

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

**DIOGO FÉLIX TRINCONI VIGNOTTO
GUILHERME SEVERO SANTOS MOTA
JOÃO PEDRO GALVÃO DOS SANTOS**

PROJETO DE UM DRONE DE ENTREGAS

São José dos Campos
2025

**DIOGO FÉLIX TRINCONI VIGNOTTO
GUILHERME SEVERO SANTOS MOTA
JOÃO PEDRO GALVÃO DOS SANTOS**

PROJETO DE UM DRONE DE ENTREGAS

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade
de Tecnologia de São José dos Campos, como
parte dos requisitos necessários para a obtenção
do título de Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.

Orientador: Dr. Bruno Peruchi Trevisan

São José dos Campos
2025

FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec São José dos Campos Prof. Jessen Vidal
Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação

VIGNOTTO, Diogo Félix Trinconi

Projeto de um Drone de Entregas. / Diogo Félix Trinconi Vignotto, Guilherme Severo Santos Mota, João Pedro Galvão dos Santos – São José dos Campos, 2025.

61.

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronáuticas. Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, 2025.

Orientador: Dr. Bruno Peruchi Trevisan

1. Projeto. 2. Drone . 3. Entrega. I. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. II. Título

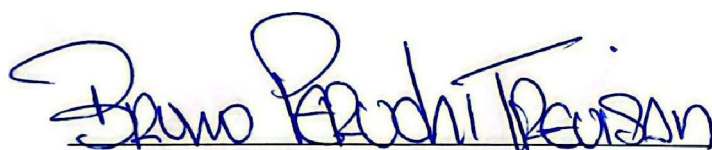
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIGNOTTO, D. F. T; SANTOS, J. P. G; MOTA, G. S. S. **Projeto de um Drone de Entregas**. 2025. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Projetos de Estruturas Aeronáuticas) - Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, São José dos Campos, 2025.

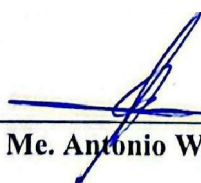
**DIOGO FÉLIX TRINCONI VIGNOTTO
GUILHERME SEVERO SANTOS MOTA
JOÃO PEDRO GALVÃO DOS SANTOS**

PROJETO DE UM DRONE DE ENTREGAS

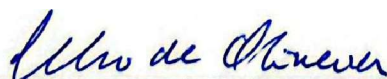
Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade
de Tecnologia de São José dos Campos, como
parte dos requisitos necessários para a obtenção
do título de Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.



Dr. Bruno Peruchi Trevisan- FATEC SJC



Me. Antonio Wellington Sales Rios



Me, Celso de Oliveira

28 / 11 / 25

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Expressamos a nossa profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho. Agradecemos, em particular, ao Dr. Bruno Peruchi Trevisan, nosso orientador, pela sua inestimável orientação, paciência e conhecimentos técnicos que foram cruciais para o desenvolvimento deste projeto. Agradecemos também à Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal por nos ter proporcionado o ambiente e os recursos necessários para a realização desta pesquisa. Por fim, o nosso obrigado aos nossos familiares e amigos pelo apoio constante e incentivo ao longo desta jornada acadêmica.

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto de um drone de entregas, considerando os aspectos logísticos, funcionais e estruturais para a sua aplicação em centros urbanos de médio e grande porte. A pesquisa aborda a evolução dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), desde as suas origens militares até à sua crescente utilização em setores civis e industriais, com foco na logística. São analisados os requisitos operacionais, a definição de parâmetros técnicos como capacidade de carga, autonomia de voo e tipo de propulsão, bem como o projeto mecânico e estrutural do drone. A metodologia incluiu o levantamento de requisitos, análise de empuxo, carga e autonomia, e otimização da bateria. O estudo também avalia os desafios e limitações do mercado, incluindo regulamentações e segurança operacional, e investiga tendências de engenharia aplicadas à mobilidade aérea urbana. O objetivo geral foi desenvolver um projeto conceitual alinhado às tendências tecnológicas e desafios do setor de transporte, visando a otimização da roteirização e execução de serviços logísticos.

Palavras-Chave: Projeto; Drone; Entregas;

ABSTRACT

This work presents the design of a delivery drone, considering the logistical, functional, and structural aspects for its application in medium and large urban centers. The research addresses the evolution of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), from their military origins to their growing use in civil and industrial sectors, with a focus on logistics. Operational requirements are analyzed, as well as the definition of technical parameters such as payload capacity, flight autonomy, propulsion type, and the mechanical and structural design of the drone. The methodology included requirements gathering, thrust, payload, and autonomy analysis, and battery optimization. The study also evaluates market challenges and limitations, including regulations and operational safety, and investigates engineering trends applied to urban air mobility. The overall objective was to develop a conceptual design aligned with technological trends and challenges in the transportation sector, aiming to optimize routing and execution of logistics services.

Keywords: Design; Drone; Deliveries;

SUMÁRIO

Dr. Bruno Peruchi Trevisan- FATEC SJC	iv
Me, Celso de Oliveira	iv
1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivo Geral	11
1.2. Objetivos Específicos	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1. Tipologia e Aplicações Logísticas de Drones	13
2.2. Riscos, Oportunidades e Viabilidade Econômica.....	15
2.3. Legislação Brasileira Aplicada a Drones.....	16
2.4. Manufatura Aditiva Aplicada a Drones.....	17
2.5. Componentes e Dinâmica de Voo dos Drones.....	19
2.5.1. Controladora de Voo.....	20
2.5.2. ESCs.....	20
2.5.3. Motores.....	20
2.5.4. Hélices.....	21
2.5.5. Baterias.....	22
2.5.6. Rádio Transmissor e receptor.....	22
2.5.7. GPS.....	22
2.6. Esquema elétrico do drone.....	23
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	25
3.1. Introdução do Desenvolvimento.....	25
3.2. Metodologia do Projeto	25
3.2.1. Levantamento de Requisitos e Análise Preliminar	25
3.2.2. Expectativa de Empuxo, Carga e Autonomia.....	26
3.2.3. Análise de Peso e Empuxo	26
3.3. Cálculo do Peso Total e Empuxo Necessário (AUW).....	27
3.4. Análise de Autonomia e Otimização da Bateria.....	28
3.5. Cálculo do Consumo Médio de Corrente (AAD)	29
3.5.1. Cálculo da Autonomia de Voo	30
3.5.2. Análise e Otimização da Bateria.....	32
3.5.3. Motores.....	32
3.5.4. Controladores Eletrônicos de Velocidade (ESCs).....	33
3.5.5. Hélices	35
3.5.6. Controladora de Voo.....	36
3.5.7. Módulo de Rádio	37
3.5.8. Outros Componentes	39
3.5.9. Considerações sobre a Otimização da Bateria.....	40
3.6. Projeto Mecânico e Estrutural	41
3.6.1. Programa Utilizado para modelagem 3D e detalhamento	41
3.6.2. Estrutura (<i>Frame</i>)	42
3.6.3. Trem de Pouso	44
3.6.4. Compartimento de Carga Útil.....	44
3.7. Algoritmos de Controle	44
3.7.1. Bateria.....	44
3.8. Sistema de Navegação e Comunicação	46

3.8.1. GPS	46
3.9. Conexões elétricas do Drone	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1. Manufatura, Montagem e Validação Elétrica	48
4.1.1. Manufatura dos Componentes do Drone	48
4.1.2. Montagem do quadro	50
4.1.2. Instalação do sistema eletrônico	51
4.2. Otimização de Componentes e Desempenho	53
4.2.1. Sistema de Propulsão e Energia.....	53
4.2.2. Controle e Comunicação.....	53
4.3. Considerações Finais dos Resultados	54
5. CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), ou drones, representa uma das mais relevantes transformações tecnológicas aplicadas à mobilidade e à logística moderna. Embora amplamente difundidos nos dias atuais para produção de conteúdo audiovisual e atividades comerciais, os drones têm suas origens ligadas ao cenário militar do início do século XX, quando surgiram como soluções para missões de vigilância e reconhecimento (FAXINA, 2021). Ao decorrer do tempo, essa tecnologia evoluiu e passou a integrar uma variedade de setores civis e industriais.

No Brasil, os drones vêm sendo utilizados em diversas áreas, incluindo a segurança pública, onde auxiliam o trabalho da Guarda Civil Metropolitana e da Defesa Civil, monitorando áreas de risco, grandes aglomerações, invasões ambientais e auxiliando em atividade de combate à criminalidade. No campo das engenharias, destacam-se aplicações em vistorias de obras e tarefas de alto risco, consideradas insalubres para trabalhadores (FAXINA, 2021).

