figura 4 – Drones multirotores e suas derivações.	28
Figura 5 – Sentidos de rotação dos motores de um quadrirotor.	28
Figura 6 – Movimentos de um quadrirotor.	29
Figura 7 – Critérios visuais de operação de RPAs.	30
Figura 8 - Aeronave após impacto com um drone.	33
Figura 9 – Fluxograma das etapas do protótipo.	34
Figura 10 – Frame TBS Discovery.	35
Figura 11 – Centro de Gravidade do TBS Discovery.	36
Figura 12 – Motores brushless.	37
Figura 13 – Ficha técnica do motor brushless 2212.	37
Figura 14 – Eletronic Speed Control (ESC).	38
Figura 15 – Características geométricas de uma hélice.	40
Figura 16 – Método de triangulação.	40
Figura 17 – Módulo GPS M8n.	41
Figura 18 – Módulo de telemetria.	42
Figura 19 – Comandos do rádio.	43
Figura 20 – Bateria LiPo.	43
Figura 21 – Controladora de voo PixHawk.	44
Figura 22 – Controladora de voo PixHawk.	45
Figura 23 – Portas da PixHawk.	46
Figura 24 – Portas auxiliares.	47
Figura 25 – Mapeamento dos componentes.	49
Figura 26 – Desenho esquemático.	49
Figura 27 – Plataforma de teste dos componentes.	50
Figura 28 – Montagem dos componentes na estrutura.	51
Figura 29 – Desenho do Trem de pouso.	51
Figura 30 – Vista inferior do drone.	52
Figura 31 – Desenho do mecanismo em 3D.	53
Figura 32 – Mecanismo de liberação.	53

Figura 33 – Tela principal do Mission Planner.....	54
Figura 34 – Processo de calibração da bússola.	56
Figura 35 – Diferentes critérios de altitude.	57
Figura 36 – Listas de waypoints e eventos.....	59
Figura 37 – Planejamento da missão.	60
Figura 38 – Posicionamento do drone no pré-voo.....	61
Figura 39 – Ground Station.	61
Figura 40 – Tela principal de controle do Mission Planner.....	62
Figura 41 – Drone montado.....	63
Figura 42 – Altitude x Distância em metros.	65
Figura 43 – Descarga da bateria.	66
Figura 44 – Corrente em ampere (A).	68
Figura 45 – Precisão de entrega.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das exigências de cada classe.....	31
Tabela 2 – Lista de componentes e preços.....	48
Tabela 3 – Cronograma do plano de voo	59
Tabela 4 – Ficha técnica TBS Delivery	64
Tabela 5 – Relação entre a quantidade de satélites detectados e a precisão de entrega do drone	68
Tabela 6 – Tabela tarifária do Ceará 2024	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEV	Autorização Especial de Voo
AGL	Altitude above Ground Level
ALT	Altitude
ALTHOLD	Altitude Hold
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
ASL	Altitude above Sea Level
BVLOS	Beyond Visual Line Of Sight
BLDC	Brushless Direct Current
CACR	Certificado de Aeronavegabilidade de Categoria Restrita
CAER	Certificado de Aeronavegabilidade Especial
CAVE	Certificado de Autorização de Voo Experimental
CAP	Certificado de Aeronavegabilidade Padrão
CCW	Counterclockwise
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
CW	Clockwise
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
ESC	Electronic Speed Control
EMF	Electromotive Force
GPS	Global Positioning System
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços
IMU	Inertial Measurement Unit
kWh	Quilowatt Hora
LiPo	Polímero de Lítio
NOTAM	Notice to Airmen
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
ONU	Organização das Nações Unidas
OSD	On-Screen Display
PIS	Programa de Integração Social
PWM	Pulse Width Modulation

RC	Rádio Controle
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RTL	
RX	Receiver
SARPA	Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas
SISANT	Sistema de Aeronaves Não Tripuladas
SGCH	Sistema de Gestão de Certificação e Homologação
TE	Tarifa de Energia
TBS	Team Black Sheep
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TX	Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAS	Unmanned Aircraft Systems
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados
VLOS	Visual Line Of Sight
VTOL	Vertical Takeoff and Landing
FPV	First Person Vision
WPs	Waypoints

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS.....	20
1.1.1	Objetivo geral.....	20
1.1.2	Objetivos específicos.....	20
1.2	JUSTIFICATIVA.....	20
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	A UTILIZAÇÃO DE DRONES NO TRANSPORTE DE CARGAS	23
2.2	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA USO DE DRONES	25
2.3	TIPOS DE DRONES	26
2.4	TÉCNICAS DE CONTROLE PARA QUADRIROTORES	28
2.5	CLASSIFICAÇÃO DOS DRONES DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA.....	30
2.5.1.	Norma ICA 100-4.....	32
2.5.2.	Riscos na utilização de drone para entregas.....	32
3	DESENVOLVIMENTO DO DRONE	34
3.1	PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS NA MONTAGEM DO PROTÓTIPO	34
3.1.1	Estrutura do drone	34
3.1.2	Motores	36
3.1.3	Controlador Eletrônico de Velocidade	38
3.1.4	Hélices	39
3.1.5	Módulo GPS (Global Positioning System)	40
3.1.6	Módulo de telemetria.....	41
3.1.7	Rádio Controle	42
3.1.8	Bateria LiPo.....	43
3.1.9	Power Módulo	44
3.1.10	Controladora de voo	45
3.2	CUSTOS DOS COMPONENTES.....	47
3.3	ESQUEMA DE MONTAGEM.....	48
3.4	TESTE DE COMPONENTES	50
3.5	MONTAGEM DOS COMPONENTES DA ESTRUTURA DO DRONE	51
3.6	TREM DE POUSO E DISPOSITIVO DE LIBERAÇÃO DO PRODUTO TRANSPORTADO	51
3.6.1.	Mecanismo de gatilho para liberação do produto	52

3.7	CONFIGURAÇÕES DO DRONE NO SOFTWARE MISSION PLANNER	53
3.8	CALIBRAÇÕES BÁSICAS	55
3.8.1.	Calibração do acelerômetro	55
3.8.2.	Calibração do giroscópio.....	55
3.8.3.	Calibração da bússula	56
3.9	AUTORIZAÇÃO DE VOO	56
3.10	PLANEJANDO DA MISSÃO COM <i>WAYPOINTS</i>	57
3.11	EXECUÇÃO DA MISSÃO	60
4	RESULTADOS	63
4.1	TBS DELIVERY	63
4.2	REGISTRO DE VOO	65
4.2.1	Dados de altimetria	65
4.2.2	Tensão da bateria durante o voo.....	66
4.2.3	Corrente da bateria durante o voo	67
4.3	PRECISÃO DA ENTREGA	68
4.4	CUSTOS OPERACIONAIS	69
4.4.1	Energia consumida pelo carregador	69
4.4.2	Cálculo do custo de energia para carregar a bateria.....	70
5	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

O uso de drones para transporte e logística tem se expandido rapidamente, com um crescimento substancial nos últimos anos. Essa tendência é impulsionada pela necessidade de soluções de entrega rápidas e eficientes, especialmente no setor de e-commerce. Os drones oferecem vantagens significativas em termos de redução de custos e agilidade, sendo capazes de realizar entregas de pacotes pequenos e médios de maneira mais eficiente do que os métodos tradicionais. A pandemia de COVID-19 acelerou a adoção de drones, já que as limitações de mobilidade e a necessidade de distanciamento social aumentaram a demanda por entregas autônomas (The Business Research Company, 2023).

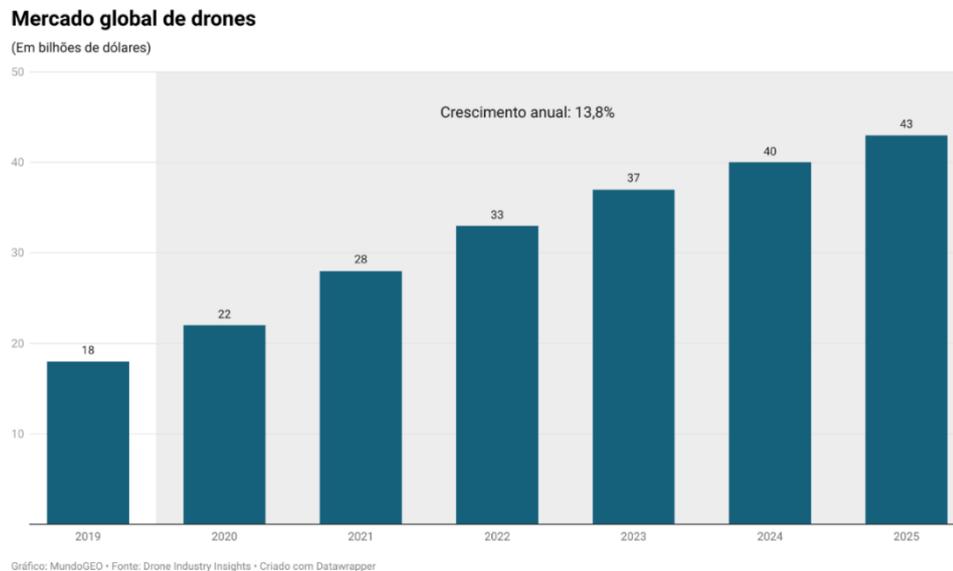
O termo VANT, que significa “veículos aéreos não tripulados”, é frequentemente utilizado para designar aeronaves militares controladas remotamente. Por outro lado, a palavra “drone”, derivada do inglês que significa “zangão”, refere-se a dispositivos pequenos e ágeis. Wonzoski e Oliveira oferecem uma descrição detalhada desse conceito:

O termo drone adotado surgiu após lançamento de pequenos aeromodelos que utilizam rotores, proporcionais ao seu tamanho, controlados via rádio ou de forma autônoma. Esses veículos podem possuir de duas a oito hélices, sendo o modelo quadrirotor o mais utilizado atualmente, com uso de um microcontrolador auxiliado por diversos sensores para que o mesmo possa voar, contendo sensores para manter a estabilização como o giroscópio, e o acelerômetro com função de saber o nível de inclinação do drone. Com essas informações o mesmo pode acelerar ou desacelerar cada motor individualmente para manter o veículo nivelado, auxiliando assim, na pilotagem. Alguns drones possuem tecnologias extras como GPS, magnetômetro e barômetro (WONZOSKI, F. de O.; OLIVEIRA, A, 2020).

O uso de drones para entrega tem sido um ponto focal nas discussões sobre a indústria de drones. No entanto, a resposta à pergunta “A minha pizza será entregue por drone em breve?” é, na maioria dos casos, provavelmente “improvável” no futuro próximo. A entrega por drones apresenta complexidades significativa. Porém, cenários alternativos de entrega, como o envio para pequenas estações de embalagem, são mais plausíveis, especialmente em centros urbanos densamente povoados. Em 2019, uma empresa alemã especializada em pesquisas sobre a indústria de drones, mensurou que a taxa anual de crescimento global do mercado de drones é projetada para ser de 13,8% entre 2020 e 2025. Durante esse período, a receita do setor deverá aumentar de US\$ 22 bilhões para US\$ 43 bilhões. Esse crescimento implica que, em um intervalo de cinco anos, o mercado quase dobrará de tamanho (Drone Industry Insights, 2023).

A Figura 1 apresenta um gráfico detalhado sobre essas projeções.

Figura 1 – Mercado global de drones.



Fonte: Drone Industry Insights, 2023.

Drones e veículos não tripulados podem ser uma excelente ferramenta em questões de logística, realizando rotas aéreas sem trânsito, ganhando agilidade e velocidade nas entregas. Além de driblar o tráfego terrestre, os impactos se estendem ao meio ambiente, também, poupando emissão de carbono nesse processo. Iniciativas deste tipo já ocorrem no Brasil, como o realizado em Campinas. Em 2020, a empresa Speedbird realizou entregas por drones em caráter experimental para o iFood na região. A Figura 2 mostra o drone hexáoptero utilizado pela empresa. O teste aconteceu por dois meses e, ao longo do período, mais de 300 entregas ocorreram (ABRASEL, 2020).

Figura 2 – Drone de entregas da iFood.



Fonte: SpeedBird, 2020.

Os Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas (*Unmanned Aircraft Systems* - UAS) emergem como um novo componente significativo da aviação global, despertando o interesse de operadores, indústrias e diversas organizações internacionais, que buscam compreender, definir e promover sua integração plena no espaço aéreo (DECEA, 2023). A maior parte das operações de entrega por drones a serem implementadas concentraram-se no transporte de produtos médicos (ZIEHER et al., 2024).

A empresa Zipline, fabricante norte-americana de veículos aéreos não-tripulados, tem feito experimentos com drones na África desde 2016, começando por Ruanda, depois de ter levantado capital para estabelecer suas operações. Em 2019, foi implementado em Gana, um programa de fornecimento de suprimentos médicos utilizando drones. A iniciativa envolveu 30 aeronaves que eram lançadas de quatro centros de distribuição para entregar diariamente vacinas, bolsas de sangue e medicamentos em 2.000 instalações de saúde em todo o país na região da África Ocidental (ZIEHER et al., 2024).

Estas iniciativas têm demonstrado um potencial transformador em países em desenvolvimento, como Ruanda, Gana e Vanuatu, e em breve, a Índia e a República Democrática do Congo também iniciarão testes e implementações de entregas de medicamentos por drones. Em contextos mais ocidentais, a Suíça utilizou drones por um período de dois anos para testar a entrega de órgãos para transplante. Além disso, diversas nações, incluindo Islândia, Finlândia, Austrália e Estados Unidos, já estão experimentando a entrega de alimentos por meio de drones. Por fim, à medida que grandes empresas de comércio eletrônico e serviços postais, como Walmart, Amazon, Rakuten e JD.com, adentram o mercado de entrega por drones, a entrega de bens de varejo e materiais industriais também está começando a ser realizada por essas tecnologias (Drone Industry Insights, 2023).

Já no Brasil, mobilidade aérea tem apresentado avanços, especialmente com a recente criação do Parque Tecnológico Aeroespacial da Bahia, anunciado pelo Governo Federal em janeiro de 2023. Este parque visa fomentar o ensino e a inovação em aeromobilidade, com um investimento inicial de aproximadamente R\$ 650 milhões, além de recursos para aquisição de equipamentos e laboratórios. O primeiro projeto a ser implementado no local concentra-se no transporte de testes do pezinho e exames toxicológicos de pacientes entre laboratórios e hospitais. A rota conta com três pontos de pouso e decolagem e modal complementar de coleta e entrega – por motocicleta – para levar as amostras até o destino (ESTADÃO, 2024).

Além das iniciativas governamentais, a cidade de Salvador tem se destacado como um exemplo de aplicação da mobilidade aérea, com mais de 5.000 quilômetros sobrevoados por

drones em 2023. O transporte de amostras de exames entre laboratórios e hospitais ilustra a efetividade desse modelo. Em um ano de operações da Speedbird Aero, foram realizados quase 2.000 voos, transportando mais de 3.000 kg. Em resposta a esses avanços, a Prefeitura de Salvador tem promovido medidas para integrar a mobilidade aérea ao planejamento urbano, com o apoio da Secretaria Municipal de Inovação e Tecnologia, reforçando a relevância dessa modalidade de transporte no desenvolvimento regional (G1, 2023).

Diante deste cenário inovador, repleto de desafios, este trabalho busca desenvolver um protótipo de drone quadricóptero capaz de realizar o transporte de pequenas mercadorias por meio de voos autônomos pré-definidos, de forma segura e eficiente. A pesquisa abordará as características essenciais para a construção do drone, além de explorar os procedimentos legais necessários para a operação desse tipo de equipamento no espaço aéreo brasileiro.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver e configurar o hardware e o software de um drone quadrirotor, capaz de transportar pequenas cargas para a execução de missões em diferentes cenários. O drone poderá ser operado manualmente ou de forma semiautônoma, seguindo coordenadas geográficas predefinidas por meio de *Waypoints*.

1.1.2 Objetivos específicos

- Montar um drone do modelo TBS Discovery que seja capaz de transportar uma carga adicional de 500g e percorrer uma distância de até 2km de forma autônoma;
- Apresentar as principais configurações utilizadas no software de configuração de voo ArduPilot;
- Implementar ao drone um sistema de telemetria e transmissão de imagem em tempo real para o acompanhamento de todos os parâmetros essenciais durante o voo;
- Desenvolver um dispositivo para o drone que permita o transporte de pequenos objetos e a sua liberação automática no local previamente programado.

1.2 JUSTIFICATIVA

A utilização de drones para a realização de entregas de produtos no território brasileiro justifica-se por diversos fatores que podem transformar o cenário logístico do país. Primeiramente, a vasta extensão territorial e a diversidade geográfica do Brasil representam desafios significativos para o transporte de mercadorias, especialmente em áreas remotas e de

difícil acesso. Os drones, com sua capacidade de voar diretamente para o destino, podem reduzir significativamente os tempos de entrega, aumentando a eficiência do sistema logístico.

Além disso, a crescente demanda por serviços de entrega rápida, impulsionada pelo aumento do comércio eletrônico, torna a implementação de soluções inovadoras, como os drones, cada vez mais necessária. A utilização desses dispositivos pode minimizar custos operacionais, uma vez que demandam menos recursos em comparação com métodos tradicionais de entrega, como veículos terrestres que possuem alta capacidade de carga e consomem uma quantidade significativa de combustível, elevando assim os custos operacionais.

Em contraste, um veículo com capacidade de carga menor e custos de deslocamento reduzidos pode contribuir para a diminuição dos custos logísticos. Os drones se alinham a essas novas tendências, o que explica os crescentes investimentos das organizações em sistemas que integram a tecnologia dos drones, como sistemas de propulsão, localização e alimentação, entre outros (MATSCHULAT, 2016).

Por fim, o uso de drones para entregas pode melhorar o acesso a produtos essenciais, como medicamentos e alimentos, especialmente em comunidades isoladas, promovendo a inclusão e o desenvolvimento social. Logo, fica claro que a adoção de drones para entregas no Brasil representa uma oportunidade significativa de inovação e melhoria nos serviços logísticos, alinhando-se às demandas contemporâneas da sociedade.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. Nesta Introdução, que compõe o primeiro capítulo, são apresentados o contexto, a justificativa, os objetivos e a organização do estudo.

O Capítulo 2 abrange o referencial teórico, onde são discutidos temas essenciais como os diferentes tipos de drones, suas aplicações no transporte de cargas e as regulamentações vigentes para o uso dessa tecnologia em território nacional.

No Capítulo 3, é detalhado o modelo de drone proposto para a prototipagem neste estudo, abrangendo a análise dos principais componentes utilizados e uma tabela com os respectivos custos. Além disso, são descritos os processos de configuração e calibração necessários para o funcionamento adequado do drone, seguidos pelas etapas para a elaboração de um plano de voo autônomo.