As vantagens associadas ao uso de drones são diversas. Trata-se de aeronaves de pequeno porte, com menor consumo de combustível e que dispensam infraestrutura como pistas de pouso. Por isso, são ideais para situações de emergência, além de apresentarem custos reduzidos de aquisição e manutenção. Contudo, também apresentam limitações quanto à capacidade de carga e são vulneráveis a condições climáticas adversas (FAXINA, 2021).

Os avanços tecnológicos contribuíram para a expansão do uso dos drones, com motores mais eficientes, sistemas de controle de voo mais precisos e plataformas de transmissão de dados mais rápidas e seguras. Atualmente, os VANTs podem ser classificados em dois principais tipos: asas fixas e multirotores (ROSKAN, 2003). As asas fixas utilizam a diferença de pressão para obter sustentação, enquanto os multirotores utilizam o movimento de suas hélices para se manterem no ar e realizarem manobras. Drones biomiméticos e flutuantes também estão em desenvolvimento, embora representem uma fatia menor do mercado.

Ainda dentro da classificação dos multirotores, é importante considerar o número de motores e o tipo de propulsão: isolados ou coaxiais. Essa diferença influencia diretamente na força de sustentação, na estabilidade e na capacidade de manobras como arfagem, rolagem e guinada (DEMOLINARI, 2016). Também é relevante destacar o papel dos sensores e dos controladores automáticos, que conferem aos drones alta autonomia e precisão em operações complexas.

Com o crescimento do e-commerce e a necessidade de entregas cada vez mais rápidas e eficientes, os drones surgem como uma solução promissora para o transporte de pequenas cargas. Grandes empresas estão investindo fortemente em tecnologias embarcadas como sistemas de propulsão, localização e alimentação energética para otimizar esse processo (CARVALHO et al., 2021). No Brasil, a predominância do modal rodoviário ainda limita a eficiência logística, mas o avanço de novos modais, como os VANTs, está modificando essa realidade. Os principais benefícios estão relacionados à flexibilidade, velocidade de entrega, disponibilidade e serviço porta-a-porta. Os drones, ao atenderem a esses requisitos com baixo custo operacional, representam uma tendência crescente na distribuição urbana.

O consumidor atual exige cada vez mais qualidade, agilidade e segurança nas entregas. Para atender essa demanda a tecnologia dos drones vem se tornando uma ferramenta essencial para otimizar a roteirização e execução de serviços logísticos (GOMES et al., 2023).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo apresentar o projeto de um drone de entregas, considerando os aspectos logísticos, funcionais e estruturais dos grandes e médios centros urbanos, alinhado aos avanços de engenharia, desafios e tendências do mercado atual.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral é desenvolver o projeto conceitual de um drone de entregas, considerando requisitos logísticos, funcionais e estruturais aplicáveis aos centros urbanos de médio e grande porte, em conformidade com as tendências tecnológicas e os desafios operacionais do setor de transporte.

1.2. Objetivos Específicos

Para a consecução deste objetivo geral foram estabelecidos os objetivos específicos:

- Identificar e analisar os requisitos operacionais para a atuação de drones em ambientes urbanos densamente povoados, incluindo restrições legais, geográficas e de infraestrutura;
- Definir os parâmetros técnicos do drone, como capacidade de carga, autonomia de voo, tipo de propulsão, sistemas de navegação e controle;
- Projetar a estrutura física e aerodinâmica do drone, visando resistência mecânica, eficiência energética e adaptação ao espaço urbano;

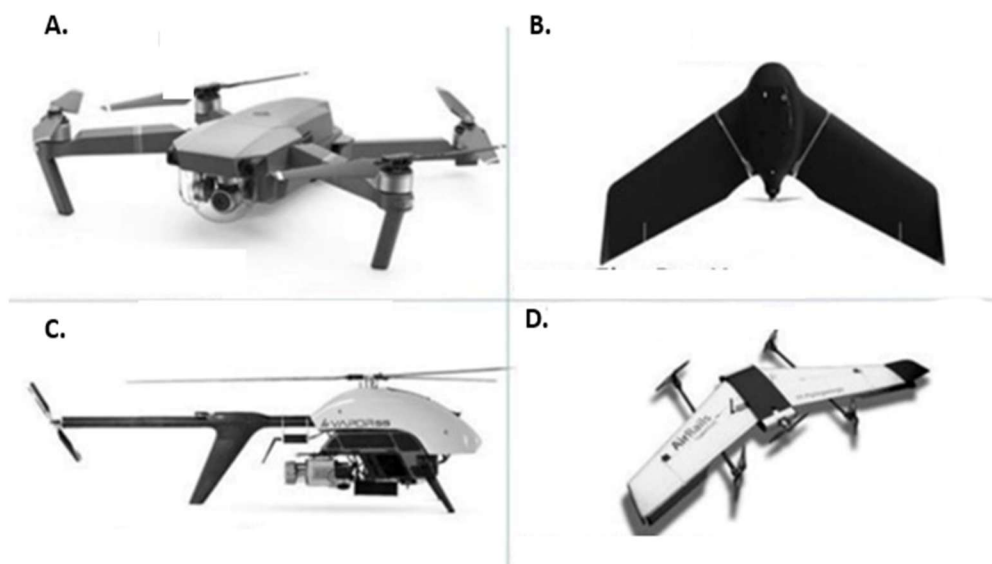
- Integrar soluções logísticas e tecnológicas, como rastreamento em tempo real, planejamento de rotas automatizado e compatibilidade com hubs de entrega;
- Avaliar os principais desafios e limitações do mercado, incluindo regulamentações, custo-benefício, sustentabilidade e segurança operacional;
- Investigar tendências de engenharia aplicadas à mobilidade aérea urbana, com foco em inovação, escalabilidade e impacto ambiental;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Tipologia e Aplicações Logísticas de Drones

Os drones têm se consolidado como uma tecnologia multifuncional, com aplicações que vão desde o uso militar até serviços logísticos avançados. A classificação desses veículos não tripulados considera aspectos estruturais e funcionais. Conforme Geoone (2023) os drones são divididos em quatro categorias: multirrotores, asa fixa, rotor único e VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*) como mostra a Figura 1. Cada configuração atende a finalidades específicas, com vantagens e limitações técnicas bem definidas.

Figura 1: Principais tipos de drone: A. Drone multirrotores; B. Drone de asa fixa; C. Drone de rotor único; D. VTOL.



Fonte: TKác MésáROš (2019).

Os multirrotores são os mais populares, tanto no uso recreativo quanto em aplicações comerciais. Possuem de três a oito hélices, controladas de forma independente, o que proporciona alta manobrabilidade, capacidade de voo estacionário e decolagens verticais em espaços restritos. Essas características os tornam ideais para fotografia aérea, mapeamento urbano e inspeções de infraestrutura. No entanto, sua autonomia de voo e capacidade de carga são limitadas em comparação com outros tipos (GEOONE, 2023).

Drones de asa fixa possuem maior eficiência aerodinâmica, o que lhes permite percorrer distâncias mais longas com consumo energético reduzido. São utilizados com frequência em levantamentos topográficos, monitoramento agrícola e vigilância ambiental.

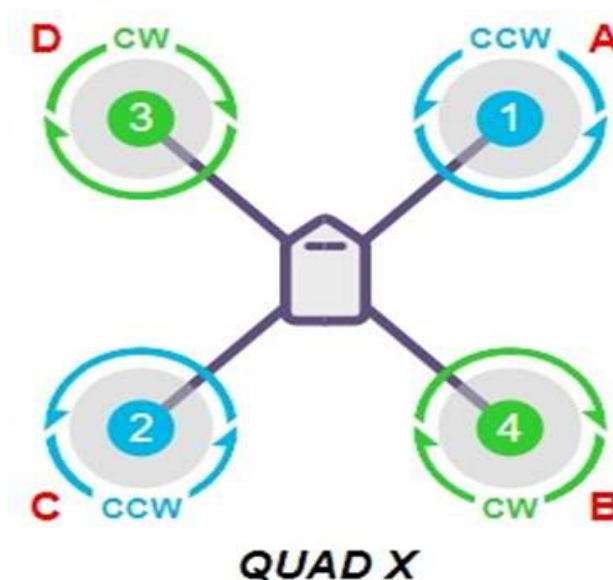
Entretanto, demandam áreas maiores para decolagem e pouso, além de exigirem maior habilidade de pilotagem (GEOONE, 2023).

O tipo rotor único, assemelhado a helicópteros, apresenta maior capacidade de carga e resistência a ventos intensos. Combinam estabilidade em voo com possibilidade de hovering, sendo aplicáveis em mapeamentos de terrenos acidentados e operações industriais. Contudo, são mais complexos na construção e operação (GEOONE, 2023).

Os VTOL representam um avanço significativo ao unir características de multirrotores e asas fixas. São capazes de decolar e pousar verticalmente, como um multirrotor, e realizar voo horizontal eficiente, como um drone de asa fixa. Apesar de seu potencial em missões de longa distância, ainda enfrentam desafios mecânicos, consumo elevado de energia e custos operacionais mais altos (GEOONE, 2023).