No Capítulo 4, serão apresentados os dados obtidos durante os testes de voo, com uma análise detalhada de aspectos essenciais, como a autonomia de voo, a capacidade de transporte

de carga, a precisão na entrega do produto e a exatidão do pouso ao retornar à base. Os dados são gerados automaticamente pela controladora de voo e transmitidos para o software de controle por meio do módulo de telemetria.

Por fim, no último capítulo, são expostas as conclusões do trabalho, que incluem um diagnóstico da viabilidade do uso de drones como modal logístico para entrega de mercadorias. Esse diagnóstico sintetiza as discussões dos capítulos anteriores, fornecendo uma análise do grau de maturidade do setor de drones no Brasil e avaliando seu potencial prático. A seção final busca identificar os casos de uso nos quais os drones oferecem melhorias significativas e explorar o cenário futuro em relação à possível substituição dos modais de transporte convencionais por essa tecnologia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, discute-se a relevância dos drones no cenário global contemporâneo, explorando seus diversos tipos e aplicações, com ênfase especial nos drones voltados para serviços de entrega, que constituem o foco central deste trabalho. Ademais, serão examinadas as regulamentações vigentes que regem o uso desses equipamentos em território brasileiro, considerando as diretrizes e leis que garantem a segurança e o controle de operações no setor.

2.1 A UTILIZAÇÃO DE DRONES NO TRANSPORTE DE CARGAS

O uso de veículos aéreos autônomos para entregas de encomendas tem alto potencial em termos de economia de tempo, energia e redução de custos (CHIANG et al., 2019). O progresso tecnológico e o crescente número de pacotes a serem entregues são apenas algumas das razões pelas quais este tópico tem sido o foco de várias investigações nos últimos anos.

Entre os anos de 2018 a 2022, 154 artigos orientados para a engenharia foram publicados pela Elsevier sobre entrega baseada em drones e drones autônomos em logística aérea. Uma grande proporção desses trabalhos se concentra no problema de roteamento (ATTENNI et al., 2023; MENG et al., 2023; WANG; SHEU, 2019) ou emprega abordagens sobre otimização e programação logística (WANG et al., 2023).

Muitas aplicações de drones envolvem vigilância utilizando uma câmera a bordo. No entanto, os drones também são capazes de transportar dispositivos além de câmeras e realizar a entrega de pequenas cargas. Os drones têm sido amplamente utilizados pelas forças armadas em combates e para ajuda humanitária (CLARKE, 2014).

Aplicações úteis de drones não militares em diferentes indústrias incluem vigilância e pulverização de culturas na agricultura, monitoramento de tubarões em praias, observação de vida selvagem para conservação, monitoramento de incêndios, pesquisa científica e exploração, vigilância de tumultos e fronteiras internacionais por autoridades policiais e governamentais, cobertura de eventos esportivos e de entretenimento, outras coberturas de mídia, serviços de emergência e resposta a desastres (CLARKE, 2014).

Argumenta-se que as aplicações humanitárias de drones são as mais úteis, já que envolvem a preservação de vidas humanas. Por exemplo, no Nepal, após o terremoto de 2015, drones ajudaram os socorristas a localizarem sobreviventes (CHOI-FITZPATRICK et al., 2016). O uso de drones para aplicações de entrega pode ser explorado em diversos cenários. Um dos setores que mais se beneficia dessa tecnologia é a área da saúde, onde os drones são utilizados para o transporte eficiente de medicamentos, desfibriladores, amostras de sangue e

vacinas (AGATZ et al., 2015). Em contraste com as aplicações humanitárias, os drones também têm sido usados para crimes, como entrega de contrabando para presos, disparo de armas, terrorismo e hacking (CHOI-FITZPATRICK et al., 2016). Além disso, os drones têm sido criticados pela falta de regulamentação adequada, questões de segurança e abuso de privacidade (CLARKE, 2014).

No quesito viabilidade econômica, um dos principais questionamentos quando se trata de entregas utilizando drones é a viabilidade técnica e econômica para o transporte de mercadorias. Segundo D'ANDREA (2014), eles são viáveis. O custo operacional associado diretamente ao drone é de 10 centavos de dólar para 2 kg de carga e 20 km de alcance (10 km para ir e 10 km para voltar).

Em dezembro de 2013, Jeff Bezos, CEO da Amazon, apresentou um vídeo em um popular programa de televisão nos EUA, revelando o Amazon Prime Air, um sistema de entrega que utiliza drones. Essa inovação permitiria que os usuários recebessem seus produtos adquiridos online em até 30 minutos, o que chamou bastante a atenção dos consumidores (MATSCHULAT, 2016). De acordo com Bezos (2013, *apud* BAMBURRY, D., 2015), a limitação de carga dos drones não é uma preocupação, visto que 86% das compras realizadas pesam menos de 2,2 kg.

Atualmente, existem vários exemplos de drones já em uso para o transporte de carga sendo utilizados em diferentes seguimentos. A DHL, empresa de logística alemã e integrante do grupo Deutsche Post DHL Group, informou que já estava utilizando drones de pequeno porte para a entrega de documentos, produtos farmacêuticos e outras pequenas encomendas em distâncias limitadas na Alemanha, Tanzânia e China. Recentemente, a empresa anunciou uma parceria com a Dronamics para empregar aeronaves não tripuladas capazes de transportar até 350 quilos em distâncias que podem alcançar 2.500 quilômetros (FORBES, 2021).

Apesar dos avanços tecnológicos no setor aéreo e nos drones, a regulamentação continua sendo uma das principais barreiras para a expansão dessas tecnologias (MATSCHULAT, 2016). Um exemplo disso é a DHL, que conseguiu autorização para operar seu drone de entrega apenas em uma rota que passa por áreas não habitadas. Embora o drone opere de forma autônoma, ele é monitorado por uma central de controle que acompanha todo o trajeto, garantindo a segurança das operações e o cumprimento das regulamentações alemãs vigentes.

Já no Brasil, a Speedbird Aero, em parceria com a empresa de *delivery* iFood, conseguiu a primeira autorização para entregas comerciais com o modal no país. concedida pela

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). A permissão se limita a entregas de cargas de até 2,5 kg em um raio de 3 km, inclusive em espaços urbanos. Ainda assim, há alguns requisitos para garantir a segurança da operação, como não sobrevoar pessoas, manter distâncias de possíveis fontes de interferências eletromagnéticas e observar alturas máximas e mínimas. As condições meteorológicas também devem ser consideradas (TECNOBLOG, 2020).

2.2 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA USO DE DRONES

Os drones, devido às suas características inerentes ao domínio da aviação, são regulamentados conforme as normas de operabilidade de voos e rotas aéreas, tanto em âmbito nacional quanto internacional. A Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), vinculada à Organização das Nações Unidas (ONU), estabelece no artigo 8º da Convenção de Chicago, datada de 7 de dezembro de 1944 e posteriormente alterada pela Assembleia da OACI (Doc 7300), que nenhuma aeronave capaz de operar sem piloto pode sobrevoar o território de um Estado Signatário sem uma autorização especial emitida por esse Estado. Este último deve ainda comprometer-se a assegurar que o voo dessa aeronave sem piloto, em regiões abertas às aeronaves civis, deve ser controlado de modo a evitar perigo às demais aeronaves (DECEA, 2021).

Considerando que a organização administrativa brasileira é estruturada por agências reguladoras com funções específicas e distintas, e levando em conta as características dos drones, que são classificados como aeronaves que utilizam radiofrequência para controle e pilotagem remota, a regulação desses dispositivos é realizada por diferentes entidades. A Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é responsável pela homologação dos dispositivos em relação aos meios de comunicação, como sensores e aparelhos receptores de sinal. Por sua vez, a ANAC encarrega-se da regulação e fiscalização das aeronaves, assim como da infraestrutura aeroportuária. O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) regula e opera o espaço aéreo e o tráfego aéreo. Assim, essas três entidades atuam de maneira complementar (SANTOS, 2016).

Segundo o próprio DECEA (2021), a regulamentação desse novo setor, que abrange a aviação não tripulada, deve ter um caráter educativo, uma vez que o conhecimento sobre operação de voo, regras de tráfego, navegação e meteorologia, por parte dos interessados nesse segmento, ainda é insuficiente. Para que a utilização de drones, mesmo que apenas para fins recreativos, seja viável, é imprescindível que se esteja em conformidade com as regulamentações da ANATEL. Isso garante que o dispositivo atenda às especificações técnicas de radiofrequência exigidas.

Além disso, é necessário obter as permissões apropriadas do DECEA para a realização de voos, considerando as diferentes categorias, características e classes das aeronaves. Ademais, é fundamental que se possua as certificações emitidas pela ANAC, incluindo Certificado de Autorização de Voo Experimental (CAVE), Autorização Especial de Voo (AEV), Certificado de Aeronavegabilidade Especial (CAER) para Aeronaves Remotamente Pilotadas (*Remotely Piloted Aircraft – RPA*), Certificado de Aeronavegabilidade de Categoria Restrita (CACR) e Certificado de Aeronavegabilidade Padrão (CAP) (ANACANAC, 2017).

2.3 TIPOS DE DRONES

Existem diferentes tipos de drones, cada um com características e aplicações específicas que atendem a diversas necessidades em múltiplos setores e ambientes. Cada modelo apresenta vantagens e limitações, relacionadas ao uso para o qual foi projetado. A Figura 3 mostra os quatro principais tipos de drones, sendo eles, multirotor, asa fixa, rotor único e híbrido VTOL (*Vertical Takeoff and Landing*) (GEOONE, 2023).



Fonte: TKác; MéSáROš, 2019.

De acordo com a GEOONE (2023), esses quatro modelos podem ser classificados da seguinte maneira:

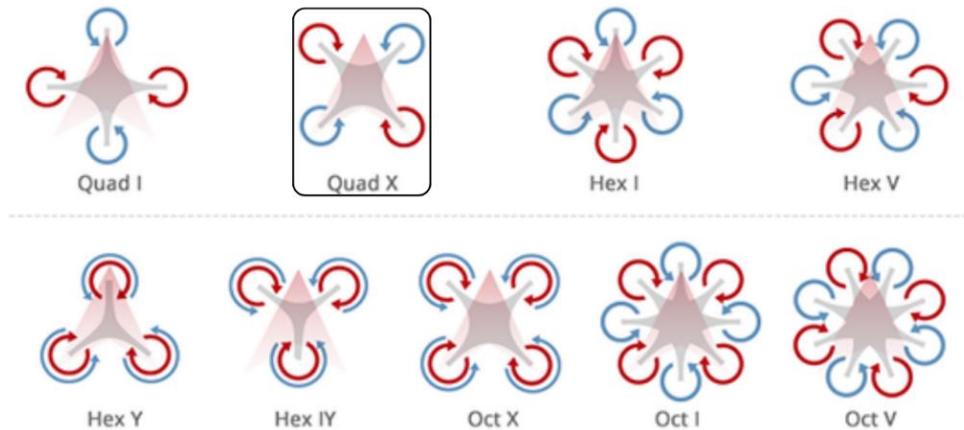
1. *Multirotor*: Os drones multirotores destacam-se como os modelos mais comuns e populares para aplicações comerciais e recreativas. Esses dispositivos são equipados com múltiplos rotores, geralmente variando de quatro a oito, os quais geram sustentação e controle por meio da modulação da velocidade e direção dos rotores. Sua alta manobrabilidade permite que realizem operações de voo estacionário e mudanças de direção rápidas. Contudo, apresentam algumas desvantagens, como menor autonomia

de voo, capacidade de carga limitada e estabilidade reduzida em condições de vento. Entre suas principais aplicações, destacam-se o mapeamento, inspeções e fotografia aérea em curta distância.

2. *Asa fixa*: Os drones de asa fixa apresentam uma configuração similar à das aeronaves convencionais, possuindo uma única asa. Projetados para operar como um avião, esses drones são capazes de cobrir distâncias maiores e de permanecer em voo por períodos prolongados. No entanto, suas desvantagens incluem a necessidade de uma pista para decolagem e pouso, menor manobrabilidade em ambientes restritos e a exigência de habilidades avançadas de pilotagem. Frequentemente, são utilizados em levantamentos topográficos de grandes áreas e no monitoramento agrícola.
3. *Rotor único*: Os drones de rotor único, ou helicópteros não tripulados, possuem um rotor principal que gira verticalmente para sustentação e controle, junto com um rotor de cauda para estabilidade. Eles são mais complexos de operar em comparação com os multirotores, mas oferecem vantagens em termos de capacidade de carga útil e resistência ao vento. São usados em aplicações como inspeções industriais e mapeamento de terrenos acidentados.
4. *Híbrido VTOL (Decolagem e Pouso Vertical)*: Os drones híbridos VTOL combinam características de aeronaves de asa fixa e multirotores. Eles são capazes de decolar e pousar verticalmente, como os multirotores, e, em seguida, transitar para o voo horizontal de asa fixa, o que permite cobrir distâncias maiores de maneira mais eficiente. No entanto, essas aeronaves apresentam algumas desvantagens, incluindo complexidade mecânica e de controle, menor autonomia de voo e capacidade de carga, maior consumo de energia e maior suscetibilidade a danos em pousos forçados. Esses drones são frequentemente selecionados para tarefas que demandam longos voos, como monitoramento ambiental e mapeamento de grandes áreas.

Para o protótipo desenvolvido nesse trabalho, foi utilizado o modelo quadricóptero para a estruturação do drone. Esse modelo apresenta benefícios que os VANTs de asa fixa não possuem, como a capacidade de decolagem vertical, maior facilidade de manobra e a habilidade de pairar no ar. Outra vantagem significativa é que o quadricóptero não requer uma área extensa para aterrissagem, ao contrário dos drones de asa fixa, que necessitam de espaço considerável para esse fim. Essas características são vantajosas para que o drone consiga fazer o transporte de cargas e entregas de forma mais precisa e controlada. A Figura 4 mostra as diferentes configurações de drones multirotores mais comuns.

Figura 4 – Drones multirotores e suas derivações.



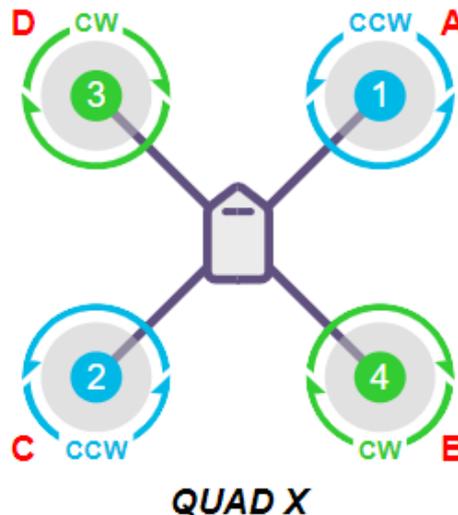
Fonte: LinkedIn, 2020.

2.4 TÉCNICAS DE CONTROLE PARA QUADRIROTORES

Nesta seção, serão apresentadas as principais técnicas de controle utilizadas em drones quadricópteros. O controle de voo de um drone quadricóptor é viabilizado pela configuração específica de rotação de seus motores, que desempenha um papel fundamental na estabilização e na manobrabilidade do equipamento.

Como ilustrado na Figura 5, a disposição dos motores obedece a uma orientação alternada: dois motores giram no sentido horário (CW), enquanto os motores adjacentes a estes giram no sentido anti-horário (CCW), formando pares opostos de rotação. Essa configuração permite o equilíbrio das forças de torque geradas pelos motores, evitando rotações indesejadas e garantindo um controle preciso dos movimentos (PIXHAWK, 2018).

Figura 5 – Sentidos de rotação dos motores de um quadricóptero.

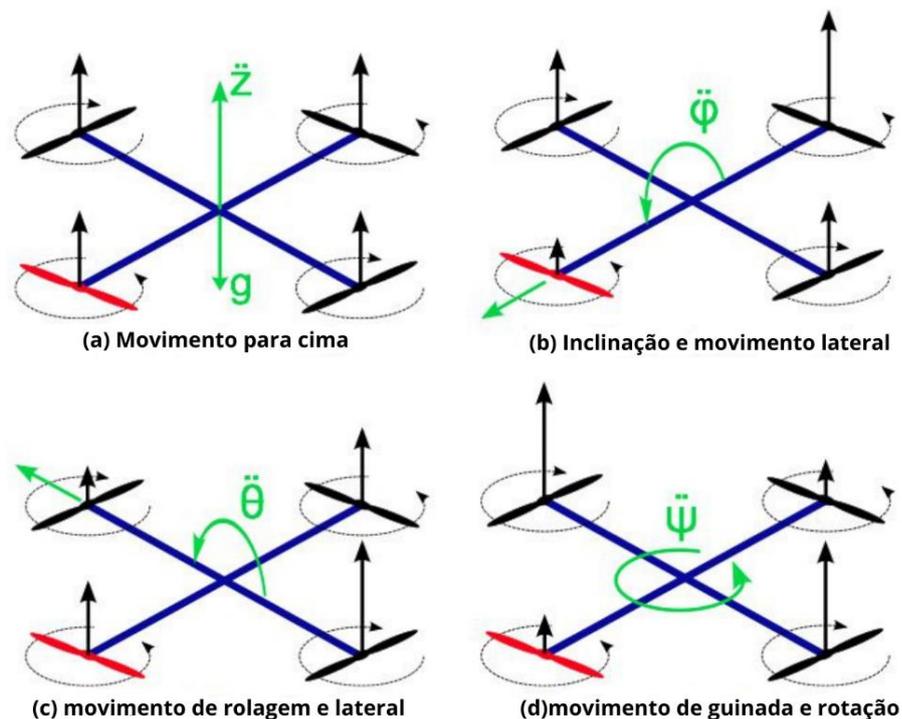


Fonte: PIXHAWK, 2018.

Uma configuração comum de hélices em multirotores geralmente consiste em quatro hélices, mais conhecidas como um quadricóptero. Outras configurações conhecidas de multirotores incluem tricópteros, hexacópteros e octocópteros. Diferentes configurações são utilizadas para diferentes áreas de aplicação e apresentam variações de desempenho em termos de tempo de voo, agilidade, estabilidade e capacidade de carga útil (KADAMATT, 2017).

A principal função das hélices é gerar força de sustentação suficiente para elevar a aeronave e fornecer empuxo adequado para mover sua posição atual para frente, para trás, à esquerda ou à direita. A atitude dos multirotores é ajustada pela diferença na velocidade de rotação de cada hélice. A Figura 6 ilustra como a atitude da aeronave muda e o movimento correspondente do corpo quando a velocidade de rotação de determinadas hélices é manipulada (SAID, 2014). Existem quatro movimentos básicos para quadricópteros.

Figura 6 – Movimentos de um quadricóptero.



Fonte: RAHMA, 2018.