Para entregas de pequeno porte, o tipo mais empregado é o quadricóptero, que oferece precisão na movimentação e capacidade de pairar sobre o destino, aspectos essenciais em áreas urbanas. Sua configuração padrão alterna motores em sentidos horário (CW) e anti-horário (CCW) mostrados na Figura 2, equilibrando os torques e assegurando controle estável de guinada (PIXHAWK, 2018).

Figura 2: Sentidos de rotação dos motores.



Fonte: Pixhawk (2018).

Além da tipologia, a expansão logística com drones tem sido explorada por grandes empresas como Amazon, DHL, Speedbird Aero e Ifood (Figura 3) que adotou esse meio de transporte. A principal motivação reside na chamada "última milha", etapa da entrega com

maior custo e complexidade operacional. Os drones representam uma solução viável para esse desafio, reduzindo tempo, tráfego urbano e custos com combustíveis (LEMES, 2017; MAGRINELLI, 2010).

Figura 3: Drone de entrega do Ifood.



Fonte: SpeedBird (2020).

2.2. Riscos, Oportunidades e Viabilidade Econômica.

Apesar das vantagens operacionais e logísticas, o uso de drones em entregas não está isento de desafios técnicos, econômicos e regulatórios. Um dos principais riscos está relacionado à segurança de voo e à integridade física de terceiros. A colisão com aeronaves tripuladas, por exemplo, embora rara, pode ocorrer em casos de operação negligente, como demonstrado em incidentes documentados em 2017 (SAFEDRONE, 2017).

Figura 4: Acidente aeronáutico envolvendo um drone e uma aeronave.



Fonte: Extra (2017).

Outro ponto crítico é a vulnerabilidade tecnológica. Em ambientes externos, drones estão sujeitos a falhas operacionais, interferência eletromagnética, condições meteorológicas adversas e limitações de GPS ou acidentes de colisão (Figura 4). Por outro lado, em ambientes internos controlados, tais como depósitos logísticos e centros de distribuição, esses riscos são significativamente reduzidos, tornando os drones uma alternativa robusta para automação (WAWRLA; MAGHAZEI; NETLAND, 2019).

Do ponto de vista econômico, os custos operacionais dos drones são relativamente baixos. Segundo D'Andrea (2014), a entrega de uma carga de até 2 kg em um raio de 10 km pode custar apenas US\$ 0,10. Essa eficiência é atrativa para países com infraestrutura deficiente ou em situação de crise econômica, como o Brasil, onde o transporte rodoviário é caro e ineficiente em áreas densamente povoadas.

O uso de drones também pode fomentar a economia nacional por meio da criação de novos setores produtivos. Isso inclui o desenvolvimento de startups focadas em *software* de navegação, empresas de manutenção e reparo, escolas de formação de pilotos de drone e exportação de tecnologia nacional (CRUZ et al., 2019).

Contudo, a falta de regulamentação clara ainda é um entrave. A ausência de normas padronizadas para tráfego aéreo de drones, bem como exigências complexas de registro e operação, criam barreiras de entrada para empresas menores e startups. Além disso, há preocupações éticas relacionadas à privacidade, monitoramento e uso indevido, como transporte de contrabando e espionagem (CHOI-FITZPATRICK et al., 2016).

Por fim, a percepção pública sobre drones também impacta sua adoção. Enquanto parte da população os vê como uma inovação benéfica, outros os associam a riscos de privacidade e acidentes. A aceitação social e o avanço legislativo caminham lado a lado, sendo imprescindível o investimento em educação, transparência e comunicação para consolidar essa tecnologia no cotidiano urbano e industrial (CLARKE, 2014).

2.3. Legislação Brasileira Aplicada a Drones.

A operação de drones no Brasil é regulada por três órgãos: Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Cada instituição desempenha papel específico no processo de autorização, registro, homologação e controle do uso do espaço aéreo por aeronaves remotamente pilotadas.

Atualmente a ANAC classifica os drones com base em seu peso máximo de decolagem em três classes: Classe 1 (acima de 150 kg), Classe 2 (entre 25 e 150 kg) e Classe

3 (até 25 kg). Os drones da Classe 1 são submetidos a processos de certificação semelhantes às aeronaves tripuladas. Já os de Classe 2 e 3, embora tenham requisitos reduzidos, também devem ser cadastrados e identificados, especialmente se operarem além da linha visual (BVLOS) ou acima de 120 metros (ANAC, 2022). No entanto, provavelmente, a ANAC irá mudar o modo de classificação dos drone, não será somente pelo peso, mas também pelo risco de operação do drone (ANAC, 2025).

As categorias operacionais também se dividem em VLOS (*Visual Line Of Sight*), EVLOS (*Extended Visual Line Of Sight*) e BVLOS (*Beyond Visual Line Of Sight*). A operação em VLOS, dentro de até 120 metros de altitude, exige apenas o cadastro da aeronave no sistema SISANT. Acima desse limite ou fora do campo visual direto, são necessárias autorizações específicas com avaliação de risco operacional, seguro contra danos a terceiros e manual da aeronave (ANAC, 2017).

O DECEA, por sua vez, regula o acesso ao espaço aéreo por meio do sistema SARPA. Para voos acima de 120 metros, próximos a aeródromos ou realizados por RPAs acima de 25 kg, é obrigatória a emissão de NOTAM (*Notice to Airmen*). O processo é condicionado à obtenção prévia de registros na ANAC e ANATEL, assegurando a conformidade com os protocolos de segurança aérea (DECEA, 2023).

A ANATEL exige que todos os dispositivos de telecomunicação embarcados nos drones sejam homologados. Isso inclui módulos de rádio, GPS, câmeras com transmissão sem fio, entre outros. Os produtos precisam passar por testes de conformidade técnica, e sua comercialização só é permitida com selo de homologação, evitando interferências indesejadas em redes móveis e outros serviços de comunicação (ANATEL, 2024).

Além da regulamentação técnica, há exigências de segurança operacional. Menores de 18 anos não podem operar RPAs, e é vedada a realização de voos a menos de 30 metros de pessoas não anuentes. Há também restrições ao transporte de cargas perigosas, salvo exceções regulamentadas para uso agrícola ou operações do Estado (ANAC, 2022).

A legislação brasileira é considerada conservadora em comparação com países como Alemanha ou Estados Unidos. No entanto, avanços recentes, como a autorização concedida à Speedbird Aero em parceria com o iFood, demonstram abertura para exploração comercial do modal, ainda que com limitações de peso e distância (TECNOBLOG, 2020).

2.4. Manufatura Aditiva Aplicada a Drones.

A manufatura aditiva, amplamente conhecida como impressão 3D, representa uma revolução na engenharia de produção, particularmente útil na confecção de estruturas

complexas e funcionais, como as de veículos aéreos não tripulados (VANTs). Essa tecnologia constrói peças a partir da deposição sucessiva de camadas de material, baseando-se em modelos tridimensionais obtidos por *softwares* de CAD (*Computer-Aided Design*), proporcionando agilidade e flexibilidade ao processo de desenvolvimento de protótipos e produtos finais (SANTOS, 2023).

A visualização tridimensional, viabilizada por *softwares* de CAD, permite não apenas antecipar a configuração geométrica da peça final, como também identificar interferências mecânicas, avaliar montagens cinemáticas e realizar simulações funcionais. Esta capacidade torna-se particularmente valiosa em projetos aeroespaciais e robóticos, nos quais a interação entre partes móveis deve ser precisa e eficiente. Além disso, alterações de projeto são facilmente incorporadas com baixo custo e agilidade incomparável em relação a métodos tradicionais de fabricação (SANTOS, 2023).

Outro ponto de destaque é a versatilidade de materiais que podem ser utilizados na manufatura aditiva, incluindo cerâmicas, metais e polímeros (SANTOS, 2023). Esta diversidade permite a seleção de materiais com propriedades específicas de acordo com os requisitos estruturais e operacionais da peça a ser produzida. Por exemplo, em drones, a demanda por baixo peso e elevada resistência torna inadequado o uso de metais densos, como o aço, favorecendo a adoção de polímeros como PLA, PETG ou Nylon.

No contexto de otimização topológica, a manufatura aditiva viabiliza a concretização de geometrias que, até poucas décadas atrás, eram inviáveis devido a suas complexidades estruturais. A combinação de topologia otimizada com impressão 3D permite que estruturas altamente eficientes em termos de relação peso-resistência sejam produzidas com alta fidelidade geométrica, favorecendo aplicações aeroespaciais e automotivas, onde esse equilíbrio é crítico (SANTOS, 2023).