Um multirotor deve ser capaz de alcançar um voo razoavelmente estável durante o voo, pairado antes de tentar manobrar nos eixos de *pitch* (Inclinação), *roll* (Rolagem) e *yaw* (Guinada). Um voo estável exige que os eixos de *pitch* e *roll* sejam estabilizados primeiro. O multirotor estará em risco de tombar e cair caso esses eixos não sejam controlados adequadamente. As atitudes de *pitch* e *roll* são determinadas utilizando o giroscópio e o acelerômetro integrados na Unidade de Controle de Voo (RAHMA, 2018).

2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS DRONES DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

De acordo com a ANAC (2015), os drones de uso comercial, corporativo ou experimental (RPA) estão categorizados em três classes, de acordo com o peso máximo de decolagem do equipamento.

- *Classe 1 – Acima de 150kg*

A regulamentação prevê que equipamentos desse porte sejam submetidos a processo de certificação similar ao existente para as aeronaves tripuladas, promovendo ajustes dos requisitos de certificação ao caso concreto. Esses drones devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula.

- *Classe 2 - Acima de 25kg e abaixo ou igual a 150kg*

O regulamento estabelece os requisitos técnicos que devem ser observados pelos fabricantes e determina que a aprovação de projeto ocorrerá apenas uma vez. Além disso, esses drones também devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula.

- *Classe 3 - Abaixo ou igual a 25kg*

A norma determina que as RPA Classe 3 que operem além da linha de visado visual (BVLOS – *Beyond Visual Line of Sight*) ou acima de 400 pés (120m) deverão ser de um projeto autorizado pela ANAC e precisam ser registradas e identificadas com suas marcas de nacionalidade e matrícula.

Além do peso, critérios visuais de operação são essenciais para a avaliação da segurança e dos riscos associados ao voo. A ANAC classificou esses critérios em três categorias distintas, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Critérios visuais de operação de RPAs.



Fonte: ANAC, 2017.

- *BVLOS (Beyond Visual Line of Sight)* é a operação na qual o piloto não consegue manter o drone dentro de seu alcance visual, mesmo com a ajuda de um observador.
- *VLOS (Visual Line Of Sight)* é a operação em que o piloto mantém o contato visual direto com o drone, sem auxílio de equipamentos ou observador.
- *EVLOS (Extended Visual Line Of Sight)* é a operação onde o piloto remoto só mantém o contato visual direto com o drone com auxílio de lentes ou equipamentos e com auxílio de observadores de drone.

Drones da classe 3 que operarem em até 400 pés, aproximadamente (120m) acima da linha do solo e em linha de visado visual (operação VLOS), não precisarão ser de projeto autorizado, mas deverão ser cadastradas na ANAC por meio do Sistema de Aeronaves não Tripuladas (SISANT), apresentando informações sobre o operador e sobre o equipamento. Os drones com até 250g não precisam ser cadastrados ou registrados, independentemente de sua finalidade (uso recreativo ou não).

O primeiro passo para a operação de um drone (RPA) por empresas ou pessoas físicas é a homologação do equipamento no portal da ANATEL, por meio do Sistema de Gestão de Certificação e Homologação (SGCH). Após concluir essa etapa, é necessário realizar o cadastro junto à ANAC. A tabela 1 apresenta um resumo das exigências operacionais de cada classe de drone mencionado anteriormente de acordo com as normas da ANAC.

Tabela 1 – Resumo das exigências de cada classe

Exigências	RPA Classe 1	RPA Classe 2	RPA Classe 3
Será requerido cadastro?	Sim	Não	Sim
Será requerido registro?	Não	Sim	Não
Será requerido aprovação de projeto?	Sim	Sim	Simplificado
Será requerido processo de certificação?	Sim	Não	Não
Será requerida idade mínima de 18 anos?	Sim	Sim	Sim
Será requerido Certificado Médico?	Sim	Sim	Não
Serão requeridas licença e habilitação?	Sim	Sim	>120m
Será requerido registro dos voos?	Sim	Sim	Não

Fonte: ANAC, 2017.

De acordo com a definição apresentada pela ANAC (2017), o espaço aéreo é caracterizado como uma área de interesse público, finita e estratégica para a defesa nacional. Assim, qualquer equipamento ou artefato que tenha acesso ao espaço aéreo deve estar em

conformidade com as legislações pertinentes, visando garantir uma operação coordenada e segura em relação aos demais usuários desse espaço. Dessa forma, operação de drones (RPA) é restrita, proibindo voos por menores de 18 anos e a realização de manobras a menos de 30 metros de distância horizontal de pessoas não anuentes.

Para os drones RPA da Classe 3 que operam a altitudes inferiores a 400 pés (120 metros) e sob condições de visão direta da aeronave (VLOS), a ANAC somente autoriza os voos mediante o cumprimento das seguintes exigências: a apresentação de uma apólice de seguro com cobertura para danos a terceiros, a disponibilização de um manual de voo (manual do equipamento), a elaboração de uma avaliação de risco operacional conforme as diretrizes sugeridas pela ANAC e a obtenção de uma certidão da aeronave fornecida pelo SISANT da ANAC. Vale ressaltar que drones com peso de até 250 gramas estão isentos dessas exigências.

2.5.1. Norma ICA 100-4

A principal norma do DECEA é a ICA 100-40, que trata das Aeronaves Não Tripuladas e do Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro, um documento que passa por atualizações regulares, sendo a mais recente realizada em maio de 2023. Para efetuar o cadastro e obter autorização para voos de drones (RPA) no espaço aéreo, o DECEA disponibilizou em seu portal um sistema denominado Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) – SARPA. É importante ressaltar que a solicitação no SARPA deve ser realizada após a obtenção das autorizações da ANATEL e da ANAC.

Os prazos para a solicitação de utilização do espaço aéreo variam conforme as características da operação, podendo oscilar entre 45 minutos e 18 dias antes do início das atividades (DECEA, 2019). Ao cadastrar-se no SARPA, qualquer RPA com peso superior a 25 kg, que realize voos BVLOS, voos acima de 120 metros ou voos entre 30 e 120 metros a menos de 9,3 km de aeródromos, só poderá operar se o DECEA emitir um NOTAM, proveniente do inglês *Notice to Airmen*, é traduzida como "Aviso aos Aeronautas". Por outro lado, os RPAs que não se enquadram nessas categorias receberão autorização sem a necessidade de NOTAM.

2.6 RISCOS NA UTILIZAÇÃO DE DRONE PARA ENTREGAS

De acordo com o relatório da SAFEDRONE (2017), o risco de colisão envolvendo drones seria praticamente inexistente caso todos os pilotos operassem em conformidade com as regras estabelecidas. Para reduzir esses e outros riscos, são adotados critérios rigorosos de aprovação para aeronaves comerciais e grandes helicópteros, abrangendo itens como cockpit, tubos de pitot, estrutura e motores, a fim de garantir a continuidade do voo e o pouso seguro

mesmo após o impacto com aves. Embora os danos causados por drones apresentem características distintas devido à diferença de densidade e composição em relação às aves, os impactos de drones geralmente resultam em danos considerados relativamente baixos.

A Figura 8, demonstra um exemplo de acidente aéreo envolvendo um drone e um avião de passageiros em 2017.

Figura 8 - Aeronave após impacto com um drone.

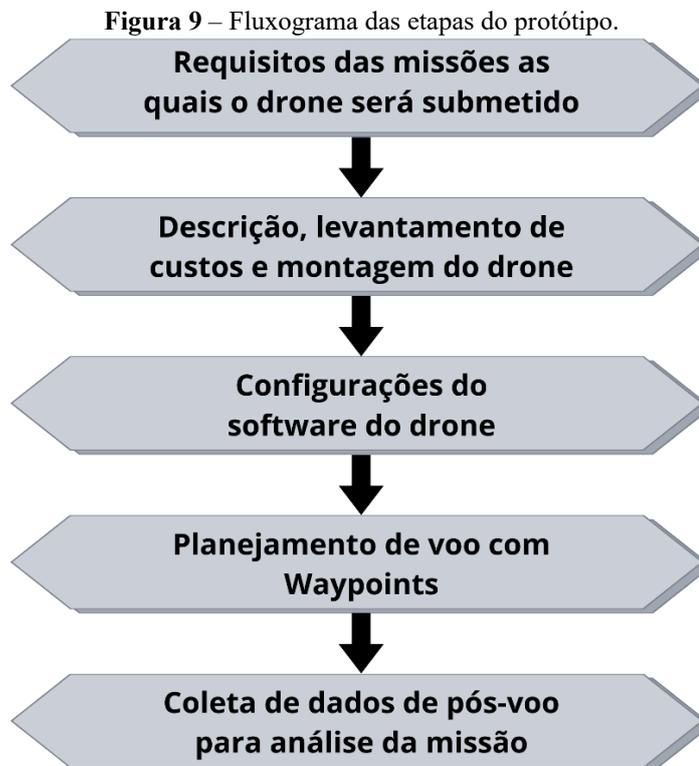


Fonte: EXTRA, 2017.

Segundo Wawrla et al. (2019), os drones apresentam melhor desempenho em ambientes internos do que em externos. Isso ocorre porque, em espaços fechados, os VANTs não enfrentam desafios climáticos, como chuva, vento e neve, além de não estarem sujeitos a restrições legais relacionadas ao voo em aerovias. Além disso, ambientes internos oferecem vantagens econômicas, já que as empresas podem optar por drones menores e mais acessíveis. Já em ambientes externos, surgem desafios tecnológicos, como questões de segurança, falhas operacionais, risco de explosões, limitações nas áreas de voo e problemas de precisão do GPS. Esses fatores negativos são acompanhados de preocupações éticas, envolvendo privacidade e proteção de dados, que também não podem ser ignorados.

3 DESENVOLVIMENTO DO DRONE

Nesta seção, serão detalhados os principais componentes e as especificações de montagem do drone desenvolvido para este estudo. O modelo do drone é apresentado juntamente com uma descrição dos componentes fundamentais e dos métodos aplicados no processo de construção do protótipo. A Figura 8 apresenta um fluxograma das etapas abordadas nessa sessão.



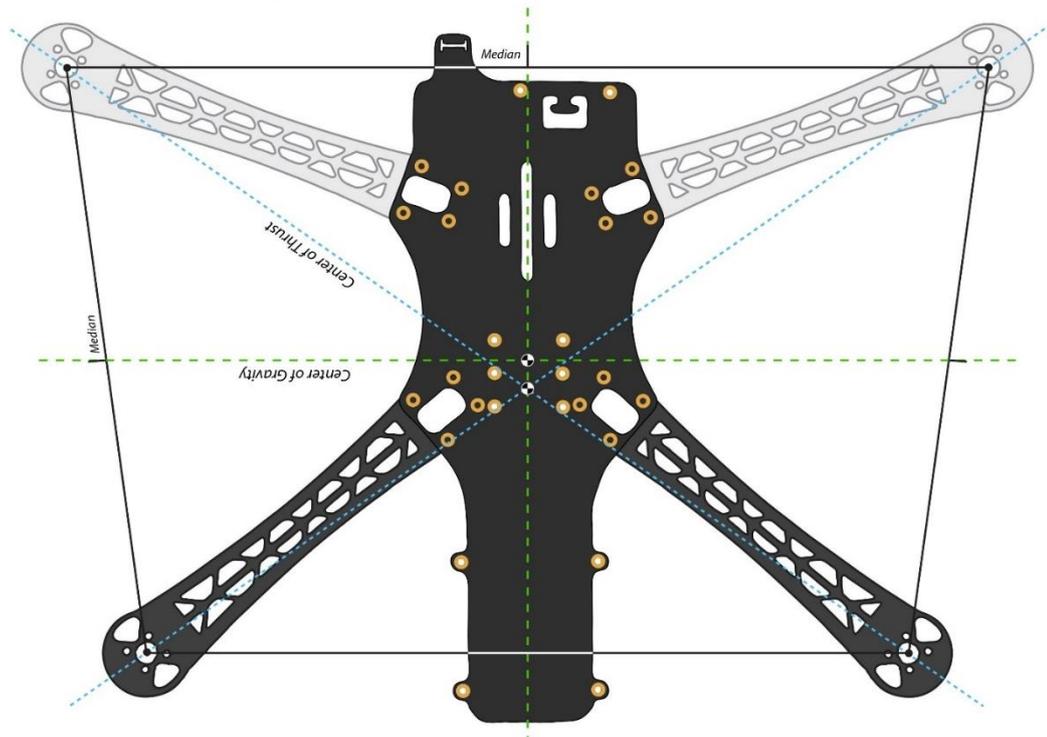
Fonte: Autor, 2024.

3.1 PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS NA MONTAGEM DO PROTÓTIPO

3.1.1 Estrutura do drone

A estrutura do drone, também conhecida como frame, é o componente responsável por acomodar todos os elementos necessários para sua montagem. Para um funcionamento eficiente, o frame deve ser rígido, resistente e leve, de forma que o material seja capaz de absorver as vibrações geradas durante o voo. A estrutura selecionada para a elaboração deste protótipo foi o modelo TBS Discovery. Originalmente desenvolvido pela Team BlackSheep (TBS), ele foi projetado para pilotos e entusiastas que buscam uma estrutura robusta e de alta performance, ideal para voos de longa duração e para o transporte de equipamentos como câmeras e sensores. A Figura 9 mostra o desenho técnico do *frame* e a distribuição da sua estrutura.

Figura 11 – Centro de Gravidade do TBS Discovery.



Fonte: TeamBlackSheep, 2014.

3.1.2 Motores

O motor Brushless Direct Current (BLDC) recebeu atenção significativa por sua característica única de comutação eletrônica, tornando-o indispensável em uma infinidade de aplicações que vão desde eletrônicos automotivos e de consumo até robótica e aeroespacial (MENG et al. 2023). Os motores BLDC operam com o princípio do sistema de comutação controlado eletronicamente, em oposição à comutação mecânica tradicional usada em motores escovados. Um motor BLDC típico consiste em um rotor com ímãs permanentes e um estator com enrolamentos. O controlador eletrônico executa a comutação de energia nos enrolamentos, criando um campo elétrico rotativo que aciona o rotor (PANDYA, 2024).

A principal diferença entre motores de corrente contínua (DC) e motores BLDC reside no modo de condução da corrente elétrica. Em motores DC, a corrente passa pelas bobinas do rotor por meio de escovas e de um comutador; o atrito constante entre as escovas e os polos do comutador resulta em perda de energia e reduz a eficiência desse tipo de motor. Nos motores brushless, a corrente é transmitida através das bobinas do estator, e o movimento do rotor é gerado pela força eletromagnética induzida pelas bobinas (HUGHES; DRURY, 2013).

No mercado, é possível encontrar motores brushless de diferentes tipos e tamanhos. Para este projeto, foram utilizados motores DJI 2212, cuja numeração indica as dimensões do

motor: 22 mm de diâmetro e 12 mm de altura. Esses motores possuem uma potência nominal de 920 kV. A escolha dos motores é uma etapa crítica para o desempenho adequado do drone, pois motores com especificações inadequadas podem comprometer a sustentação e até resultar em quedas. Na Figura 11 é apresentado uma imagem do modelo de motor utilizado nesse trabalho.

Figura 12 – Motores brushless.



Fonte: HOBBYGOIAS, 2022.

Na seleção de um motor, é essencial conhecer detalhes sobre sua eficiência e potência de saída em todo o mapa de torque e rotação (HARRINGTON; KRONINGER, 2013). Para todo motor brushless de uso comercial, é fornecida uma ficha técnica com dados essenciais sobre o seu desempenho, o que permite calcular os limites de carga, além de selecionar hélices e baterias compatíveis. A Figura 12 exibe a ficha técnica do motor brushless utilizado.

Figura 13 – Ficha técnica do motor brushless 2212.

2212 MOTOR								
Item NO.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (g)	Efficiency (g/W)	Operating temperature (°C)
2212 920KV	11.1V	DJI9. 4*4.3	50%	1.8	20.0	230	11.5	37°C
			65%	2.8	31.1	310	10.0	
			75%	3.9	43.3	410	9.5	
			85%	5.5	61.1	480	7.9	
			100%	7.6	84.4	610	7.2	
		APC10*4.5	50%	2.6	28.9	290	10.0	55°C
			65%	5.1	56.6	460	8.1	
			75%	7.4	82.1	590	7.2	
			85%	10.1	112.1	730	6.5	
			100%	13.4	148.7	860	5.8	
	14.8V	DJI9. 4*4.3	50%	2.7	40.0	350	8.8	52°C
			65%	4.4	65.1	490	7.5	
			75%	6.3	93.2	640	6.9	
			85%	8.3	122.8	790	6.4	
			100%	11.5	170.2	990	5.8	

Notes: The test condition of temperature is motor surface temperature in 100% throttle while the motor run 10 min. environment temperature 24°C

Fonte: HOBBYGOIAS, 2022.

Com uma bateria de 14,8 V (4S) e hélices de 9 polegadas, configurações adotadas neste drone, os dados da tabela anterior indicam que cada motor é capaz de gerar um empuxo de até 990g. Assim, os quatro motores operando simultaneamente em potência máxima podem produzir um empuxo vertical total de aproximadamente 4 kg. O peso final estimado do drone, incluindo a bateria mas sem carga adicional, é de cerca de 1,8 kg. Isso demonstra uma boa adequação dos motores para este projeto. Contudo, a carga adicional a ser transportada pelo drone não deve se aproximar excessivamente dos limites operacionais, pois isso comprometeria tanto a eficiência energética das baterias quanto a estabilidade e segurança.

3.1.3 Controlador Eletrônico de Velocidade

Controlador eletrônico de velocidade, em inglês *Electronic Speed Control* (ESC), é um circuito eletrônico que controla e regula a velocidade de um motor elétrico de indução. Também pode fornecer reversão do motor e frenagem dinâmica. O controle da velocidade é realizado por meio de um sinal de *Pulse Width Modulation* (PWM), que é recebido e interpretado pelo microcontrolador contido no Esc (MARIANO; SCICLUNA, 2017).

Uma das maneiras de medir a velocidade do motor é pela análise da intensidade do campo magnético, especificamente da força eletromotriz (EMF - *Electromotive Force*) gerada nas bobinas (HUGHES; DRURY, 2013). Em motores brushless, essa medição pode ser realizada a cada ciclo de acionamento, utilizando o cabo que, naquele ciclo, está inativo. Esse método, conhecido como contra-EMF (CEMF), é amplamente utilizado em ESCs comerciais por apresentar custos mais baixos e dispensar a necessidade de um sensor acoplado à armadura do motor. Para este projeto, foram utilizados ESCs do modelo DJI E300, com potência nominal de 15 amperes (15 A) e uma faixa de tensão variando entre 11,1 V e 14,8 V. A Figura 13 ilustra o modelo de ESC empregado.

Figura 14 – Eletronic Speed Control (ESC).



Fonte: DJI, 2016.