O processo completo de manufatura aditiva segue etapas sequenciais: modelagem tridimensional via *software* CAD, exportação do modelo em formato compatível com a impressora (geralmente STL), fatiamento do modelo em camadas, deposição do material, e finalmente o pós-processamento. Esta última etapa pode incluir desde simples remoção de suportes até usinagem de precisão, dependendo da tecnologia de impressão empregada (SANTOS, 2023).

Para o desenvolvimento estrutural de drones, a impressão 3D apresenta-se como solução ideal, não apenas pela capacidade de produção sob demanda e customização geométrica, mas também por viabilizar prototipagem funcional com rapidez. O uso de

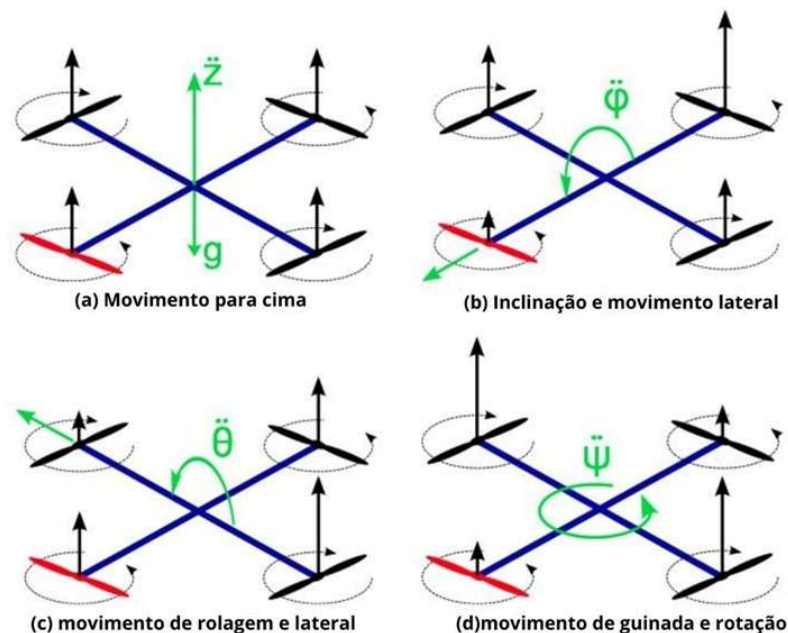
filamentos como PLA é comum devido à sua biodegradabilidade, facilidade de uso, rigidez e ampla disponibilidade (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

O processo de extrusão termoplástica, usual em impressoras FDM (*Fused Deposition Modeling*), permite a criação de peças por meio da deposição controlada de filamento fundido. A precisão dessa deposição, associada à robustez do material escolhido, garante que as peças produzidas sejam adequadas para integrarem a estrutura de drones que demandam leveza, resistência e repetibilidade dimensional (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

2.5. Componentes e Dinâmica de Voo dos Drones.

A arquitetura de um drone multirrotor, como os quadricópteros, é composta por três sistemas funcionais principais: controle (entrada), propulsão (saída) e feedback (monitoramento). Estes sistemas interagem de forma cibernética para garantir a estabilidade, manobrabilidade e responsividade da aeronave. Cada componente, do controlador de voo ao motor brushless, exerce função essencial na manutenção do voo estável e na execução de manobras coordenadas (MOLLICA, 2021), como mostra a Figura 5.

Figura 5: Dinâmica de Voo do drone.



Fonte: Rahma (2018).

2.5.1. Controladora de Voo.

O controlador de voo (*Flight Controller* – FC) constitui o cérebro do sistema. Ele interpreta sinais recebidos do piloto (via rádio receptor), correlaciona esses comandos com leituras de sensores inerciais (giroscópio, acelerômetro, magnetômetro) e envia sinais PWM para os controladores eletrônicos de velocidade (ESCs), que por sua vez ajustam os motores. A maioria dos FCs utiliza firmwares open-source como Betaflight ou iNAV, altamente personalizáveis e mantidos por comunidades técnicas ativas (LIANG, 2020a). A controladora de voo é o cérebro do drone, responsável por processar os dados dos sensores, executar os algoritmos de controle e enviar os comandos para os ESCs. Ela atua como o sistema nervoso central da aeronave, interpretando as entradas do piloto (ou do sistema autônomo) e traduzindo-as em comandos para os motores, garantindo a estabilidade e o controle do voo (PX4 AUTOPILOT, 2025).

As controladoras de voo modernas integram uma série de sensores inerciais, como acelerômetros e giroscópios, que fornecem dados sobre a orientação e a velocidade angular do drone. Magnetômetros (bússolas) são utilizados para determinar a direção, e barômetros para medir a altitude. A fusão desses dados, geralmente realizada por algoritmos como o filtro de Kalman, permite que a controladora tenha uma estimativa precisa da posição e atitude do drone no espaço (PX4 AUTOPILOT, 2025).

2.5.2. ESCs.

Os ESCs funcionam como intermediários entre o controlador de voo e os motores. São responsáveis por converter os sinais de controle em pulsos elétricos trifásicos para acionar motores brushless. Esta conversão exige circuitos com alta frequência de comutação, normalmente baseados em MOSFETs e controlados por microcontroladores embarcados, permitindo ajuste dinâmico de rotação e torque dos motores em tempo real (LIANG, 2020a).

2.5.3. Motores.

Os motores utilizados são, em sua maioria, do tipo “*outrunner brushless*” como mostra a Figura 6, que oferecem alta eficiência energética, durabilidade e elevado torque. Suas características construtivas — como diâmetro e altura do estator, bem como o índice KV — determinam diretamente sua performance. Um motor com alto KV gira mais rapidamente com menor torque, ideal para hélices pequenas; já motores de baixo KV oferecem maior torque, ideal para hélices grandes (LIANG, 2020a).

Figura 6: Motores do drone.



Fonte: Hobbygoias (2022).

2.5.4. Hélices.

As hélices são componentes cruciais que convertem a rotação do motor em empuxo, sendo um dos elementos mais importantes na determinação da eficiência e do desempenho de voo de um drone. A escolha adequada da hélice deve considerar o diâmetro, o passo, o número de pás e o material de fabricação, todos influenciando diretamente o empuxo gerado, o consumo de energia e o nível de ruído (FLITE TEST, 2025).

O diâmetro da hélice refere-se à distância de ponta a ponta da pá, enquanto o passo é a distância teórica que a hélice avançaria em uma rotação completa, como um parafuso em uma porca. Hélices de maior diâmetro e/ou passo geralmente geram mais empuxo, mas exigem mais torque do motor e consomem mais energia. Para drones de entrega, que necessitam de alta capacidade de carga e boa autonomia, hélices de grande diâmetro e baixo passo são frequentemente preferidas, pois maximizam o empuxo em rotações mais baixas, otimizando a eficiência (FLITE TEST, 2025).

O material da hélice também é um fator importante. Hélices de plástico são leves e baratas, mas podem ser frágeis e flexíveis, o que reduz a eficiência. Hélices de fibra de carbono, por outro lado, são mais rígidas, duráveis e eficientes, mas também mais caras. A rigidez da fibra de carbono minimiza a deformação das pás durante o voo, garantindo um empuxo mais consistente e reduzindo vibrações (AMAZON.COM, 2025).

2.5.5. Baterias.

A bateria, geralmente do tipo LiPo (polímero de lítio), fornece energia para todos os sistemas do drone. Sua seleção deve considerar densidade energética, capacidade de descarga e segurança operacional, pois baterias LiPo são sensíveis a sobrecarga, descarga excessiva e danos físicos. Por isso, o gerenciamento de carga e descarga é essencial, exigindo balanceadores e sensores apropriados integrados ao sistema (LIANG, 2020).

2.5.6. Rádio Transmissor e receptor.

O sistema de comunicação compreende o rádio transmissor (TX) e o receptor (RX). O transmissor converte os comandos do operador em sinais digitais enviados por RF, geralmente em 2.4 GHz ou 900 MHz. O receptor recebe esses sinais e os converte em comandos elétricos para o FC. Protocolos modernos de comunicação serial, como SBUS ou CRSF, substituem os antigos sinais PWM, reduzindo latência e simplificando a fiação interna (LIANG, 2021a).

2.5.7. GPS.

O módulo GPS (*Global Positioning System*) é um componente indispensável para a navegação e o controle autônomo de drones modernos. Ele fornece a localização precisa do drone em termos de latitude, longitude e altitude, além de informações de tempo. Essas informações são cruciais para uma série de funcionalidades essenciais em drones de entrega (DRONEDEPLOY, 2025).

As principais funções do GPS em um drone incluem:

- Voos Autônomos: Permite que o drone siga rotas pré-programadas, voe para pontos de passagem específicos e execute missões complexas sem intervenção manual constante.
- Navegação por Pontos de Passagem (*Waypoints*): O drone pode ser programado para visitar uma sequência de coordenadas geográficas, essencial para rotas de entrega definidas.
- Retorno Automático ao Ponto de Origem (*Return-to-Launch - RTL*): Em caso de perda de sinal de rádio, bateria fraca ou comando do piloto, o drone pode retornar automaticamente ao seu ponto de decolagem.
- Manutenção de Posição (*Position Hold*): O drone pode manter uma posição fixa no espaço, compensando automaticamente os efeitos do vento e outras perturbações, o que é vital para pousos precisos e operações de carga/descarga.

A precisão do GPS é um fator crítico para a segurança e eficiência das entregas. Em ambientes urbanos, a presença de edifícios altos pode causar o fenômeno de “canyon urbano”, onde os sinais de satélite são bloqueados ou refletidos, resultando em erros de posicionamento. Para mitigar esses problemas, módulos GPS modernos frequentemente utilizam sistemas de satélite adicionais, como GLONASS, Galileo e BeiDou (GNSS - *Global Navigation Satellite System*), e incorporam tecnologias como RTK (*Real-Time Kinematic*) ou PPK (*Post-Processed Kinematic*) para alcançar precisão centimétrica (DRONEDEPLOY, 2025).

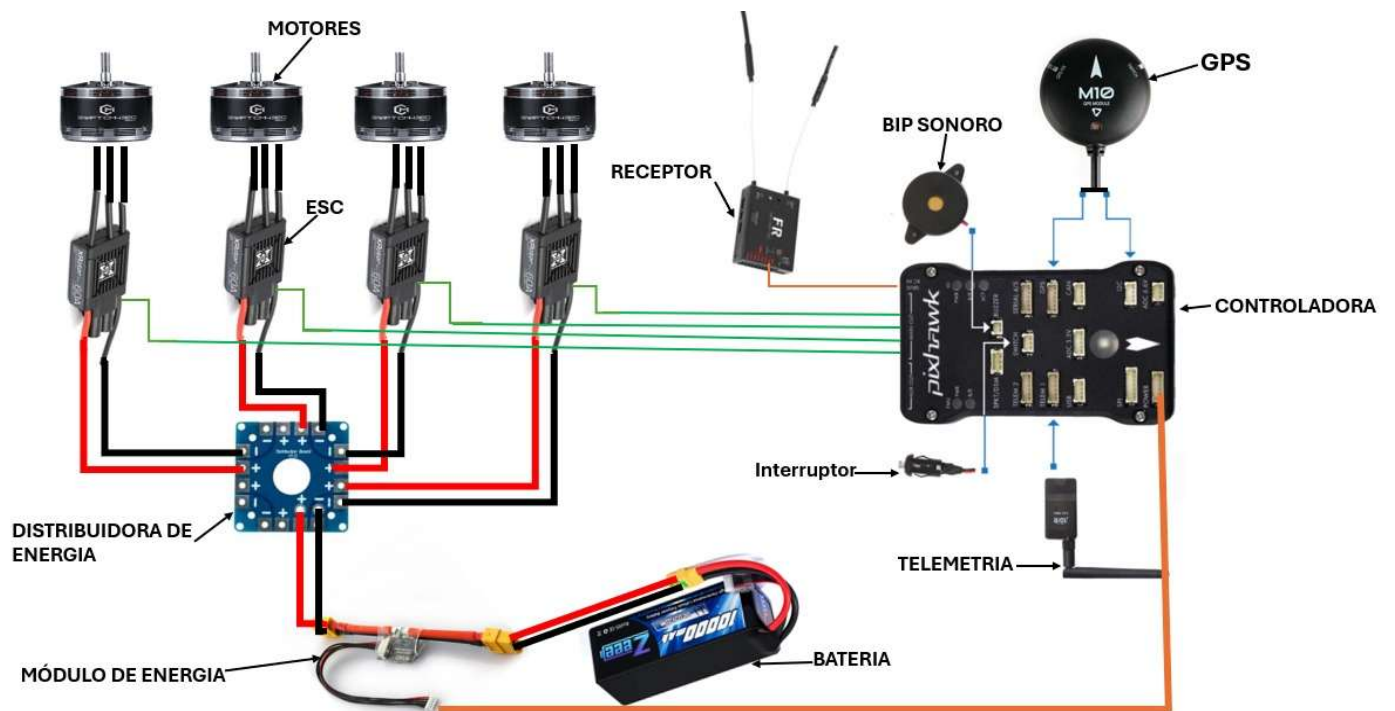
Para um drone de entregas, a capacidade de determinar sua posição com alta precisão é fundamental para:

- Pousos e Entregas Precisas: Garantir que o pacote seja entregue no local exato, minimizando erros e riscos.
- Segurança de Voo: Evitar colisões com obstáculos e outros drones, especialmente em corredores aéreos urbanos.
- Otimização de Rota: Seguir as rotas mais eficientes e seguras, economizando tempo e energia.

2.6. Esquema elétrico do drone.

O esquema elétrico de um drone representa de forma detalhada a conexão entre todos os componentes eletrônicos que compõem o sistema. Ele mostra como cada elemento como controladores, motores, sensores, baterias e placas de controle está interligado para garantir o funcionamento adequado da aeronave. Esse diagrama é essencial para compreender o fluxo de energia e de sinais elétricos, facilitando a análise, a manutenção e o desenvolvimento do sistema eletrônico do drone mostrado na Figura 7.

Figura 7: Diagrama elétrico do drone.



Autores (2025)

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1. Introdução do Desenvolvimento

Este capítulo detalha o processo de desenvolvimento do drone de entregas, abordando a seleção e dimensionamento dos componentes críticos, a análise de desempenho em termos de empuxo, carga útil e autonomia, e a otimização do sistema de propulsão e energia. O objetivo é apresentar uma solução robusta e eficiente, capaz de atender aos requisitos operacionais de um serviço de entregas aéreas, garantindo segurança, estabilidade e viabilidade econômica. Serão apresentados os cálculos e justificativas técnicas para cada escolha de componente e configuração, com base em princípios da engenharia aeronáutica e eletrônica, bem como em dados de fabricantes e literatura especializada.

O presente projeto visa desenvolver um drone capaz de transportar uma carga útil de até 1 kg, com autonomia de voo otimizada para cobrir distâncias relevantes em cenários urbanos e rurais. Para isso, a seleção criteriosa de cada componente, desde os motores e hélices até a controladora de voo e o sistema de bateria, é fundamental. Cada escolha é justificada por análises técnicas e cálculos de desempenho, garantindo que o drone não apenas atenda aos requisitos operacionais, mas também opere dentro de margens de segurança adequadas. A otimização da bateria, em particular, é um ponto central, buscando maximizar o tempo de voo sem comprometer a capacidade de carga ou a estabilidade da aeronave. Este capítulo servirá como um guia detalhado para a compreensão das decisões de engenharia que moldaram o design e a funcionalidade do drone de entregas proposto.

3.2. Metodologia do Projeto

O desenvolvimento deste projeto de drone de entregas seguiu uma metodologia iterativa e baseada em etapas, visando a otimização contínua e a validação das escolhas de design.

3.2.1. Levantamento de Requisitos e Análise Preliminar

A fase inicial consistiu no levantamento detalhado dos requisitos para um drone de entregas, incluindo capacidade de carga útil (1 kg), autonomia de voo desejada, ambiente operacional (urbano/rural) e considerações de segurança. Uma análise preliminar de mercado e da literatura existente sobre drones de entrega foi realizada para identificar tecnologias e abordagens viáveis.

3.2.2. Expectativa de Empuxo, Carga e Autonomia

Para garantir a viabilidade e o desempenho ideal do drone, foi estabelecida uma análise preditiva abrangente envolvendo empuxo, capacidade de carga e autonomia de voo. Essa abordagem permitiu validar as escolhas de componentes e antecipar o comportamento operacional da aeronave, assegurando que o projeto final estivesse alinhado com os requisitos de missão.

Estimativa do Peso Total (AUW – *All-Up Weight*): o peso total de decolagem foi determinado a partir da soma dos componentes estruturais, eletrônicos e de propulsão, considerando uma estrutura base de 1 kg com 1 kg de carga útil. Essa análise foi feita com base em dados reais de mercado, buscando uma configuração equilibrada entre leveza, resistência e capacidade operacional.

Empuxo Necessário para Desempenho: o sistema de propulsão foi dimensionado para atingir uma relação Empuxo-Peso (TWR) de 2:1, garantindo que o drone tenha potência suficiente para decolagens verticais seguras, manobras estáveis e resposta rápida em voo. Essa margem de empuxo assegura desempenho adequado mesmo sob condições adversas, como vento ou aumento momentâneo de carga.