Para a escolha e dimensionamento de um ESC comercial, é essencial considerar a corrente nominal do motor como parâmetro principal. Não se recomenda selecionar um ESC cuja corrente nominal seja igual ou muito próxima à exigida pelo motor, pois isso pode ocasionar desgaste excessivo ou até a queima do componente. A fim de garantir durabilidade e eficiência do sistema, recomenda-se que o valor nominal de corrente do ESC seja aproximadamente 20% superior ao consumo do motor. Além disso, deve-se avaliar a qualidade de execução do sinal PWM da saída do ESC, ou seja, verificar a precisão com que os inversores respondem às solicitações do controlador de voo (MARIANO; SCICLUNA, 2017).

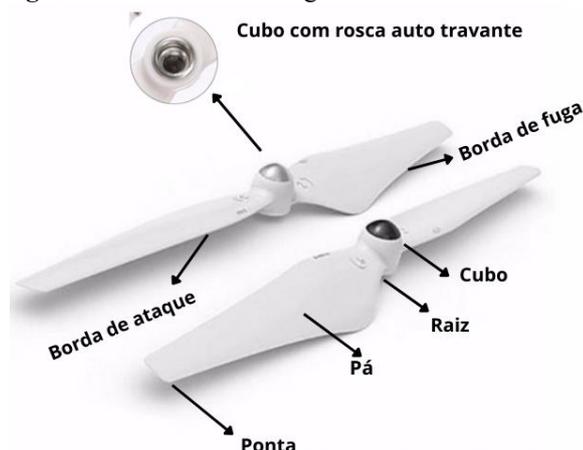
3.1.4 Hélices

Em drones de asas rotativas, como os quadricópteros, hexacópteros e octocópteros, o empuxo vertical é controlado pela velocidade de rotação de cada hélice, em vez de depender de superfícies aerodinâmicas fixas, como ocorre em drones de asas fixas (similares a aeronaves convencionais). A hélice é um componente de grande importância em uma aeronave, cuja função é absorver a força gerada pelo motor e convertê-la na tração necessária para o voo.

Em termos simples, a hélice pode ser descrita como um aerofólio torcido que opera em uma trajetória circular, apresentando um ângulo de ataque positivo em relação ao fluxo de ar, o que resulta na produção de tração em uma direção paralela ao plano de voo da aeronave. As hélices podem variar em configuração, apresentando uma pá (mono-pá), duas pás (bi-pá), três pás (tri-pá) ou mais. O desempenho de uma hélice é influenciado por diversos fatores, entre os quais se destacam: o diâmetro em função da rotação, a área das pás em relação à absorção de potência e o passo (GOMES, 2016).

Cada hélice é caracterizada por duas dimensões principais: o diâmetro e o passo, geralmente expressos em polegadas. O diâmetro corresponde à distância entre as pontas das pás em uma hélice bi-pá; para hélices mono-pá ou de múltiplas pás, o diâmetro é representado pela circunferência descrita durante o movimento. O passo, por sua vez, refere-se ao avanço teórico que a hélice alcançaria em uma única rotação. Por exemplo, uma hélice 13x4 possui um diâmetro de 13 polegadas e um passo de 4 polegadas, indicando que, a cada volta completa, essa hélice se deslocaria 4 polegadas para frente (GOMES, 2016). A Figura 14 a seguir mostra as principais características geométricas de uma hélice.

Figura 15 – Características geométricas de uma hélice.



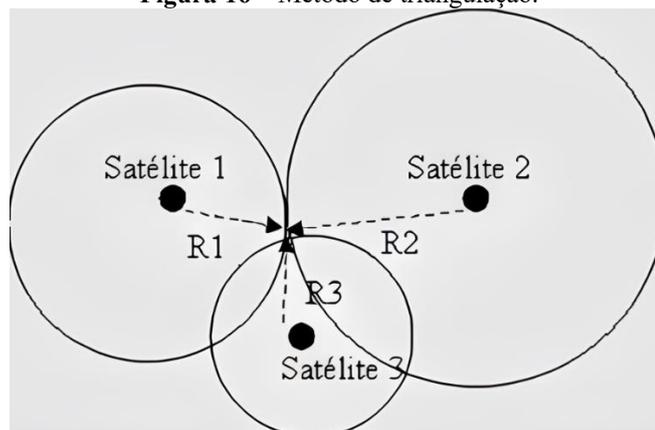
Fonte: DJI, 2016.

Para este protótipo, foram utilizadas hélices DJI modelo 9450, semelhantes a ilustrada na Figura 14. Essas hélices possuem um cubo com rosca autotravante, o que permite que a própria rotação do motor durante o voo as mantenha firmemente presas, garantindo segurança e compatibilidade total com os motores previamente apresentados.

3.1.5 Módulo GPS (Global Positioning System)

O *Global Positioning System* (GPS) é um sistema espacial cujo funcionamento básico consiste na transmissão e recepção de sinais entre satélites e receptores, utilizando ondas eletromagnéticas. A partir do tempo decorrido entre a emissão e a recepção dos sinais, é possível calcular a distância entre os satélites e o receptor, considerando que as ondas eletromagnéticas se propagam à velocidade da luz. Dessa forma, as coordenadas de posição do receptor podem ser determinadas quando ele está conectado a, no mínimo, três satélites, formando uma triangulação. Para obter a altitude, é necessário um quarto satélite transmissor (STOPHER et al., 2012).

Figura 16 – Método de triangulação.



Fonte: JOHNSON, 2017.

O sistema atual é composto por uma constelação de 24 satélites (21 ativos e 3 reservas) distribuídos em 6 planos orbitais com uma inclinação de 55 graus em relação ao plano do Equador, fornecendo informações de posição espacial, velocidade e tempo em um sistema de referência comum, a qualquer instante e em qualquer ponto da superfície terrestre, independentemente das condições meteorológicas. Os dados podem ser emitidos em intervalos de milissegundos ou de acordo com a programação configurada. Devido à rapidez na obtenção dos dados, o uso do GPS tem aumentado continuamente, tornando-se o sistema padrão para georreferenciamento (STOPHER et al., 2012).

O módulo GPS, com sua capacidade de obter localização em tempo real, é um componente essencial para drones autônomos, permitindo que o drone se localize e navegue durante o voo. A escolha de um módulo GPS adequado é crucial, pois influencia diretamente a precisão da rota a ser seguida, assim como a exatidão dos pontos de pouso e decolagem. Neste projeto, utiliza-se o módulo Ublox M8n (Figura 16), pois além de ser compatível com a controladora aplicada no drone, também é amplamente reconhecido por sua qualidade e precisão, sendo um dos modelos mais utilizados atualmente em drones e aeromodelos.

Figura 17 – Módulo GPS M8n.



Fonte: JOHNSON, 2017.

3.1.6 Módulo de telemetria

O módulo de telemetria é um componente essencial no desenvolvimento de drones autônomos supervisionados. Esse dispositivo permite a transmissão bidirecional de dados de voo em tempo real entre o drone e a estação de controle, viabilizando um monitoramento contínuo e preciso da operação. Alguns dos principais dados transmitidos são: Tensão e corrente da bateria, altura e distância do drone em relação ao ponto de decolagem, localização e qualidade dos sinais de rádio e vídeo.

A unidade transmissora conecta-se diretamente à controladora de voo do drone por meio de uma interface de telemetria, enquanto a unidade receptora é acoplada a um computador ou dispositivo móvel com software específico para a leitura e análise dos dados recebidos. Na

Figura 17 é apresentado um modelo similar ao utilizado neste projeto, ilustrando sua configuração e função no sistema.

Figura 18 – Módulo de telemetria.



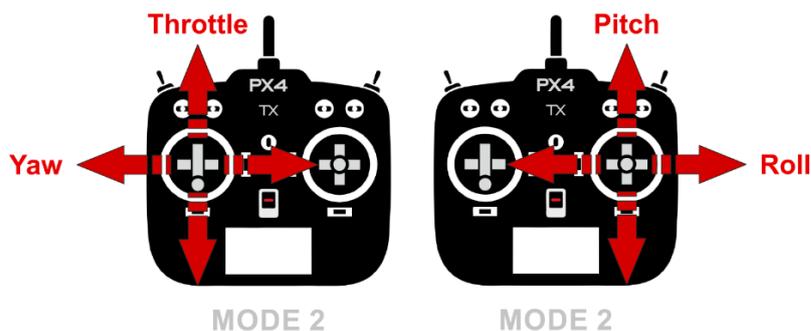
Fonte: RCDRONE, 2017.

O módulo de telemetria utiliza uma tecnologia de transmissão de dados LoRa (*Long Range*) é uma modulação de radiofrequência que permite a transmissão de dados a longas distâncias com baixo consumo de energia, sendo especialmente adequada para aplicações de baixa taxa de transferência, como telemetria em drones. Desenvolvida pela Semtech Corporation, a tecnologia utiliza modulação por espalhamento espectral (*spread spectrum*), o que proporciona alta sensibilidade e resistência a interferências, tornando-a ideal para ambientes com obstáculos ou interferência eletromagnética, como áreas urbanas e rurais (CENTENARO et al., 2016).

3.1.7 Rádio Controle

Um sistema de controle remoto (RC) consiste em uma unidade terrestre que permite ao operador comandar o veículo remotamente. Essa unidade possui controles físicos que possibilitam a definição de diversos parâmetros de movimento do veículo, como velocidade, direção, aceleração, guinada, inclinação e rotação. Além disso, permite a ativação de modos automatizados de voo, incluindo decolagem, pouso, retorno à base e execução de missões programadas. A forma mais comum da unidade de controle remoto para UAVs é ilustrada na Figura 18. Nela, os *joysticks* são configurados para controlar separadamente o *roll/pitch* e o *throttle/yaw*. Essa configuração exige que a aeronave disponha de, no mínimo, quatro canais de comunicação.

Figura 19 – Comandos do rádio.



Fonte: PIXHAWK, 2018.

A unidade transmissora (TX) do controle remoto, contém um módulo de rádio que transmite comandos do operador para o módulo receptor (RX) no veículo. O RX, por sua vez, está conectado ao controlador de voo, decodifica os sinais recebidos e os envia para serem interpretados de acordo com o modo de voo e o estado do veículo. Em sistemas RC avançados com telemetria, o RX também pode enviar dados do veículo de volta ao TX, permitindo ao operador monitorar informações em tempo real, como níveis de bateria e status dos sensores.

3.1.8 Bateria LiPo

As baterias de polímero de lítio (LiPo) são amplamente reconhecidas por sua alta densidade energética e leveza, características que as tornam ideais para veículos de controle remoto (RC) e aplicações que exigem uma fonte de energia potente e de baixo peso. Essas baterias recarregáveis, popularmente chamadas de LiPos, utilizam tecnologia de íons de lítio em um formato que difere das baterias convencionais de estrutura rígida, adotando uma construção de invólucro flexível em polímero, o que reduz o peso, mas aumenta a suscetibilidade a danos físicos (RISINGSUNFPV, 2018). A Figura 19 ilustra as principais especificações de uma bateria LiPo, detalhando o significado de cada uma de suas indicações técnicas.

Figura 20 – Bateria LiPo.



Fonte: RISINGSUNFPV, 2018.

Internamente, as LiPos são compostas por um eletrodo positivo e um negativo, separados por uma camada isolante, com um eletrólito líquido responsável pela condução elétrica entre os polos. A estrutura sem invólucro rígido permite que essas baterias sejam produzidas em diversos tamanhos e formas, adaptando-se a diferentes necessidades de design dos dispositivos que alimentam. Além disso, essas baterias são capazes de fornecer uma alta taxa de descarga, o que as torna apropriadas para aplicações que demandam descarga rápida e eficiente, como drones e outros veículos aéreos leves, onde o desempenho e a autonomia são críticos (RISINGSUNFPV, 2018).

Cada bateria LiPo é categorizada pelo número de células em série (denotadas como “S”), que determina sua tensão nominal total, onde cada “S” corresponde a 3,7V. A capacidade, geralmente expressa em mAh, indica a quantidade de carga que a bateria pode fornecer por hora, sendo um fator crucial para a autonomia de voo. No entanto, uma maior capacidade resulta em maior peso para o drone. A classificação “C” das baterias indica a taxa máxima de descarga contínua, sendo essencial para garantir o fornecimento seguro de corrente e evitar danos como o aquecimento excessivo e o inchaço da bateria. A classificação de descarga instantânea, também conhecida como “burst”, permite picos de corrente momentâneos, especialmente úteis para acelerações rápidas, mas sua utilização frequente pode reduzir a vida útil da bateria.

3.1.9 Power Módulo

O módulo de potência é essencial para a distribuição adequada de energia para os componentes do drone. Ele é responsável por regular as diferentes tensões necessárias para cada subsistema, permitindo que cada parte do drone receba a corrente apropriada para operar com segurança e eficiência. Além disso, esse módulo integra sensores de tensão e corrente da bateria, cujas leituras são continuamente processadas pela controladora de voo (Figura 20) e transmitidas via telemetria para a central de controle.

Figura 21 – Controladora de voo PixHawk.



Fonte: PIXHAWK, 2024.

Essa configuração possibilita o monitoramento preciso dos níveis de tensão e do consumo de corrente durante o voo, permitindo um acompanhamento em tempo real do desempenho energético do drone. Essa informação é fundamental para a gestão eficiente da energia, possibilitando ajustes proativos que podem prolongar a vida útil da bateria e garantir a estabilidade e segurança da operação do drone em situações diversas de voo.

3.1.10 Controladora de voo

A PixHawk 2.4.8 é uma das controladoras de voo mais amplamente utilizadas em projetos de drones autônomos, conhecida por sua robustez, versatilidade e pela compatibilidade com os softwares de código aberto. Projetada para suportar aplicações complexas, a PixHawk é equipada com sensores internos de alta qualidade, como acelerômetro, giroscópio, magnetômetro e barômetro. Esses sensores integram a Unidade de Medida Inercial (IMU – *Inertial Measurement Unit*), responsável pela orientação e estabilidade do drone durante o voo. A Figura 21 apresenta a vista superior da controladora.

Figura 22 – Controladora de voo PixHawk.



Fonte: PIXHAWK, 2024.

Algumas das principais características da PixHawk incluem:

- *Entradas e Saídas Expansivas*: Possui diversas entradas e saídas PWM para motores, além de portas de comunicação UART, I2C, CAN, e SPI. Isso permite a integração com múltiplos sensores e módulos de comunicação, facilitando a expansão de funcionalidades do drone.

- ✓ ST Micro L3GD20H 16-bit gyroscope
- ✓ ST Micro LSM303D 14-bit accelerometer / magnetometer
- ✓ Invensense MPU 6000 3-axis accelerometer/gyroscope
- ✓ MEAS MS5611 barometer
- *Compatibilidade:* A PixHawk é compatível com os sistemas de firmware ArduPilot e QGroundControl, ambos populares em sistemas autônomos, e permite configurações específicas de voo, desde missões de patrulha até rotas de entrega.
- *Processamento de Alto Desempenho:* A controladora utiliza processadores de 32bits de alta performance, permitindo cálculos rápidos e precisos, essenciais para a estabilidade do voo e a resposta a situações de emergência ou perda de sinal. Entre os principais dados do processador, incluem:
 - ✓ 32 bits STM32F427 Cortex-M4F core with FPU
 - ✓ 168 MHz
 - ✓ 256 KB RAM
 - ✓ 2 MB Flash
 - ✓ 32 bits STM32F103 failsafe co-processor

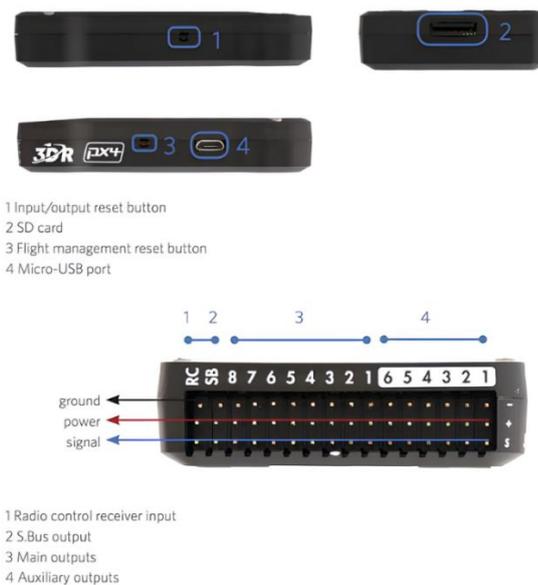
A Figura 22 e Figura 23 apresentam as principais conexões disponíveis na controladora de voo PixHawk, acompanhadas de uma descrição sobre a finalidade de cada uma delas.

Figura 23 – Portas da PixHawk.



Fonte: PIXHAWK, 2024.

Além das conexões superiores para a adição de sensores e módulos, a PixHawk também oferece portas auxiliares, permitindo a integração de motores, servomotores ou outros mecanismos eletromecânicos que possam ser controlados remotamente.

Figura 24 – Portas auxiliares.

Fonte: PIXHAWK, 2024.

A controladora também conta com porta USB para comunicação do software de configuração. Já para o armazenamento das configurações, atualizações de software e dados de voo por meio de um slot para cartão de memória dedicado a essa finalidade.

Para sua utilização em drones autônomos, a PixHawk requer calibração inicial cuidadosa, configuração da telemetria para feedback em tempo real e conexão com software de monitoramento como o QGroundControl ou Mission Planner. Esses softwares permitem a configuração de missões e o acompanhamento da rota, altitude e dados de energia do drone. A PixHawk, por sua flexibilidade e capacidade de integração, é uma escolha preferida tanto para entusiastas quanto para aplicações profissionais em drones de alta complexidade e exige um planejamento criterioso dos sistemas embarcados para otimizar seu desempenho em campo.

3.2 CUSTOS DOS COMPONENTES

Nesta seção, são apresentados os custos dos componentes utilizados no protótipo. Durante o processo de aquisição, foram considerados critérios como a qualidade técnica dos itens, priorizando componentes com documentação detalhada, além de uma análise da relação custo-benefício. A maioria dos itens foi importada da China, por meio de plataformas como Aliexpress e Banggood.

A tabela 2 detalha os componentes adquiridos, incluindo os respectivos links de compra. Vale ressaltar que os valores apresentados não incluem custos adicionais, como taxas de importação e frete, já que esses variam dependendo do período e da localização.

Tabela 2 – Lista de componentes e preços

Componentes	Valor	Link
Frame TBS Discovery	R\$ 135,00	https://abrir.link/DRikM
Motores	R\$ 140,00	https://abrir.link/mHgJZ
ESC's	R\$ 160,00	https://abrir.link/xBOew
Kit PixHawk 2.4.8 pro	R\$ 860,00	https://abrir.link/KeFlx
Bateria LiPO 4S 4500mAh	R\$ 213,00	https://abrir.link/yaOkt
Hélices DJI	R\$ 20,00	https://abrir.link/hHmjs
Servo motor	R\$ 7,00	https://abrir.link/VljAL
Receptor FRSky	R\$ 127,00	https://abrir.link/WMGyO
Rádio Controle TX12	R\$ 630,00	https://abrir.link/jfiXC
Receptor de vídeo EV800D	R\$ 327,00	https://abrir.link/sxwQI
Câmera ccd Caddx	R\$ 83,00	https://abrir.link/xzGnw
Transmissor de vídeo Buscam 1W	R\$ 148,00	https://abrir.link/irIOY
Variados	R\$ 250,00	-
TOTAL	R\$ 3.000,00	-

Fonte: Autor, 2024.