Previsão de Consumo Médio de Corrente (AAD – *Average Ampere Draw*): a estimativa do consumo médio durante o voo de cruzeiro foi utilizada para prever a demanda energética do sistema. Esse parâmetro é essencial para o dimensionamento da bateria, determinando não apenas o tempo de voo, mas também a eficiência energética e o equilíbrio entre peso e capacidade.

Projeção de Autonomia de Voo: com base na capacidade nominal da bateria e no valor previsto de AAD, foi projetada a autonomia operacional do drone. Essa previsão fornece o tempo estimado de voo contínuo, servindo de referência para o planejamento de missões e para a definição dos limites operacionais seguros da aeronave.

3.2.3. Análise de Peso e Empuxo

A análise de peso e empuxo é fundamental para determinar a viabilidade do projeto e garantir que o drone tenha capacidade de levantar a carga útil desejada com segurança e eficiência. O peso total de decolagem (*All-Up Weight* - AUW) é a soma do peso de todos os componentes do drone, incluindo a estrutura, os sistemas de propulsão, eletrônica, bateria e, crucialmente, a carga útil. A minimização do AUW, sem comprometer a integridade estrutural ou a funcionalidade, é um objetivo primário no projeto de drones de entrega, pois

impacta diretamente a autonomia e a capacidade de carga (UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY, 2025).

A relação empuxo-peso (*Thrust-to-Weight Ratio* - TWR) é um indicador crítico da performance do drone. Ela representa a proporção entre o empuxo total máximo que os motores podem gerar e o peso total do drone. Um TWR superior a 1 é necessário para que o drone possa decolar, mas para drones de carga, um TWR de 2:1 ou superior é geralmente recomendado. Isso permite que o drone tenha reserva de potência para realizar manobras, lidar com rajadas de vento, subir rapidamente e manter o controle em situações de emergência, além de garantir uma boa capacidade de aceleração e resposta (UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY, 2025). Um TWR muito baixo pode resultar em um drone lento, instável e com dificuldade para transportar cargas, enquanto um TWR excessivamente alto pode indicar um sistema de propulsão superdimensionado, resultando em maior peso e consumo de energia desnecessários.

Diversos fatores influenciam o peso total do drone, incluindo a escolha dos materiais da estrutura, o tamanho e tipo dos motores e hélices, a capacidade da bateria e o peso da carga útil. Cada grama economizada em um componente pode se traduzir em maior autonomia ou maior capacidade de carga útil, destacando a importância de uma engenharia de peso rigorosa em todas as fases do projeto (UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY, 2025).

3.3. Cálculo do Peso Total e Empuxo Necessário (AUW)

Com base nos componentes selecionados e nas estimativas de peso, o AUW inicial do drone foi calculado com base nas informações da Tabela 1. É importante notar que a bateria é um dos componentes mais pesados e sua escolha impacta diretamente o AUW (Peso Total) e, conseqüentemente, o empuxo necessário.

Tabela 1: Estimativa de Pesos dos Componentes do Drone

Componentes	Quantidade	Peso Individual (g)	Peso total
Estrutura (<i>Frame</i>)	1	1000	1000
Motor	4	99	396
ESC	4	45	180
Hélice	4	30	120
Placa Controladora	1	80	80
Modulo Radio	1	60	60
Bateria	1	1250	1250
Outros Componentes	-	-	200
Carga Útil	-	-	1000

Autores (2025)

Para a bateria, inicialmente considerou-se uma 6000mAh 4S LiPo com peso estimado de 600 g. Com essa configuração, o AUW seria:

$$AUW = 1000 + 396 + 180 + 120 + 80 + 60 + 600 + 200 + 1000 = 3636 \text{ g}$$

Empuxo Necessário:

Considerando um AUW de 3.636 kg e um TWR desejado de 2:1, ou seja, o drone deve ter a capacidade de levantar duas vezes o seu próprio peso, o empuxo total necessário para o drone seria:

$$ETN = AUW \times TWR = 3.636 \text{ kg} \times 2 = 7.272 \text{ kg} = 7272 \text{ g}$$

Para um quadricóptero, o empuxo por motor seria:

$$EMN = ETN / \text{Número de Motores} = 7272 \text{ g} / 4 = 1818 \text{ g}$$

No entanto escolhemos a bateria 10000 mAh 4S LiPo que proporcionou um AUW de 4.200 kg, para esse peso o empuxo por motor seria:

$$ETN = 8400 \text{ g}$$

O empuxo por motor seria:

$$ETN = 2100 \text{ g}$$

Apesar do ETN ter ultrapassado ainda está dentro da tolerância necessária para a realização do voo em situações adversas e também levando em conta que um TWR de 2:1 é uma recomendação.

3.4. Análise de Autonomia e Otimização da Bateria

A autonomia de voo é um dos fatores mais críticos para um drone de entregas, pois define a distância que o drone pode percorrer e o tempo que pode permanecer no ar para

cumprir sua missão. Ela é determinada principalmente pela capacidade da bateria, pelo consumo médio de corrente do drone e pela eficiência do sistema de propulsão. A otimização da bateria visa maximizar o tempo de voo sem comprometer excessivamente a capacidade de carga ou o peso total do drone, buscando um equilíbrio entre esses parâmetros.

As baterias de Polímero de Lítio (LiPo) são a escolha predominante para drones devido à sua alta densidade de energia, ou seja, a capacidade de armazenar uma grande quantidade de energia em relação ao seu peso, e sua habilidade de fornecer altas correntes de descarga. As especificações de uma bateria LiPo incluem a tensão (indicada pelo número de células em série, e.g., 4S = 14.8V, 6S = 22.2V), a capacidade em mAh e a taxa de descarga (C-rating) (RC GROUPS, 2025).

O C-rating indica a taxa máxima segura na qual a bateria pode ser descarregada. Uma bateria com 10000mAh e 20C, por exemplo, pode fornecer uma corrente contínua de 200A (10Ah * 20C). É crucial que o C-rating da bateria seja adequado para a demanda de corrente máxima do drone, para evitar danos à bateria e garantir um fornecimento de energia estável durante o voo (RC GROUPS, 2025).

A escolha da tensão da bateria (4S, 6S, etc.) também é fundamental. Baterias com maior tensão (maior número de células) tendem a ser mais pesadas, mas permitem que os motores operem com menor corrente para a mesma potência, o que pode resultar em maior eficiência e menor aquecimento dos componentes, prolongando a vida útil do sistema e, potencialmente, aumentando a autonomia (OMNI CALCULATOR, 2025). No entanto, o aumento do peso da bateria também eleva o AUW, o que, por sua vez, demanda mais empuxo e pode reduzir a autonomia se o ganho de eficiência não compensar o peso adicional.

3.5. Cálculo do Consumo Médio de Corrente (AAD)

O consumo médio de corrente (*Average Amp Draw* - AAD) é um parâmetro essencial para estimar a autonomia de voo. Ele representa a corrente média que o drone consome durante um voo estável. O AAD pode ser calculado com base no AUW, na potência necessária para levantar 1 kg e na tensão da bateria (OMNI CALCULATOR, 2025). A potência necessária para levantar 1 kg varia dependendo da eficiência do sistema de propulsão (motores, hélices), mas um valor conservador e amplamente utilizado para estimativas é de 170 W/kg para drones multirotores (OMNI CALCULATOR, 2025).

O cálculo do AAD é crucial porque ele permite prever o tempo de voo com base na capacidade da bateria. Um AAD menor, para uma dada capacidade de bateria, resultará em maior autonomia. O cálculo para o AAD é:

$$\text{AAD (A)} = (\text{AUW (kg)} \times \text{Potência/kg (W/kg)}) / \text{Tensão da Bateria (V)}$$

É importante ressaltar que este é um valor médio e o consumo real pode variar significativamente durante o voo devido a manobras, rajadas de vento, e variações na carga útil. Portanto, as estimativas de autonomia devem sempre incluir uma margem de segurança (OMNI CALCULATOR, 2025).

- **Com Bateria 4S (14.8V):**

Considerando o AUW de 3.636 kg e uma bateria 4S (14.8V):

$$\begin{aligned} \text{AAD} &= (\text{AUW} \times \text{Potência/kg}) / \text{Tensão da Bateria} \\ &= (3.636 \text{ kg} \times 170 \text{ W/kg}) / 14.8 \text{ V} = 41.76 \text{ A} \end{aligned}$$

- **Com Bateria 6S (22.2V):**

Ao mudar para uma bateria 6S (22.2V), o AUW do drone aumenta devido ao maior peso da bateria. Para uma bateria 6S de 6000mAh, o peso estimado é de 880 g. O novo AUW seria:

$$\begin{aligned} \text{AUW (com 6S 6000mAh)} \\ &= 1000 + 396 + 180 + 120 + 80 + 60 + 880 + 200 + 1000 \\ &= 3916 \text{ g (3.916 kg)} \end{aligned}$$

- **Com este novo AUW e uma bateria 6S (22.2V):**

$$\text{AAD} = (3.916 \text{ Kg} \times 170 \text{ W/Kg}) / 22.2 \text{ V} = 29.99 \text{ A}$$

É evidente que o uso de uma bateria de maior tensão (6S) resulta em um AAD menor, o que é um indicativo de maior eficiência e potencial para maior autonomia, mesmo com um aumento no peso da bateria.

3.5.1. Cálculo da Autonomia de Voo

A autonomia de voo é calculada utilizando a capacidade da bateria, a porcentagem de descarga segura (geralmente 80% para LiPo) e o AAD (OMNI CALCULATOR, 2025).

- **Com Bateria 6000mAh 4S (14.8V)**

Capacidade da bateria: 6000 mAh = 6 Ah.

Porcentagem de descarga segura: 80% (0.8).

AAD: 41.76 A.

$$\begin{aligned}\text{Autonomia (horas)} &= (\text{Capacidade da Bateria} \times \text{Descarga Segura}) / \text{AAD} \\ &= (6 \text{ Ah} \times 0.8) / 41.76 \text{ A} = 0.1149 \text{ horas}\end{aligned}$$

$$\text{Autonomia (minutos)} = 0.1149 \times 60 = 6.9 \text{ min}$$

- **Com Bateria 6000mAh 6S (22.2V)**

Capacidade da bateria: 6000 mAh = 6 Ah

Porcentagem de descarga segura: 80% (0.8)

AAD: 29.99 A

$$\text{Autonomia (horas)} = (6 \text{ Ah} \times 0.8) / 29.99 \text{ A} = 0.1600 \text{ horas}$$

$$\text{Autonomia (minutos)} = 0.1600 \times 60 = 9.6 \text{ min}$$

- **Com Bateria 8000mAh 6S (22.2V)**

Capacidade da bateria: 8000 mAh = 8 Ah

Porcentagem de descarga segura: 80% (0.8)

AAD: 31.29 A

Para aumentar ainda mais a autonomia, considerou-se uma bateria 6S de maior capacidade, 8000mAh. O peso estimado para esta bateria é de 1050 g. O novo AUW seria:

AUW (com 6S 8000mAh)

$$= 1000 + 396 + 180 + 120 + 80 + 60 + 1050 + 200 + 1000$$

$$= 4086 \text{ g}$$

$$\text{AAD} = (4.0886 \text{ Kg} \times 170 \text{ W/kg}) / 22.2 \text{ V} = 31.29 \text{ A}$$

$$\text{Autonomia (horas)} = (8 \text{ Ah} \times 0.8) / 31.29 \text{ A} = 0.2045 \text{ horas}$$

$$\text{Autonomia (minutos)} = 0.2045 \times 60 = 12.27 \text{ min}$$

Com a bateria de 8000mAh 6S, a autonomia aumentou para 12.27 minutos, o que representa uma melhoria significativa, mas ainda pode ser otimizado.

- **Com Bateria 10000mAh 6S (22.2V)**

Capacidade da bateria: 10000 mAh = 10 Ah

Porcentagem de descarga segura: 80% (0.8)

AAD: 32.82 A

Para atingir uma autonomia mais adequada para entregas, a próxima opção é uma bateria 6S de 10000mAh. O peso estimado para esta bateria é de 1250 g. O novo AUW seria:

AUW (com 6S 10000mAh)

$$= 1000 + 396 + 180 + 120 + 80 + 60 + 1250 + 200 + 1000$$

$$= 4286 \text{ g}$$

$$\text{AAD} = (4.286 \text{ Kg} \times 170 \text{ W/kg}) / 22.2 \text{ V} = 31.82 \text{ A}$$

$$\text{Autonomia (horas)} = (10 \text{ Ah} \times 0.8) / 32.82 \text{ A} = 0.2437 \text{ horas}$$

$$\text{Autonomia (minutos)} = 0.2437 \times 60 = 14.63 \text{ min}$$

Com a bateria de 10000mAh 6S, a autonomia atinge 14.63 minutos. Esta é uma autonomia mais razoável para um drone de entregas, considerando que o tempo de voo real pode ser ligeiramente menor devido a manobras e condições climáticas. É importante notar que, para voos de entrega, a autonomia deve ser suficiente para a ida e volta, além de uma margem de segurança. Abaixo está a Tabela 2 com os Resultados dos cálculos anteriores.

Tabela 2: Comparativo de Autonomia com Diferentes Baterias

Bateria	Modelo Bateria	Peso (g)	AUW (kg)	AAD (A)	Autonomia (min)
Original	4S 6000 mAh	600	3.636	41.76	6.90
Otimizada 1	6S 6000 mAh	880	3.916	29.99	9.60
Otimizada 2	6S 8000 mAh	1050	4.086	31.29	12.27
Otimizada 3 (Proposta)	6S 10000 mAh	1250	4.286	32.82	14.63

Autores (2025)

3.5.2. Análise e Otimização da Bateria

Devido à baixa autonomia inicial com a bateria 4S 6000mAh, esta fase focou na otimização do sistema de energia. Foram exploradas diferentes configurações de bateria, com a transição para baterias 6S de maior capacidade (6000mAh, 8000mAh e 10000mAh). Os cálculos de autonomia foram refeitos para cada configuração, resultando na escolha da bateria 6S 10000mAh apesar de um pouco mais pesada ela é a opção que oferece o melhor equilíbrio entre autonomia e peso.

3.5.3. Motores

A partir dos resultados dados pelos cálculos anteriormente, optou-se por um motor robusto, o MAD 3508 IPE 360KV. Este motor é projetado para aplicações de carga pesada e oferece um empuxo máximo por eixo de 1800 g, o que se alinha melhor com as necessidades do drone de entregas. A escolha de um motor com KV de 360 é ideal para hélices de grande diâmetro (13-16 polegadas), permitindo que o motor opere em rotações mais baixas com maior torque, o que é benéfico para a eficiência em voo de cruzeiro e para o transporte de cargas (MAD COMPONENTS, 2025). A Figura 8 ilustra o motor MAD 3508 IPE 360KV, e suas especificações detalhadas são apresentadas na Tabela 3.

Figura 8: Motor MAD 3508 IPE 360KV

Fonte: MAD Components (2025a)

Tabela 3: Especificações do Motor MAD 3508 IPE 360KV

Característica	Valor
Modelo	MAD 3508 IPE 360KV
KV (RPM/V)	360
Peso (por motor)	99 g
Empuxo Máximo (por eixo)	1800 g
Hélices Compatíveis	13-16 polegadas
Tensão de Operação	4S - 6S LiPo

Fonte: MAD Components (2025a)

3.5.4. Controladores Eletrônicos de Velocidade (ESCs)

Os Controladores Eletrônicos de Velocidade (ESCs) são componentes vitais em drones, atuando como a interface entre a controladora de voo e os motores brushless. Sua principal função é converter a corrente contínua (DC) da bateria em corrente alternada (AC) trifásica, que é então utilizada para controlar a velocidade e a direção de rotação dos motores. A modulação por largura de pulso (PWM) é a técnica mais comum utilizada pelos ESCs para variar a velocidade dos motores, permitindo um controle preciso do empuxo gerado (FPV KNOW-IT-ALL, 2025).

A seleção do ESC é crítica e deve ser baseada em diversos fatores, incluindo a corrente máxima que o motor pode consumir, a tensão de operação da bateria e a frequência de atualização do sinal de controle. É fundamental que o ESC seja capaz de suportar a

corrente contínua e de pico exigida pelos motores para evitar superaquecimento e falhas, que poderiam levar à perda de controle do drone. Uma margem de segurança de 20-30% acima da corrente máxima esperada é geralmente recomendada (DRONE LIFE, 2020).

Para o motor MAD 3508 IPE 360KV, que pode operar com baterias de 4S a 6S, um ESC de 60A é uma escolha altamente adequada e recomendada. Esta especificação superior oferece uma margem de segurança substancialmente maior para lidar com picos de corrente durante manobras agressivas, acelerações rápidas ou sob carga máxima, especialmente quando operando com baterias de maior voltagem (6S), onde o motor pode demandar mais corrente para entregar o mesmo nível de potência ou empuxo. A escolha de um ESC de 60A garante que o componente não superaqueça ou falhe, prolongando sua vida útil e a confiabilidade do sistema de propulsão (HOBBYWING, 2025). Além disso, muitos ESCs modernos incorporam um BEC (Battery Eliminator Circuit), que fornece uma tensão regulada (geralmente 5V ou 12V) para alimentar a controladora de voo e outros componentes eletrônicos sensíveis, eliminando a necessidade de um regulador de tensão separado (DRONE LIFE, 2020). A Figura 9 apresenta um exemplo de ESC 60A Brushless, e suas especificações são detalhadas na Tabela 4.