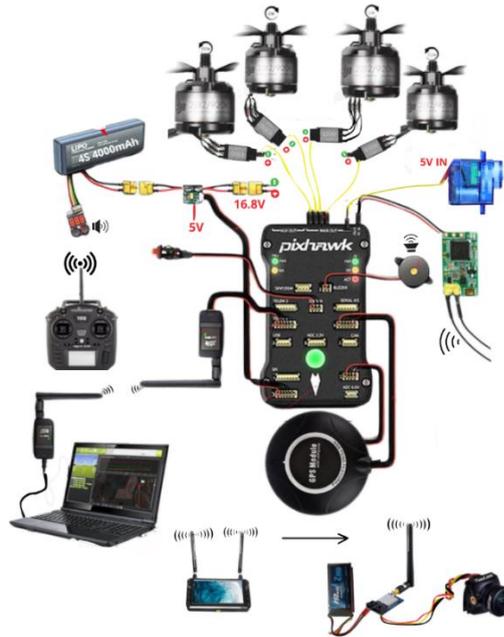
Alguns componentes listados na tabela 2, como o sistema de rádio controle e a transmissão de vídeo, não são indispensáveis para o funcionamento autônomo do drone, visto que todos os comandos podem ser realizados via computador conectado ao módulo de telemetria. Contudo, embora não essenciais, esses componentes oferecem uma camada adicional de redundância durante os testes. Em caso de falha no sistema autônomo durante o voo, o operador pode retomar o controle manualmente por meio do rádio controle e acompanhar a transmissão de vídeo em tempo real, proporcionando maior segurança operacional ao protótipo.

3.3 ESQUEMA DE MONTAGEM

Após a aquisição de todos os componentes do drone, iniciou-se o processo de montagem, o qual demandou um planejamento detalhado para assegurar a correta integração de cada peça. Para isso, foi elaborado um mapeamento minucioso dos componentes e suas interconexões, possibilitando a realização precisa de todas as ligações necessárias e minimizando riscos de falhas ou incompatibilidades. Esse mapeamento também funcionou como uma referência durante as etapas de montagem e calibração, garantindo o funcionamento ideal do protótipo e facilitando a identificação e correção de eventuais ajustes necessários. A

Figura 24 ilustra o mapeamento de ligação de todos os componentes utilizados no desenvolvimento do protótipo.

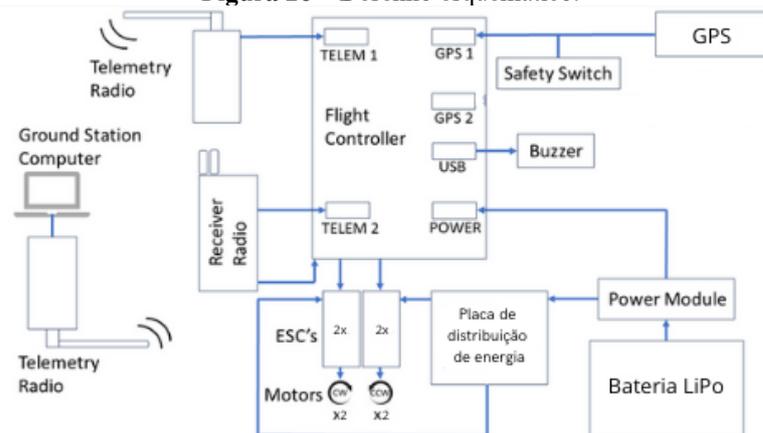
Figura 25 – Mapeamento dos componentes.



Fonte: PIXHAWK, 2024.

Os componentes mencionados anteriormente foram classificados em duas categorias: componentes de terra (Ground Station) e componentes aéreos. Os componentes de terra incluem todos os equipamentos que participam do processo, mas que permanecem na base de controle, como notebook, receptor de telemetria, receptor de imagem e rádio controle. Esses elementos formam a estrutura de controle, comando e monitoramento das operações de voo. Esses elementos foram a estrutura de controle, comando e monitoramento das operações de voo. A Figura 25 exemplifica o diagrama técnico da montagem do protótipo.

Figura 26 – Desenho esquemático.



Fonte: Autor, 2024.

Os componentes aéreos, por sua vez, são aqueles integrados diretamente à estrutura do drone, acompanhando-o durante os voos. Essa divisão é fundamental para organizar o sistema de operação, onde a base de controle em solo assume funções de gerenciamento de voo e tomada de decisões em tempo real, enquanto os componentes aéreos executam as ações conforme planejado, garantindo precisão e segurança em cada missão.

3.4 TESTE DE COMPONENTES

Após a elaboração do diagrama de conexões do protótipo do drone, foi desenvolvida uma plataforma de testes, como demonstrado na Figura 26 para verificar o funcionamento de todos os componentes antes de sua instalação definitiva na estrutura do drone. Essa abordagem permite identificar e corrigir eventuais erros de conexão de forma mais eficiente, além de facilitar etapas iniciais de calibração da controladora.

Nessa etapa, foram avaliadas as conexões do rádio controle com o módulo receptor, as trocas de dados entre o módulo transmissor e o módulo receptor de telemetria conectado ao notebook, além do funcionamento do GPS, bateria, power module e do servo motor responsável pela liberação da carga transportada pelo drone. Todos os testes e ajustes de parâmetros foram realizados e monitorados por meio do software Mission Planner.

Figura 27 – Plataforma de teste dos componentes.

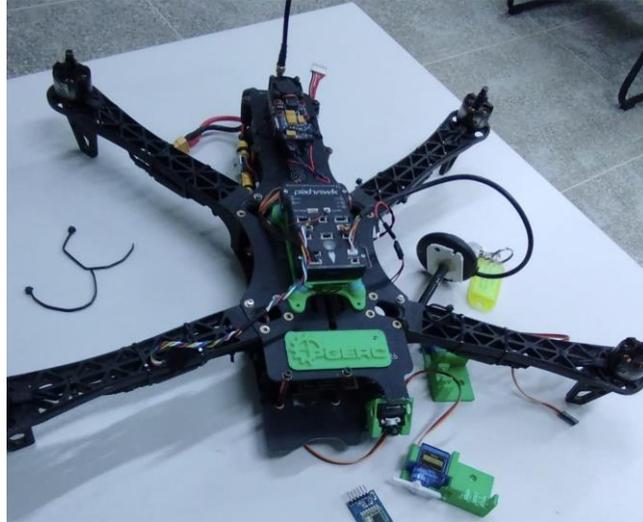


Fonte: Autor, 2024.

3.5 MONTAGEM DOS COMPONENTES DA ESTRUTURA DO DRONE

Após a validação do funcionamento correto de todos os componentes, iniciou-se o processo de montagem e integração desses elementos à estrutura do drone. A Figura 27 ilustra uma das etapas desse processo. Essa fase exigiu atenção redobrada, pois qualquer erro de conexão poderia comprometer parcial ou totalmente o funcionamento do sistema.

Figura 28 – Montagem dos componentes na estrutura.



Fonte: Autor, 2024.

3.6 TREM DE POUSO E DISPOSITIVO DE LIBERAÇÃO DO PRODUTO TRANSPORTADO

Para que o drone desenvolvido neste projeto pudesse transportar pequenos objetos na sua parte inferior, foi projetado um trem de pouso que aumentasse sua elevação, como demonstrado na Figura 28, criando um espaço adequado para o acoplamento das mercadorias. Esse trem de pouso foi planejado em um modelo 3D com critérios específicos, como resistência, leveza e facilidade de acoplamento ao corpo do drone, características essenciais para não comprometer a estabilidade e a performance durante o voo.

Figura 29 – Desenho do Trem de pouso.



Fonte: Autor, 2024.

Após o desenvolvimento do projeto e a validação dos critérios de design, as peças foram fabricadas utilizando uma impressora 3D, o que permitiu precisão e personalização no ajuste ao drone. Essa abordagem possibilitou a criação de um trem de pouso funcional e adaptado às demandas logísticas do modelo, favorecendo o transporte seguro dos objetos em cada missão. A Figura 29 destaca, em verde, as peças impressas em 3D que foram projetadas especificamente para compor o trem de pouso, evidenciando a eficiência dessa tecnologia no processo de prototipagem e adaptação.

Figura 30 – Vista inferior do drone.



Fonte: Autor, 2024.

3.6.1. Mecanismo de gatilho para liberação do produto

Além das peças utilizadas no trem de pouso, outros componentes foram fabricados com impressão 3D, como a base antivibração para a controladora de voo e o sistema de fixação e liberação dos produtos transportados pelo drone. Este último consiste em um mecanismo acionado por um servo motor que movimenta uma pequena alavanca de metal, permitindo a liberação segura do objeto transportado. Esses componentes personalizados foram essenciais para adaptar o drone às demandas operacionais de entrega, garantindo a estabilidade da controladora e a praticidade do mecanismo de carga. A Figura 30 ilustra o sistema de fixação e liberação, destacando seu design e funcionalidade.

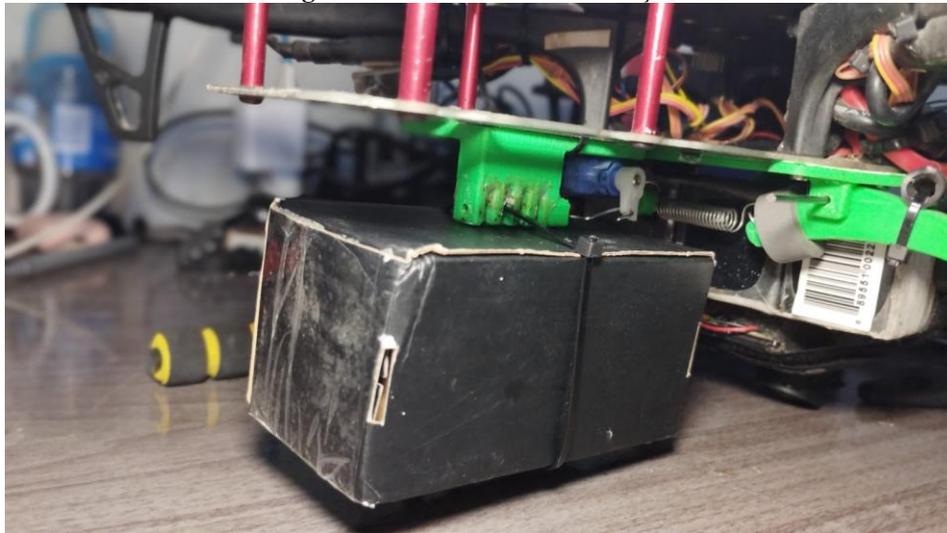
Figura 31 – Desenho do mecanismo em 3D.



Fonte: Autor, 2024.

O mecanismo possibilita a fixação de até quatro objetos posicionados em fila, onde são liberados de acordo com o movimento do servo motor. Contudo, como ilustrado na Figura 31, para a aplicação nesse projeto, foi utilizado somente uma única trava.

Figura 32 – Mecanismo de liberação.

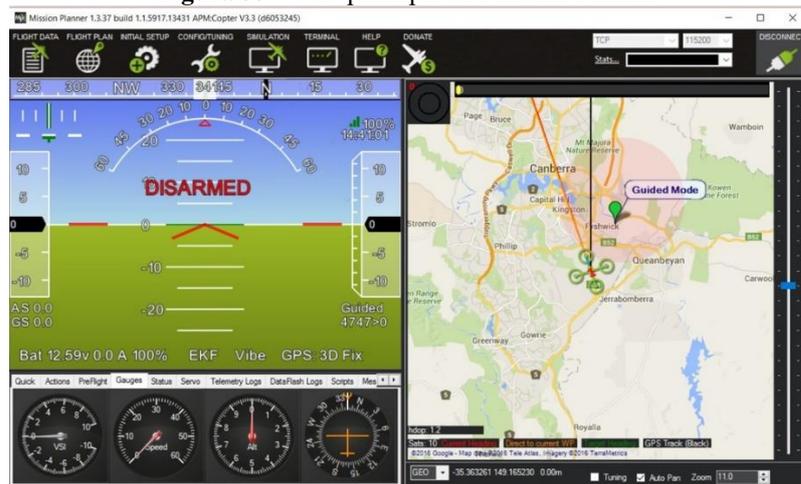


Fonte: Autor, 2024.

3.7 CONFIGURAÇÕES DO DRONE NO SOFTWARE MISSION PLANNER

O protótipo desenvolvido nesta pesquisa utilizou o software Mission Planner (Planejador de Missão) como ferramenta central para a configuração, calibração e gerenciamento do drone projetado. A Figura 32 apresenta a interface inicial do software. No painel à esquerda, são exibidas informações gerais relacionadas à aeronave em operação, enquanto no painel à direita é mostrado o mapa, que permite visualizar a localização exata do drone quando equipado com um módulo GPS.

Figura 33 – Tela principal do Mission Planner.



Fonte: PIXHAWK, 2018.

Esse software pode ser empregado como uma estação de controle terrestre projetada para gerenciar planadores, multirotores e rovers, sendo compatível exclusivamente com o sistema operacional Windows. O mesmo pode ser utilizado tanto como uma ferramenta de configuração quanto como um suporte de controle dinâmico para veículos autônomos. Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram seguidas as seguintes etapas de configuração.

1. Upload do firmware para a placa de piloto automático que controla o veículo.
2. Calibrações, configurações e ajustes do veículo para um desempenho ideal.
3. Planejamento de missões autônomas no piloto automático por meio de coordenadas geográficas pelo mapa da Google.
4. Download e análise dos registros de missão criados pelo piloto automático ao fim de cada voo.

Além das configurações já mencionadas anteriormente, é possível, por meio da utilização do hardware de telemetria apropriado, utilizar os seguintes recursos:

1. Monitorar o status do veículo enquanto estiver em operação.
2. Gravar registros adicionais de telemetria contendo informações sobre os registros de piloto automático a bordo.
3. Visualizar e analisar os registros de telemetria em tempo real.
4. Operar o veículo em FPV (vista em primeira pessoa).

As etapas de configuração de um drone por meio do software Mission Planner são complexas e repletas de detalhes, o que torna inviável a apresentação completa de todos os procedimentos neste trabalho. No entanto, o software dispõe de um guia abrangente disponível no site oficial da <ardupilot.org>, onde são detalhados todos os processos necessários para diferentes tipos de aplicações e configurações.

3.8 CALIBRAÇÕES BÁSICAS

Uma das etapas iniciais no processo de configuração do drone é a calibração dos sensores internos da controladora, como o acelerômetro, o giroscópio e a bússola. Além disso, ajustes no rádio controle e na tensão de entrada da bateria a ser utilizada também são procedimentos fundamentais para garantir o desempenho adequado do sistema. Nesta seção, serão definidos critérios importantes para o bom funcionamento do drone, com base nos procedimentos mencionados, destacando a relevância de cada etapa na otimização da estabilidade, precisão e segurança durante as operações.

3.8.1. Calibração do acelerômetro

O acelerômetro é responsável por medir as acelerações lineares nas três dimensões (eixo X, Y e Z) e, em conjunto com outros sensores, determina a orientação do drone no espaço. Um acelerômetro calibrado corretamente permite que o controlador de voo interprete com precisão a inclinação e a posição do drone, essencial para manter o equilíbrio e evitar tombamentos. O acelerômetro trabalha em conjunto com o giroscópio e outros sensores, como o magnetômetro e o GPS. Uma calibração incorreta pode gerar inconsistências nos dados, afetando algoritmos de controle e comprometendo o desempenho geral.

3.8.2. Calibração do giroscópio

A calibração do giroscópio é igualmente crucial para o bom funcionamento da aeronave, pois ele mede a taxa de rotação em torno dos eixos (*pitch*, *roll* e *yaw*). Esses dados são fundamentais para determinar e ajustar a orientação do drone em tempo real (PIXHAWK, 2018). A importância da calibração do giroscópio pode ser descrita nos seguintes aspectos:

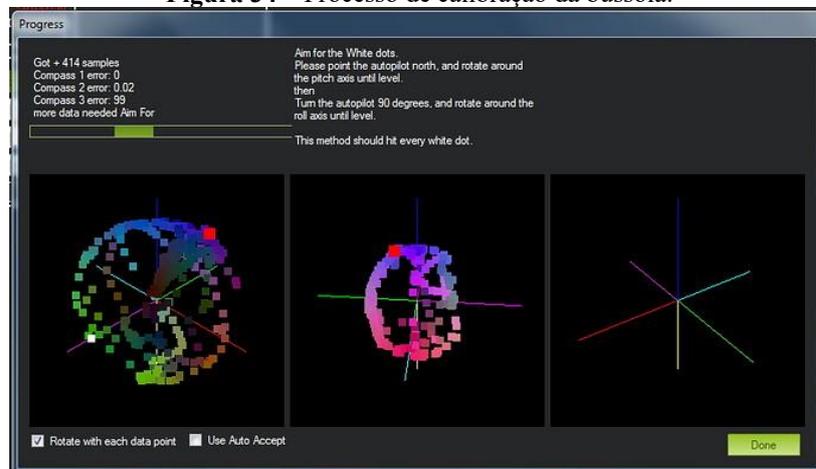
- Estabilidade Angular: Um giroscópio calibrado garante que o controlador de voo interprete corretamente as mudanças na orientação do drone, permitindo ajustes precisos e estabilização contínua durante o voo.
- Eliminação de *Drift* (Deriva): Pequenos erros ou desvios acumulados ao longo do tempo, conhecidos como *drift*, podem afetar significativamente a precisão do controle. A calibração minimiza esses desvios, garantindo que os dados sejam consistentes.
- Precisão em Movimentos Rotacionais: A calibração assegura que as leituras do giroscópio sejam alinhadas com os eixos reais do drone, permitindo um controle exato das rotações e manobras, especialmente em voos autônomos.

3.8.3. Calibração da bússola

A bússola é um dos sensores essenciais para o funcionamento de um drone, especialmente em operações autônomas. Sua calibração adequada é crucial para garantir a navegação precisa e a execução eficiente de missões pré-planejadas. Seu processo de calibração serve para compensar interferências magnéticas no ambiente ou na estrutura do drone, garantindo leituras precisas do campo magnético da Terra.

Na aba de configurações de sensores do ArduPilot, esse processo é feito por meio do rotacionado do drone em diferentes eixos, permitindo que o software registre os valores magnéticos em várias orientações. Isso corrige erros provocados por componentes eletrônicos próximos, como motores ou baterias. A Figura 33 ilustra o processo de calibração da bússola do drone no ArduPilot.

Figura 34 – Processo de calibração da bússola.



Fonte: PIXHAWK, 2018.

Ao término do processo de calibração, o drone emite um sinal sonoro indicando a conclusão bem-sucedida. Em seguida, é reiniciado automaticamente para assegurar que os dados de calibração sejam corretamente armazenados na controladora de voo. É fundamental realizar essa etapa de forma precisa, pois qualquer falha pode comprometer a estabilidade do drone e causar perda de orientação durante o voo, afetando diretamente sua performance e segurança operacional.

3.9 AUTORIZAÇÃO DE VOO

Para garantir a segurança durante a realização dos testes, o voo do drone será conduzido em uma área restrita, sem a presença de pessoas não envolvidas na operação e fora de áreas públicas ou zonas críticas. Nessas condições, as exigências para solicitação de autorização junto ao Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS) tornam-se mais

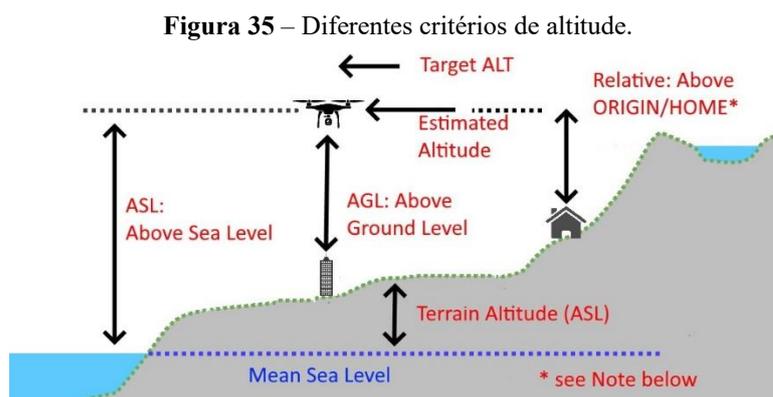
flexíveis. Contudo, é fundamental considerar os seguintes aspectos:

1. O drone possui peso inferior a 25 kg;
2. O voo será realizado em linha de visada visual (*Visual Line of Sight – VLOS*), garantindo que o operador mantenha o drone em seu campo de visão durante toda a operação;
3. A operação será conduzida a uma altitude máxima de 120 metros;
4. Não haverá sobrevoos de pessoas não envolvidas na operação;
5. A área de operação não está próxima a zonas restritas, como aeroportos, helipontos ou instalações sensíveis.

3.10 PLANEJANDO DA MISSÃO COM *WAYPOINTS*

Após concluir os processos de configuração, calibração do drone e testes, a etapa final para a realização de voos autônomos foi o planejamento de rota por meio de *Waypoints* (WPs), que consistem em coordenadas geográficas pré-definidas onde o drone seguirá durante o voo. Essa é uma etapa crítica para o desenvolvimento dessa pesquisa e exige atenção minuciosa, pois qualquer erro, como o preenchimento incorreto de dados numéricos, pode comprometer significativamente o desempenho do drone e a execução segura da missão.

Um dos pontos críticos no processo de planejamento de uma missão de voo, é a determinação correta da altitude do drone. Isso porque a documentação do ArduPilot utiliza o termo “altitude” de forma recorrente, abrangendo diversos contextos e significados. Contudo, nem todas as referências a altitude possuem o mesmo significado, o que torna fundamental compreender, em cada situação, o sentido atribuído ao termo. Essa compreensão é essencial para interpretar corretamente a operação do sistema e prever seu comportamento em diferentes cenários durante o desenvolvimento do plano de voo. A Figura 34 ilustra de forma simples o entendimento dessas diferenças entre altitudes.



Fonte: PIXHAWK, 2018.

Na imagem acima, são mostrados vários tipos de “altitude” que de forma resumida podem ser descritas das seguintes maneiras:

- ASL: Altitude acima do Nível do Mar - a altitude do veículo expressa como distância acima do nível médio do mar.
- AGL: Altitude acima do Nível do Solo: a altitude do veículo acima do que está diretamente abaixo dele.
- Relativo (*Relative*): Altitude relativa acima da altitude de HOME/ORIGINEM. Isto é o que é exibido na estação terrestre e OSD como a altitude do veículo.
- Altitude do terreno (*Terrain ALT*): Refere-se à altura de uma determinada posição do terreno em relação ao nível médio do mar (ASL). Em alguns casos, essa medida pode incluir, mas nem sempre contempla, adições naturais ou construções feitas pelo ser humano que alterem a altitude original do terreno.
- ALT Estimada (*Estimated ALT*): Estimativa do piloto automático do veículo. Altitude relativa acima de ORIGIN que é utilizada internamente pelo Controlador de Altitude dos veículos para manter ou obter a ALT Alvo em modos controlados de altitude;
- Altitude Alvo (*Target ALT*): Refere-se à altitude desejada em modos de controle de altitude. Essa altitude pode ser definida por meio da entrada do piloto (por exemplo, no modo ALTHOLD ou pelo controlador de navegação (como no modo AUTO).

Para os testes de altimetria, precisão do percurso via GPS e do local de entrega determinado, foi elaborado um plano de voo com aproximado de 2 km de distância, a uma altitude de 20 metros. A missão do drone consistiu no transporte de uma carga adicional de 600 g. Na metade do trajeto, foi programado para o drone reduzir a altitude em 3 metros, onde o pacote seria descarregado. Em seguida, o drone deveria ascender novamente até 20 metros, percorrer mais 1 km e retornar à base de decolagem. Nessa etapa, o drone repetiu esse mesmo plano de voo cinco vezes.

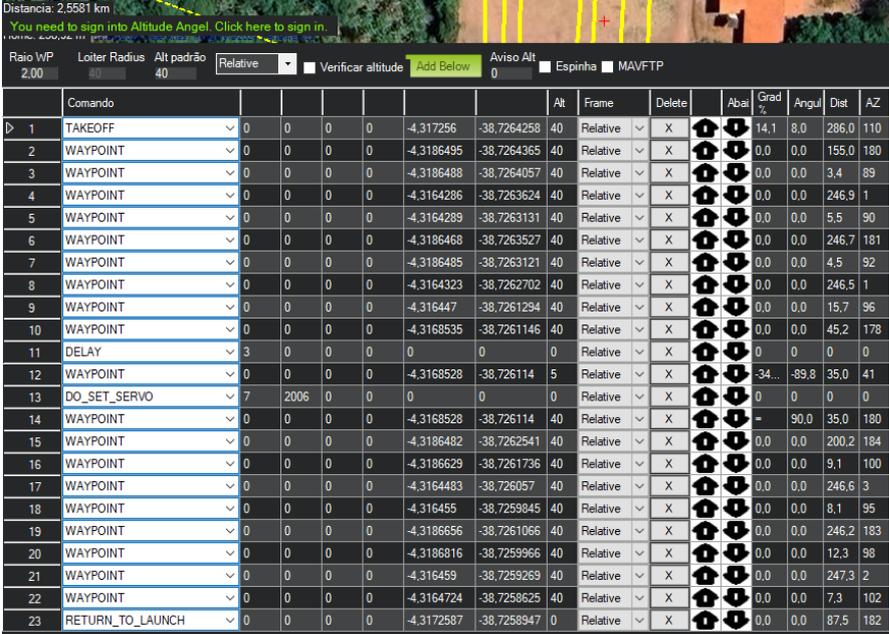
Tabela 3 – Cronograma do plano de voo

Parâmetro	Valor
Distância total	2 km
Quilômetro da entrega	km 1
Tempo estimado	4 minutos
Altura máxima	20 metros
Altura de descarregamento	3 metros
Tipo de descarregamento	<i>Drop</i>
Velocidade média	27 km/h
Peso adicional	600g
Custo energético	R\$ 0,025

Fonte: Autor, 2024.

Além dos *waypoints* utilizados para demarcar os pontos de navegação do drone, o planejamento da missão incluiu a programação de eventos específicos para possibilitar a execução do plano. Figura 35 ilustra a lista completa do planejamento da missão. O primeiro ponto (*TAKEOFF*) corresponde ao local de decolagem do drone, que é registrado pelo sistema como ponto de retorno à base.

Figura 36 – Listas de waypoints e eventos.



	Comando						Alt	Frame	Delete		Abai	Grad	Angul	Dist	AZ
1	TAKEOFF	0	0	0	0	-4.317256	-38.7264258	40	Relative	X		14.1	8.0	286.0	110
2	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3186495	-38.7264365	40	Relative	X		0.0	0.0	155.0	180
3	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3186488	-38.7264057	40	Relative	X		0.0	0.0	3.4	89
4	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3164286	-38.7263524	40	Relative	X		0.0	0.0	246.9	1
5	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3164289	-38.7263131	40	Relative	X		0.0	0.0	5.5	90
6	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3186468	-38.7263527	40	Relative	X		0.0	0.0	246.7	181
7	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3186485	-38.7263121	40	Relative	X		0.0	0.0	4.5	92
8	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3164323	-38.7262702	40	Relative	X		0.0	0.0	246.5	1
9	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.316447	-38.7261294	40	Relative	X		0.0	0.0	15.7	96
10	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3169535	-38.7261146	40	Relative	X		0.0	0.0	45.2	178
11	DELAY	3	0	0	0	0	0	0	Relative	X		0	0	0	0
12	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3169528	-38.726114	5	Relative	X		-34...	-89.8	35.0	41
13	DO_SET_SERVO	7	2006	0	0	0	0	0	Relative	X		0	0	0	0
14	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3169528	-38.726114	40	Relative	X		=	90.0	35.0	180
15	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3186482	-38.7262541	40	Relative	X		0.0	0.0	200.2	184
16	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3186629	-38.7261736	40	Relative	X		0.0	0.0	9.1	100
17	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3164483	-38.7260507	40	Relative	X		0.0	0.0	246.6	3
18	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.316455	-38.7259845	40	Relative	X		0.0	0.0	8.1	95
19	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3186656	-38.7261066	40	Relative	X		0.0	0.0	246.2	183
20	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3186816	-38.7259966	40	Relative	X		0.0	0.0	12.3	98
21	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.316459	-38.7259269	40	Relative	X		0.0	0.0	247.3	2
22	WAYPOINT	0	0	0	0	-4.3164724	-38.7258625	40	Relative	X		0.0	0.0	7.3	102
23	RETURN_TO_LAUNCH	0	0	0	0	-4.3172587	-38.7258947	0	Relative	X		0.0	0.0	87.5	182

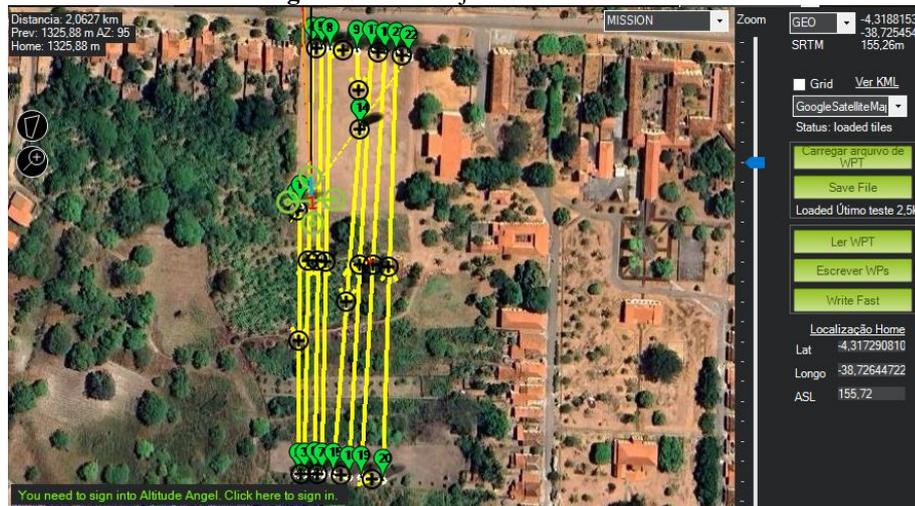
Fonte: Autor, 2024.

Os pontos 11, 12 e 13 estão associados à etapa de lançamento da encomenda, onde no comando (*DELAY*), será efetuado um intervalo de 3 segundos para o drone iniciar o processo

de descida até uma altura de 5 metros. Em seguida, a função (*DO_SET_SERVO*) envia um sinal PWM para a porta auxiliar número 7 da controladora de voo, onde está conectado o servo motor responsável pelo sistema de liberação da carga. Por fim, no último comando (*RETURN_TO_LOUNCH*) o drone retorna ao ponto inicial para pouso.

Para viabilizar um voo de maior duração e distância, sem que o drone saísse do campo de visão do operador, os *waypoints* foram posicionados em um trajeto em ziguezague por toda a área delimitada para o experimento. Em aplicações convencionais, no entanto, os drones geralmente seguem uma única rota até o destino final e, em seguida, retornam pelo mesmo percurso. As linhas amarelas da Figura 36 representa a rota realizada pelo drone, enquanto os pontos verdes são os *waypoints*.

Figura 37 – Planejamento da missão.



Fonte: Autor, 2024.

3.11 EXECUÇÃO DA MISSÃO

Após todo o processo do planejamento de voo e os comandos necessários para o funcionamento ideal da missão, o drone foi levado até o local demarcado para que pudesse ser feito os experimentos. Para essa etapa, foi desenvolvido uma lista de check-in com as principais etapas a serem realizadas em campo no pré-voo. São elas:

1. Verificação do ambiente: presença de pessoas ou animais próximos, dados meteorológicos.
2. Averiguação geral da estrutura do drone.
3. Posicionamento das Antenas: GPS, Telemetria, Transmissão de vídeo.
4. Fixação: hélices, bateria, caixa de transporte.
5. Verificação dos níveis de bateria: drone, rádio controle, receptor de vídeo, notebook.

6. Revisão do plano de voo: duração estimada, distância, Altura, geolocalização.

Para demarcar o ponto de decolagem do drone, foi utilizado um tapete de borracha como drone point. Esse recurso, permitiu a marcação do local exato de decolagem bem como a análise da precisão de pouso na etapa final do processo. Além disso, Como ilustrado na Figura 37, o tapete contribui para a proteção do equipamento, reduzindo o risco de danos causados pela poeira levantada pelas hélices, que poderia entrar nos componentes internos.

Figura 38 – Posicionamento do drone no pré-voo.



Fonte: Autor, 2024.

A execução dos planos de voo, bem como toda a análise da missão, foi realizada utilizando a Ground Station (Estação de Terra), conforme mostra a Figura 38. Este equipamento desempenha um papel essencial ao permitir o monitoramento em tempo real da posição do drone, utilizando dados do GPS e transmissões de áudio e vídeo acoplados.

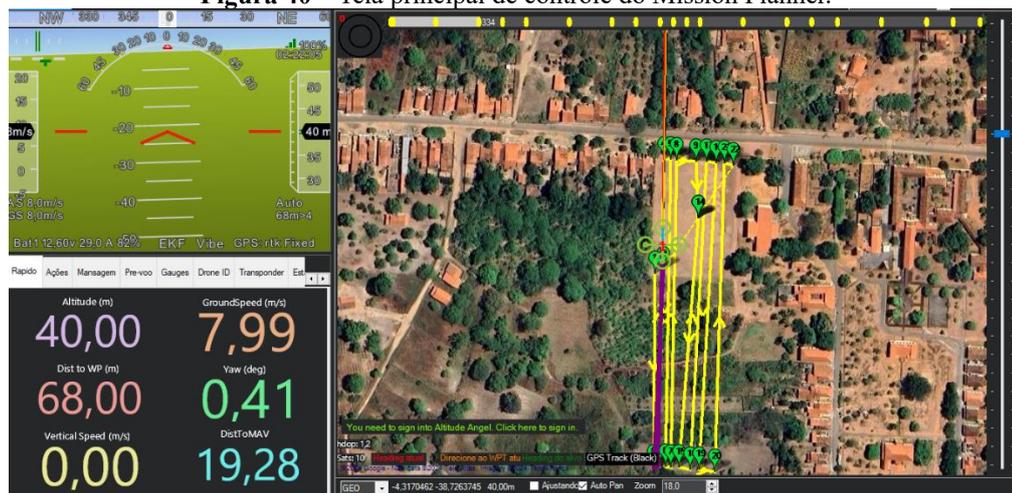
Figura 39 – Ground Station.



Fonte: Autor, 2024.

Adicionalmente, o rádio controle permanece disponível para o operador da missão, garantindo a possibilidade de retomar o controle manual da aeronave em situações que exijam intervenção direta, aumentando a segurança e a confiabilidade das operações. Outros dados essenciais também são recebidos via módulo serial, como nível de bateria, altitude, temperatura, velocidade e distância em relação à base. Além disso, informações adicionais, como a qualidade do sinal GPS, o status do módulo de telemetria e o rádio controle, também são exibidas na tela principal do software Mission Planner, acessada por meio de um notebook. A Figura 39 exemplifica a distribuição das informações contidas na tela do Mission Planner.

Figura 40 – Tela principal de controle do Mission Planner.



Fonte: Autor, 2024.

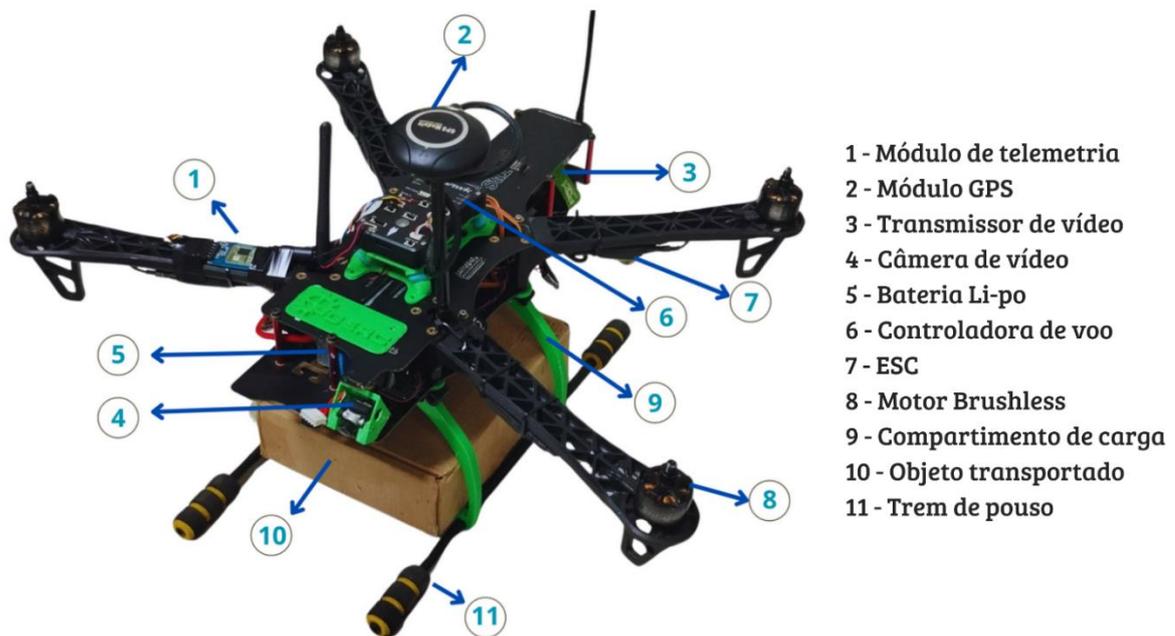
4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos nos testes de campo realizados com o protótipo do drone de entregas. Além dos resultados gerais do processo de construção, será realizada uma análise detalhada dos principais parâmetros de funcionamento do drone, destacando seu desempenho e eficiência em condições práticas.

4.1 TBS DELIVERY

Ao término de todo o processo de planejamento e construção, o protótipo desenvolvido demonstrou um desempenho satisfatório, atendendo aos objetivos propostos no início desta pesquisa. O modelo foi denominado TBS Delivery, em referência ao modelo da estrutura, TBS Discovery, e à funcionalidade implementada, destacando seu propósito como um sistema eficiente para entregas automatizadas. A Figura 40 ilustra o modelo finalizado do drone, acompanhado da descrição dos principais componentes empregados em sua construção. Esse resultado reafirma a viabilidade técnica do projeto e abre possibilidades para aprimoramentos futuros, especialmente na integração de novas tecnologias e otimizações para aplicações práticas.

Figura 41 – Drone montado.



Fonte: Autor, 2024.

Como mencionado nos capítulos anteriores, o modelo proposto nesta pesquisa é um protótipo de um drone de entregas em pequena escala. Assim, os resultados obtidos devem ser analisados considerando a proporcionalidade de suas características. Em comparação, drones

de escala comercial amplamente utilizados por empresas do setor, como o DJI FlyCart 30, podem pesar mais de 65 kg e transportar cargas superiores a 30 kg. A tabela 4 a seguir apresenta a ficha técnica com as principais especificações do protótipo desenvolvido.

Tabela 4 – Ficha técnica TBS Delivery

Especificação	Resultado
Peso bruto	2,4 kg
Autonomia de voo	15 minutos
Velocidade máxima	40 km/h
Carga útil	600 g
Autonomia	10 km
Plataforma de lançamento	Estação terrestre automatizada
Método de entrega	<i>Drop</i> ou pouso no solo
Custo por carga	R\$ 0,0754

Fonte: Autor, 2024.

Certos parâmetros, como autonomia de voo e alcance, podem variar em função da carga útil transportada, sendo que o aumento do peso resulta em menor autonomia do drone e, conseqüentemente, em uma redução do alcance. Nos testes de validação desta pesquisa, foram transportados pacotes com pesos variando entre 500 g e 700 g, acondicionados em uma caixa de papelão com dimensões de 40 cm x 30 cm x 10 cm.

Para a obtenção dos resultados deste trabalho, foram realizados diversos testes com o objetivo de avaliar o desempenho funcional do drone. Os testes abrangeram aspectos como altimetria, precisão de rota baseada em GPS e eficiência dos sistemas de fixação e soltura da carga transportada. Para isso, foi elaborado um plano de voo no qual o drone percorreu uma distância total de 2 km, mantendo uma velocidade média de 28 km/h.

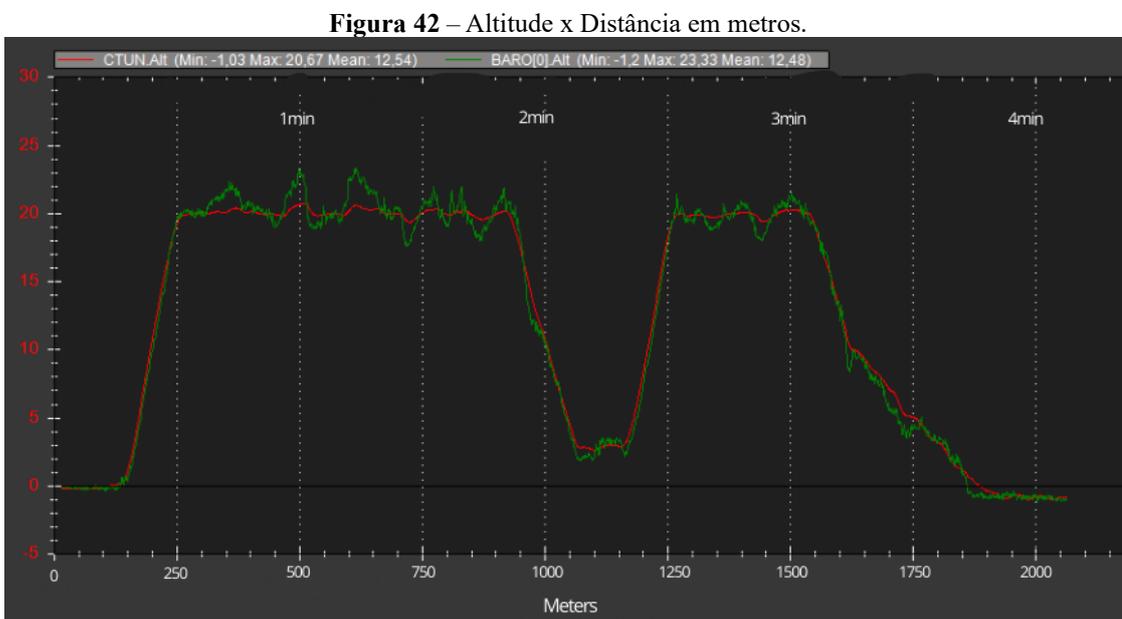
Essas configurações foram projetadas para simular condições reais de operação, permitindo uma análise abrangente do desempenho do sistema. Devido ao fato de o percurso realizado não ser linear, conforme ilustrado na Figura 36 o drone levou aproximadamente 4,3 minutos para concluir a missão. Além disso, outros fatores que podem influenciar no tempo de execução incluem a interferência do vento e o peso da carga transportada pelo drone, ambos impactando diretamente o desempenho e a eficiência da operação.

4.2 REGISTRO DE VOO

Ao final de cada entrega, a controladora armazena todos os registros de voo, conhecidos como *Flight Logs*, coletados durante a missão. Esses dados são gerados por meio de sensores acoplados ao drone, como GPS, *power* módulo, giroscópio, acelerômetro e barômetro. Os registros são posteriormente transferidos para um computador, onde são processados e analisados. A análise gera gráficos de linha que representam parâmetros essenciais para a avaliação do desempenho do drone, como estabilidade, precisão de pouso e decolagem, níveis de bateria, altitude e posicionamento.

4.2.1 Dados de altimetria

Os dados de altimetria são fundamentais para avaliar a estabilidade do drone na altitude programada durante o planejamento da missão. Variações na altitude podem comprometer a execução da missão e aumentar os riscos de colisão com obstáculos como árvores, montanhas ou estruturas semelhantes. O sensor responsável por medir a altitude é o barômetro, integrado à controladora de voo. Para o monitoramento da altitude, o software de configuração *Mission Planner* disponibiliza previamente gráficos que indicam os níveis de altimetria previstos para o voo. Na Figura 41, a linha vermelha representa a rota ideal programada, enquanto a linha verde mostra a rota efetivamente realizada pelo drone, permitindo uma análise comparativa entre o planejado e o executado.



Fonte: Autor, 2024.

Nos testes realizados neste trabalho, a altitude foi parametrizada com base no nível do solo no ponto de decolagem do drone. O local escolhido para os testes apresentava, predominantemente, uma topografia plana, com poucos obstáculos e nenhum deles excedendo 10 metros de altura. Com base nessas características, os voos experimentais foram realizados a 20 metros de altitude em relação ao nível do solo.

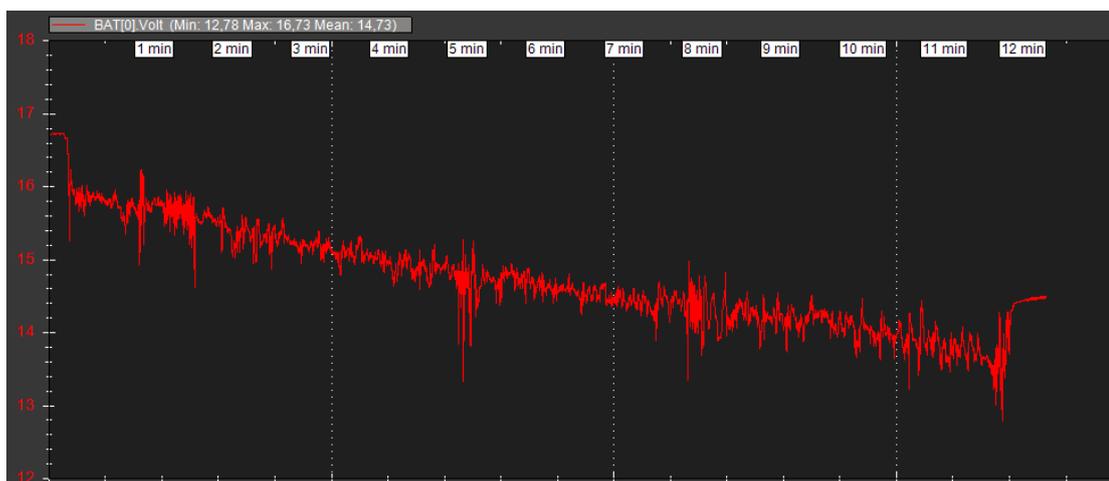
Ao analisar o gráfico apresentado, observa-se que o drone demonstrou uma precisão satisfatória em relação à altimetria prevista. Embora tenham ocorrido pequenas oscilações durante a missão, ocasionadas por fatores como curvas realizadas durante o trajeto e interferências do vento, o drone manteve-se consistentemente dentro da faixa de altitude ideal, assegurando o cumprimento dos parâmetros estabelecidos no planejamento.

4.2.2 Tensão da bateria durante o voo

Os dados relacionados à bateria representam um aspecto fundamental no desenvolvimento de drones, especialmente os modelos autônomos. Compreender a autonomia do equipamento é indispensável para um planejamento de voo eficiente, uma vez que a duração da bateria constitui o principal fator limitante, influenciando diretamente não apenas o tempo de voo, mas também a capacidade de carga útil que o drone é capaz de transportar com segurança.

A Figura 42 a seguir apresenta um gráfico que ilustra o comportamento do descarregamento energético da bateria ao longo de uma missão de voo. Durante este teste, o drone operou transportando uma carga de 700 g, permitindo uma análise detalhada do impacto do peso adicional no consumo energético e no desempenho geral do sistema.

Figura 43 – Descarga da bateria.



Fonte: Autor, 2024.

A bateria utilizada no drone foi uma LiPo 4S, com tensão nominal de 14,8 V e capacidade de 5000 mAh (5 A). Quando completamente carregada, a tensão máxima da bateria de 4 células atinge 16,8 V, correspondendo a 4,2 V por célula. É importante destacar que descarregar a bateria abaixo desse limite pode comprometer sua integridade e funcionalidade. Oscilações observadas no consumo energético, como evidenciado nos gráficos, são influenciadas por fatores como ventos fortes e manobras bruscas realizadas pelo drone. Essas condições exigem ajustes constantes na propulsão para manter a estabilidade e o desempenho, o que pode aumentar o consumo de energia, conforme também observado no gráfico de altimetria.

O sistema de controle do drone conta com mecanismos de alerta para evitar situações de descarga profunda. Quando o nível da bateria atinge 25% de sua capacidade, o software emite um aviso para que o drone retorne imediatamente à base. Em cenários extremos, onde a bateria chega a níveis críticos, em torno de 10%, o drone ativa automaticamente um procedimento de pouso seguro no local em que se encontra, priorizando a integridade do equipamento e a segurança da operação

4.2.3 Corrente da bateria durante o voo

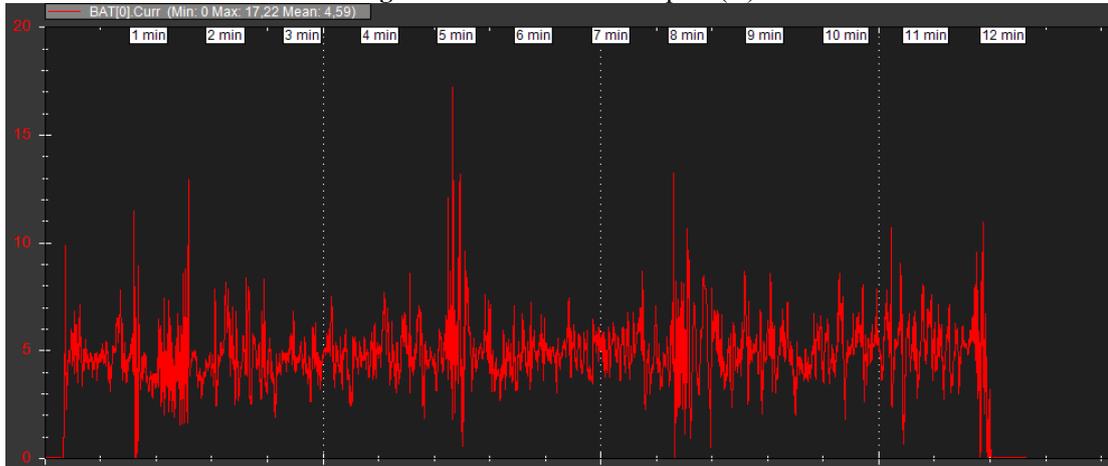
Outro parâmetro relevante analisado, foi o consumo de corrente pelo drone. O gráfico apresentado a seguir foi gerado simultaneamente aos dados de tensão mencionados anteriormente, permitindo uma análise integrada dos parâmetros elétricos durante o voo. A observação desses dados é fundamental para identificar situações ou procedimentos que resultem em níveis elevados de consumo de corrente, auxiliando na compreensão do desempenho energético do drone.

Condições como o peso transportado e as rajadas de vento, já discutidas previamente, podem contribuir significativamente para o aumento no consumo de corrente. Isso ocorre porque essas circunstâncias exigem uma maior potência dos motores, que precisam compensar as forças externas para garantir a estabilidade e o controle do drone durante a missão. Essa análise é essencial para otimizar o planejamento de voo, prevenir sobrecargas nos sistemas elétricos e maximizar a eficiência energética.

Na Figura 43, observa-se que grande parte das oscilações registradas no gráfico são decorrentes das mudanças constantes de direção realizadas pelo drone ao longo da missão. Durante os trechos em que o drone voa contra o vento, os motores requerem mais energia para superar a resistência aerodinâmica, resultando em uma corrente média de aproximadamente 8

amperes. Em contraste, nos trechos a favor do vento, a corrente consumida reduz significativamente, estabilizando-se em torno de 5 amperes.

Figura 44 – Corrente em ampere (A).



Fonte: Autor, 2024.

4.3 PRECISÃO DA ENTREGA

O principal componente responsável pela precisão geográfica do drone é o sistema de GPS. Para realização dos testes de precisão, foi utilizado um tabuleiro de 30cm x 30cm como ponto de partida para o drone. Após os testes realizados, concluiu-se que a detecção de no mínimo 11 satélites é necessária para que o drone execute o plano de voo preciso.

No pior cenário registrado, com a detecção de apenas 8 satélites, o drone apresentou uma precisão limitada, pousando a 210 cm do alvo planejado. Em contrapartida, no melhor cenário, com a detecção de 11 satélites, o desempenho foi significativamente aprimorado, alcançando uma precisão de apenas 47 cm em relação ao centro do tabuleiro. Com essa quantidade de satélites, o sistema demonstrou operar com uma margem de erro reduzida, garantindo a confiabilidade das rotas planejadas e a estabilidade das operações, incluindo o processo de pouso durante a etapa de retorno à base (RTL).

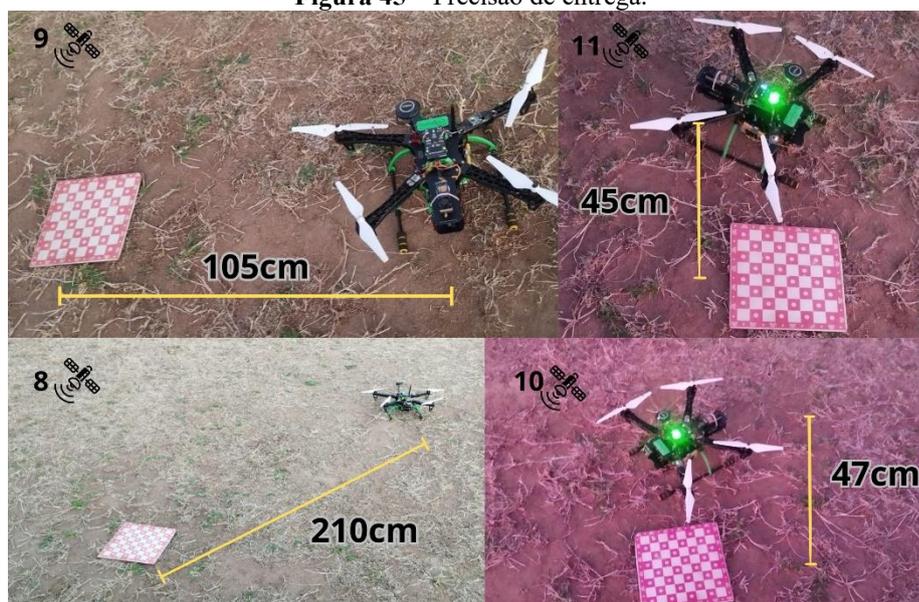
Tabela 5 – Relação entre a quantidade de satélites detectados e a precisão de entrega do drone

Quantidade de Satélites	Distância do Centro do Alvo (cm)
8	210
9	105
10	47
11	45

Fonte: Autor, 2024.

Fatores como a qualidade do módulo GPS e a localização geográfica em que o sistema é utilizado desempenham um papel crucial na capacidade de detecção de satélites. Equipamentos de alta qualidade e áreas com menor interferência ambiental tendem a melhorar o desempenho, aumentando a quantidade de satélites detectados e, conseqüentemente, a precisão geral do sistema. A Figura 44 mostra diferentes posições de acordo com a quantidade de satélites detectadas pelo GPS.

Figura 45 – Precisão de entrega.



Fonte: Autor, 2024.

4.4 CUSTOS OPERACIONAIS

Para a análise dos custos operacionais do drone de entrega TBS Delivery, foram registrados os dados de consumo de energia durante cada voo. Esses valores variam de acordo com as características do equipamento, as condições de uso e a infraestrutura local. Neste trabalho, o cálculo foi baseado no consumo energético necessário para carregar uma bateria LiPo de 14,8 v e 5000 mAh, totalizando 74Wh. O carregador utilizado foi o modelo Imax B6, alimentado por uma fonte de 19 volts e 3 amperes.

4.4.1 Energia consumida pelo carregador

Nenhum carregador é 100% eficiente; ele consome mais energia da fonte do que a energia efetivamente armazenada na bateria. Para o Imax B6, a eficiência típica varia entre 85% e 90%. Neste trabalho, utilizaremos uma eficiência média de 87% para os cálculos. A energia consumida pelo carregador da fonte pode ser calculada pela seguinte fórmula 4.1:

$$\text{Energia consumo} = \frac{\text{Energia bateria}}{\text{Eficiência bateria}} \quad (4.1)$$

Substituindo os valores conhecidos:

$$\text{Energia consumo} = \frac{74 \text{ Wh}}{0,87} \approx 85,06 \text{ Wh}$$

Portanto, o carregador consumirá aproximadamente **85,06 Wh** da fonte para carregar completamente a bateria. Este cálculo considera perdas de energia inerentes ao processo de conversão de energia no carregador, que impactam diretamente nos custos de operação e planejamento energético.

No período de realização deste estudo, o custo de energia na área de cobertura da Enel Ceará era de R\$ 7,877 a cada 100 quilowatts-hora (kWh) consumidos para o tipo de consumidor B1 (Residencial Convencional). Outros fatores podem variar os valores tarifários da composição dos custos da conta de luz, que incluem tributos, encargos setoriais, e despesas com transmissão e distribuição (ENEL, 2024).

Com base nesses parâmetros, o custo de carregamento da bateria foi calculado utilizando a fórmula para consumo energético e tributos adicionais como Programa de Integração Social (PIS), Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS) e o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS). Os valores de cada tributo estão presentes na tabela a seguir.

Tabela 6 – Tabela tarifária do Ceará 2024

Item	Valor
PIS	20%
COFINS	7,60%
ICMS	1,65%
Tarifa de Energia (TE)	R\$ 0,0787
Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD)	R\$ 0,6077

Fonte: ENEL, 2024.

4.4.2 Cálculo do custo de energia para carregar a bateria

Para calcular o custo de energia necessário para carregar a bateria LiPo 4S, considerou-se o consumo do carregador, as tarifas de energia (TE) e uso do sistema de distribuição (TUSD), bem como os tributos aplicados. A eficiência do carregador foi considerada 87%, e o consumo foi de aproximadamente 85,06 Wh (0,08506 kWh).

O custo de energia sem tributos foi calculado pela soma da TE e TUSD na:

$$\begin{aligned}\text{Valor Base} &= \text{TE} + \text{TUSD} & (4.3) \\ \text{Valor Base} &= 0,0787 + 0,6077 \\ \text{Valor Base} &= 0,6864 \text{ R\$ / kWh}\end{aligned}$$

O custo bruto para carregar a bateria é:

$$\begin{aligned}\text{Custo Bruto} &= \text{Consumo} \times \text{Valor Base} & (4.4) \\ \text{Custo Bruto} &= 0,08506 \text{ kWh} \times 0,6864 \text{ R\$ / kWh} \\ \text{Custo Bruto} &= \text{R\$ } 0,0584\end{aligned}$$

Finalmente, considerando os tributos, o custo total é dado por:

$$\begin{aligned}\text{Custo total} &= \text{Custo Bruto} \times (1 + \text{PIS} + \text{COFINS} + \text{ICMS}) & (4.5) \\ \text{Custo total} &= \text{R\$ } 0,0584 \times \text{R\$ } 1,2925 \\ \text{Custo total} &= \text{R\$ } 0,0754\end{aligned}$$

Portanto, o custo total para carregar a bateria é de **R\$ 0,0754 por recarga**, o que demonstra uma boa viabilidade econômica no que tange ao consumo energético do drone. Vale destacar que outros fatores de custo operacional também devem ser considerados, como os custos relacionados ao trabalho humano e aos processos logísticos envolvidos em cada missão. Contudo, devido à natureza altamente variável desses fatores, tais custos só poderiam ser mensurados em uma aplicação prática real da tecnologia aqui discutida.

5 CONCLUSÕES

A partir dos testes de voo e análises realizadas durante o desenvolvimento do TBS Delivery, concluiu-se que o projeto demonstra uma boa viabilidade técnica e econômica de suas operações. A eficiência energética, o consumo de bateria e a precisão dos sistemas de navegação, como o GPS, mostraram-se adequados para as proporções do drone, garantindo um desempenho satisfatório nas condições estipuladas. Além disso, a calibração precisa dos sensores, a eficácia dos sistemas de controle e a estabilidade de voo nas condições ambientais de teste (como vento e peso adicional), foram aspectos determinantes para o sucesso das missões.

A utilização de drones para entrega de mercadorias tem se tornado uma alternativa cada vez mais viável em vários países desenvolvidos, oferecendo várias vantagens, como a redução de custos operacionais e o aumento da eficiência logística. No entanto, a implementação dessa tecnologia no Brasil ainda enfrenta diversos desafios. Apesar dos avanços tecnológicos, existem dificuldades significativas para a adoção em larga escala. Questões socioeconômicas, culturais, éticas e, principalmente, as lacunas na legislação e regulamentação são obstáculos que precisam ser superados para que a tecnologia possa ser efetivamente escalada. A legislação vigente, que exige um rigoroso processo de autorização e regulamentação, ainda é um dos maiores desafios para o setor, além da necessidade de criar um ambiente seguro e aceitável para a operação de drones comerciais em áreas urbanas.

Em projetos futuros, há um grande potencial para aprimorar técnicas de aplicação no uso de drones para entregas. Isso inclui o desenvolvimento de modelos com maior eficiência energética, especialmente em relação à carga transportada, o que contribuiria diretamente para a redução de custos operacionais. Além disso, a criação de bases de lançamento e pouso equipadas com pontos de carregamento automatizados, aliados à implementação de sistemas inteligentes de otimização de rotas, poderá melhorar significativamente a eficácia das operações logísticas.

REFERÊNCIAS

ABRASEL. **Delivery de comida por drone: em primeiro teste realizado no Brasil, equipamento de 6 motores reduz trajeto de 12 para 2 minutos.** Campinas/SP, 2020. Disponível em: <https://rnc.abrasel.com.br/noticias/noticias/delivery-de-comida-por-drone-em-primeiro-teste-realizado-no-brasil-equipamento-de-6-motores-reduz-trajeto-de-12-para-2-minutos/>. Acesso em: 25 set. 2024.

AGATZ, N.; BOUMAN, P.; SCHMIDT, M. **Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone.** [S.l.], 2015.

ANAC. PAS – **Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas.** 2015. Disponível em: <http://www2.anac.gov.br/rpas/>. Acesso em: 28 set. 2024.

ANAC, B. **Orientações para Usuários de Drones.** Brasília/DF: [s.n.], 2017. 24 p.

Disponível em:

http://www.anac.gov.br/assuntos/paginastematicas/drones/orientacoes_para_usuarios.pdf.

Acesso em: 11 out. 2024.

ATTENNI, G.; ARRIGONI, V.; BARTOLINI, N.; MASELLI, G. Drone-based delivery systems: A survey on route planning. **IEEE Access**, v. 11, p. 123476–123504, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3329195.

BAMBURRY, Dane. **Drones: Designe for Product Delivery.** 2015. 40 - 48 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/drev.10313>

CENTENARO, M.; VANGELISTA, L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the iot and smart city scenarios. **IEEE Wireless Communications**, IEEE, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016. DOI: 10.1109/MWC.2016.7721743

CHIANG, W.-C.; LI, Y.; SHANG, J.; URBANO, T. L. Impact of Drone Delivery on Sustainability and Cost: Realizing the Potential of UAVs through Vehicle Routing Optimization. **Applied Energy**, v. 242, p. 1164–1175, 2019. ISSN 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.03.117

CHOI-FITZPATRICK, A.; CHAVARRIA, D.; CYCHOSZ, E.; DINGENS, J. P.; DUFFEY, M.; KOEBEL, K.; SIRIPHANH, S.; TULEN, M. Y.; WATANABE, H.; JUSKAUSKAS, T.; HOLLAND, J.; ALMQUIST, L. **Up in the Air: A Global Estimate of Non-Violent Drone Use 2009-2015**. [S.l.], 2016. Disponível em: <https://digital.sandiego.edu>. Acesso em: 17 nov. 2024.

CLARKE, R. **Understanding the drone epidemic**. *Computer Law & Security Review*, v. 30, p. 230–246, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2014.03.002>. Acesso em: 17 nov. 2024.

DECEA. Drone RPAS: Tenha uma operação segura com seu DRONE/RPAS. **Departamento de Controle do Espaço Aéreo - DECEA**, Comando da Aeronáutica, 2019. Disponível em: <https://www.decea.gov.br/drone/>. Acesso em: 14 out. 2024.

DECEA. **Dúvidas Frequentes: relação de dúvidas frequentes**. 2021. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/drone/>. Acesso em: 15 Out. 2024.

DECEA. **Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2023. 20 p.

DJI. **E300 tuned propulsion system for multirotor**. 2016 Disponível em: <https://www-v1.dji.com/e300.html>. Acesso em: 02 Out. 2024.

Drone Industry Insights. **Relatório de Mobilidade Aérea Avançada**. 2023. Disponível em: <https://droneii.com/advanced-air-mobility-aam-evtol-vertiports-utm>. Acesso em: 02 Out. 2024.

D'ANDREA, R. Can drones deliver? *IEEE Transactions On Automation Science and Engineering*, v. 11, n. 3, p. 647–648, 2014.

ELETROGATE. **Drones: o que são, como funcionam e como voam**. 2020. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/drones-o-que-sao-como-funcionam-e-como-voam/>. Acesso em: 15 Out. 2024.

ESTADÃO. **Mobilidade aérea e inteligência artificial prometem revolucionar futuro do setor de entregas**. 2024. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/inovacao/mobilidade-aerea-e-inteligencia-artificial-futuro-do-setor-de-entregas/>. Acesso em: 05 Out. 2024.

ENEL. **Tarifas para fornecimento de energia elétrica.** 2024. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-cearal>. Acesso em: 17 nov. 2024.

EXTRA. **Avião bate em drone pouco antes de aterrissar em aeroporto de Moçambique.** 2017. Disponível em: <https://extra.globo.com/noticias/mundo/aviao-bate-em-drone-pouco-antes-de-aterrissar-em-aeroporto-de-mocambique-20737523.html>. Acesso em: 29 nov. 2024.

FORBES. **DHL quer usar drones em distâncias maiores para entregas entre cidade.** 2021. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbes-tech/2021/07/dhl-quer-usar-drones-em-distancias-maiores-para-entregas-entre-cidades/>. Acesso em: 15 Out. 2024.

G1. **'Avenida aérea': Drones transportam material biológico em Salvador com três pontos de pouso e decolagem.** 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/2023/02/13/drones-transportam-material-biologico-em-salvador.ghtml>. Acesso em: 3 Out. 2024.

GEOONE. **Qual drone comprar para fazer Mapeamento?** 2023. Disponível em: <https://geoone.com.br/qual-drone-comprar-para-fazer-mapeamento/>. Acesso em: 10 Out. 2024.

GOMES, R. M. **Estudo sobre a tração fornecida por hélices mono-pás.** Universidade federal do espírito santo, centro tecnológico departamento de engenharia mecânica, v. 1, p. 11–12, jul. 2016.

HARRINGTON, A. M.; KRONINGER, C. **Characterization of Small DC Brushed and Brushless Motor.** [S.l.], 2013. [Online]. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a577582.pdf>. Acesso em: 13 out. 2024.

HOBBYGOIAS. **Motor 2212 920kv 2-4S Brushless P/ Drone.** 2022. Disponível em: https://www.hobbygoias.com.br/MLB-3802139575-kit-4-motor-2212-920kv-2-3s-padro-dji-p-drone-f450-f550-_JM. Acesso em: 20 Out. 2024.

HUGHES, A.; DRURY, B. **Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications.** 4th. ed. [S.l.]: Newnes, 2013.

JOHNSON, T. M. **Introdução ao GPS.** 2017. Disponível em: http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/thienne_johnson/gps.html. Acesso em:

25 Out. 2024.

KADAMATT, V. Tricopter vs Quadcopter vs Hexacopter: A Comparison. 2017. . [Acesso em: 24 out. 2024]. LinkedIn. **Tipos de drones no mercado e suas aplicações**. 2020. Disponível em: <http://www.droneybee.com/tricopter-vs-quadcopter-vs-hexacopter/>. Acesso em: 15 Out. 2024.

MENG, S.; GUO, X.; LI, D.; LIU, G. **The multi-visit drone routing problem for pickup and delivery services**. *Transportation Research Part E*, v. 169, 2023, p. 102990. DOI: 10.1016/j.tre.2023.102990. Acesso em: 10 nov. 2024.

MARIANO, Marco; SCICLUNA, Kris. **Design and Implementation of an Electronic Speed Controller for Brushless DC motors**. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17641.29286>. Acesso em: 2 nov. 2024.

MATSCHULAT. **Proposta de um modelo heurístico para o problema de distribuição de cargas fracionadas com o auxílio de drones**. Joinville, Brasil: [s.n.], 2016. 65 p.

MENG, S.; GUO, X.; LI, D.; LIU, G. **The multi-visit drone routing problem for pickup and delivery services**. *Transportation Research Part E*, v. 169, p. 102990, 2023. Acesso em: 10 nov. 2024.

MUNOZ, M. E. P. **Modelagem matemática e controle de um quadrimotor**. 104 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2012. Citado na página 31.

PANDYA, Sundaram B. **Optimizing brushless direct current motor design: An application of the multi-objective generalized normal distribution optimization**. *Heliyon*, v. 10, n. 4, p. 26, fev. 2024. DOI: [10.1016/j.heliyon.2024.e26369](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26369). Acesso em: 26 nov. 2024.

PIXHAWK. **Sistemas de Controle de Rádio**. 2018. Disponível em: https://docs.px4.io/v1.11/en/getting_started/rc_transmitter_receiver.html. Acesso em: 21 Out. 2024.

PIXHAWK. **PX4 Autopilot User Guide (v1.11.0)**. 2024. Disponível em:

<https://docs.px4.io/v1.11/en/> . Acesso em: 20 Out. 2024.

RAHMA, Y. Design and fabrication of small vertical-take-off-landing unmanned aerial vehicle. **MATEC Web of Conferences**, v. 152, p. 02023, 2018. 1School of Engineering, Taylor's University, Malaysia. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815202023>.

RCDRONE. **Telemetria de rádio 3DR V5 - 433Mhz 915Mhz 100MW/500MW Módulo de transmissão de dados aéreos e terrestres com cabos OTG para APM 2.8 /Pixhawk 2.4.8**. 2017. Disponível em: <https://rcdrone.top/pt/products/3dr-radio-v5-telemetry>. Acesso em: 10 Out. 2024.

RISINGSUNFPV. **Lipo battery packs explained**. 2018. Disponível em: <https://risingsunfpv.com/blogs/helpful-guides/lipo-battery-packs-explained?shpxid=1a8f7773-b04a-40ba-aa52-9b41e545661f>. Acessado em: 02 nov. 2024

SAID, S. **Quadcopter Mechanics**. 2014. Disponível em: <https://risingsunfpv.com/blogs/helpful-guides/lipo-battery-packs-explained?shpxid=1a8f7773-b04a-40ba-aa52-9b41e545661f> . Acesso em: 2 nov. 2024.

SANTOS, M. O. **Veículos aéreos não tripulados e sua inserção em espaço aéreo não segregado**. *Vértiges*, Campos dos Goytacazes/RJ, v. 18, n. 3, p. 173–188, fev 2016. P. 179.

SHABANIAN, A. et al. **Optimization of brushless direct current motor design using an intelligent technique**. *ISA Transactions*, Elsevier, v. 57, p. 311–321, jul. 2015. SpeedBird. Aircraft systems built to transform logistics. 2020.

SpeedBird. **Aircraft systems built to transform logistics**. 2020. Disponível em: <https://www.speedbird.aero/#about> . Acesso em: 21 Out. 2024.

STOPHER, P.; WARGELIN, L.; MINSER, J.; TIERNEY, K.; RHINDRESS, M.; O'CONNOR, S. **GPS-based household interview survey for the cincinnati, Ohio region**. In: *Anais Annual Transportation Research Board Meeting*. Washington, D.C.: [s.n.], 2012. 91th, Cd-Rom.

SAFEDRONE. **SEC. 4. Plano para a capacidade operacional total de sistemas de aeronaves não tripuladas gestão de tráfego**. 2017. Disponível em: <https://jrupprechtlaw.com/safe-drone-act-2017/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

TeamBlackSheep. **Durable and crash resistant multirotor optimized for dynamic FPV flight**. 2014. 10 p. Disponível em: <https://www.team-blacksheep.com/media/files/tbs-discovery-manual.pdf>. Acesso em: 20 out. 2024.

TECNOBLOG. **iFood recebe autorização da Anac para entregas com drones no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://tecnoblog.net/noticias/ifood-recebe-autorizacao-da-anac-para-entregas-com-drones-no-brasil/>. Acesso em: 15 out. 2024.

The Business Research Company. **Drones market size, trends, and growth opportunities in 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/drones-market>. Acesso em: 23 nov. 2024.

TKác, M.; MésÁROš, P. **Utilizing drone technology in the civil engineering**. Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering, v. 14, n. 1, December 2019.

ULRICH PEDRO HENRIQUE; NOBRE, J. C. **Análise do estado da arte em segurança cibernética com drones**. In: Revista Eletrônica de Iniciação Científica em Computação. Porto Alegre, RS, Brasil: [s.n.], 2019. p. 2–10.

WANG, X.; LIU, Z.; LI, X. Optimal delivery route planning for a fleet of heterogeneous drones: A rescheduling-based genetic algorithm approach. **Computers & Industrial Engineering**, v. 179, p. Article 109179, 2023. Acesso em: 8 nov. 2024.

WAWRLA, Lukas; MAGHAZEI, Omid; NETLAND, Torbjorn. Application of drones in warehouse operation. **Chair of Productions and Operations Management Department of Management, Technology and Economics ETH Zurich**, ago. 2019, (p 4-7). Disponível em: https://ethz.ch/content/dam/ethz/specialinterest/mtec/pomdam/documents/Drones%20in%20warehouse%20opeations_POM%20whitepaper%202019_Final.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024.

WANG, Z.; SHEU, J.-B. Vehicle routing problem with drones. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 122, p. 350–364, 2019. Acesso em: 10 nov. 2024.

WONZOSKI, F. de O.; OLIVEIRA, A. Roberto Alves de,. Desenvolvimento de um drone de baixo custo para mapeamento de território: desenvolvimento de um drone de baixo custo para mapeamento de território. **Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc Videira, [S. l.]**, v. 5, p. e24721, 2020. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/apeuv/article/view/24721>. Acesso em: 26 nov. 2024.

ZIEHER, S.; OLCAY, E.; KEFFERPÜTZ, K.; SALAMAT, B.; OLZEM, S.; ELSBACHER, G.; MEEß, H. Drones for automated parcel delivery: Use case identification and derivation of technical requirements. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 28, p. 101253, 2024. ISSN 2590-1982.