Figura 9: ESC 60A Brushless.



Tabela 4: Especificações do ESC 60A XRotor

Característica	Valor
Corrente Contínua	60A
Corrente de Pico	80A (15 segundos)
Tensão de Operação	4S - 6S LiPo
BEC	-
Peso	~45 g

Fonte: MAD Components (2025b)

3.5.5. Hélices

Para o motor MAD 3508 IPE 360KV, hélices de 13 a 16 polegadas são recomendadas. Uma hélice de 16 polegadas com um passo adequado (e.g., 16x5.5) é uma boa opção para maximizar o empuxo em baixas rotações, o que é ideal para drones de entrega que precisam levantar cargas pesadas e manter um voo estável (AMAZON.COM, 2025). A hélice identificada como 16x5.5 possui dois parâmetros principais: o primeiro número, 16, indica o diâmetro da hélice, que é de 16 polegadas, ou seja, a distância de ponta a ponta quando ela gira e forma um círculo. O segundo número, 5.5 polegadas, representa o passo da hélice, que é a distância teórica que ela avançaria em uma rotação completa de 360 graus, caso não houvesse resistência do ar. Em termos práticos, um **passo maior** proporciona **maior velocidade final**, enquanto um **passo menor** oferece **mais torque e eficiência** para o levantamento de **cargas pesadas**. A Figura 10 ilustra um exemplo de hélice de fibra de carbono, e suas especificações são apresentadas na Tabela 5.

Figura 10: Hélice de Fibra de Carbono.

Fonte: Amazon.com (2025a)

Tabela 5: Especificações da Hélice (Exemplo)

Característica	Valor
Tipo	Fibra de Carbono
Diâmetro	16 polegadas
Passo	5.5 polegadas
Peso (por hélice)	~30 g

Fonte: Amazon.com (2025a)

3.5.6. Controladora de Voo

A Pixhawk PX4 2.4.8 é uma controladora de voo de código aberto amplamente utilizada em projetos de drones, conhecida por sua robustez, flexibilidade e capacidade de suportar diversas configurações de aeronaves. Ela se destaca por sua arquitetura de hardware e *software* de alto desempenho, que permite a execução de algoritmos de controle complexos e a integração com sistemas de navegação avançados. A plataforma PX4, em particular, é um sistema operacional de código aberto para drones que oferece um conjunto completo de funcionalidades para voo autônomo, incluindo planejamento de missão, navegação por pontos de passagem, e detecção e prevenção de obstáculos (AMAZON.COM, 2025).

Para um drone de entregas, a escolha da Pixhawk PX4 2.4.8 é estratégica devido à sua capacidade de oferecer recursos avançados como GPS, telemetria, modos de voo autônomos e compatibilidade com o *software* ArduPilot ou PX4. Esses recursos são fundamentais para garantir uma navegação precisa, operações automatizadas e a segurança das entregas, especialmente em ambientes complexos. A capacidade de programar missões autônomas permite que o drone siga rotas pré-definidas, otimizando a eficiência e reduzindo a necessidade de intervenção humana (AMAZON.COM, 2025). A Figura 11 apresenta a controladora de voo Pixhawk PX4 2.4.8, e suas especificações são detalhadas na Tabela 6.

a segurança e o sucesso das missões, especialmente em drones de entrega que podem operar em ambientes complexos e a distâncias consideráveis.

O SIYI FM30 é um sistema de rádio de longo alcance que opera na frequência de 2.4 GHz, uma banda amplamente utilizada para comunicação sem fio devido à sua boa penetração em ambientes com obstáculos e relativa imunidade a interferências. Este módulo se destaca por oferecer alta confiabilidade e baixa latência, características indispensáveis para o controle preciso de um drone de entregas. A baixa latência garante que os comandos do operador sejam executados quase instantaneamente, o que é vital para manobras rápidas e correções de rota (WORLD DRONE MARKET, 2025).

Além do controle, o SIYI FM30 é compatível com diversas controladoras de voo e possui recursos avançados como telemetria bidirecional. A telemetria permite que o operador monitore o status do drone em tempo real, recebendo informações cruciais como altitude, velocidade, tensão da bateria, consumo de corrente, e status dos motores. Essa capacidade de feedback em tempo real é fundamental para a tomada de decisões e para a segurança da operação, permitindo que o piloto intervenha em caso de anomalias (GETFPV, 2025a). A redundância de sinal, outra característica importante, aumenta a segurança da operação, minimizando a chance de perda de comunicação em ambientes com interferência.

Para um drone de entregas, a capacidade de comunicação robusta e de longo alcance é fundamental para garantir o controle em áreas urbanas ou rurais, onde a linha de visão pode ser obstruída e a interferência eletromagnética pode ser maior. A capacidade de operar além da linha de visão (BVLOS), embora sujeita a regulamentações específicas, é um objetivo a longo prazo para muitos serviços de entrega por drones, e sistemas de rádio como o SIYI FM30 são um passo importante nessa direção (WORLD DRONE MARKET, 2025). A Figura 12 ilustra o módulo de rádio SIYI FM30, e suas especificações são apresentadas na Tabela 7.

Figura 12: Módulo de Rádio SIYI FM30



Fonte: World Drone Market (2025)

Tabela 7: Especificações do Módulo de Rádio SIYI FM30

Característica	Valor
Frequência	2.4 GHz
Alcance	Longo Alcance
Canais	16 canais
Telemetria	Bidirecional
Peso	~60 g

Fonte: World Drone Market (2025)

3.5.8. Outros Componentes

Além dos componentes principais já detalhados, o drone de entregas incorpora uma série de outros elementos essenciais para sua funcionalidade, segurança e integração. A atenção a esses componentes, muitas vezes subestimados, é crucial para o desempenho geral e a confiabilidade da aeronave. Estes incluem fiação, conectores, trem de pouso, sistema de distribuição de energia (PDB), LEDs de navegação, e outros fixadores e suportes.

A fiação e os conectores são responsáveis por estabelecer as conexões elétricas entre todos os componentes do drone. A escolha de fios com bitola adequada para a corrente que irão transportar, e conectores de alta qualidade que garantam uma conexão segura e de baixa

resistência, é fundamental para evitar perdas de energia, superaquecimento e falhas elétricas. Conectores como XT60 ou XT90 serão utilizados para a bateria, enquanto conectores menores são empregados para sinais de controle e telemetria

O trem de pouso é um componente mecânico que suporta o drone durante o pouso e a decolagem, além de proteger os componentes eletrônicos e a carga útil de impactos. Para um drone de entregas, o design do trem de pouso deve considerar a absorção de energia de impactos, a estabilidade em diferentes superfícies e a altura necessária para manter as hélices e a carga afastadas do solo. Materiais leves e resistentes, como fibra de carbono ou ligas de alumínio, são preferíveis para minimizar o peso (DRONE U, 2025).

O Sistema de Distribuição de Energia (PDB - *Power Distribution Board*) é uma placa que centraliza a conexão da bateria e distribui a energia para os ESCs e outros componentes. Um PDB bem projetado minimiza a complexidade da fiação, reduz o peso e garante uma distribuição de energia eficiente e segura. Muitos PDBs modernos também integram reguladores de tensão (BECs) para fornecer tensões específicas (e.g., 5V para a controladora de voo, 12V para câmeras ou outros acessórios) (LIANG, 2025).

LEDs de navegação são importantes para a visibilidade do drone, especialmente em operações noturnas ou em condições de baixa luminosidade, contribuindo para a segurança do voo e a conformidade com regulamentações aéreas. Além disso, fixadores e suportes (parafusos, espaçadores, abraçadeiras) são essenciais para a montagem segura de todos os componentes. A escolha de materiais leves e resistentes para esses itens, como parafusos de alumínio ou nylon, pode contribuir para a redução do peso total do drone.

Todos esses componentes, embora individualmente leves, contribuem para o peso total do drone e devem ser selecionados com foco na durabilidade e na minimização de peso. Uma estimativa de 200 g foi alocada para esses itens, considerando materiais leves e design otimizado, mas a otimização contínua desses elementos pode levar a ganhos marginais, porém importantes, na autonomia e capacidade de carga.

3.5.9. Considerações sobre a Otimização da Bateria

A transição de uma bateria 4S para 6S, e o aumento da capacidade para 10000mAh, demonstram um ganho significativo na autonomia. Embora o peso da bateria aumente, a maior tensão resulta em menor corrente para a mesma potência, o que reduz as perdas por efeito Joule e melhora a eficiência geral do sistema. A escolha da bateria de 10000mAh 6S é um equilíbrio entre peso, capacidade e autonomia, visando atender aos requisitos de um drone de entregas. Para missões mais longas, baterias de maior capacidade ou densidade

energética (como Li-Ion) poderiam ser consideradas, mas com um custo e complexidade adicionais.

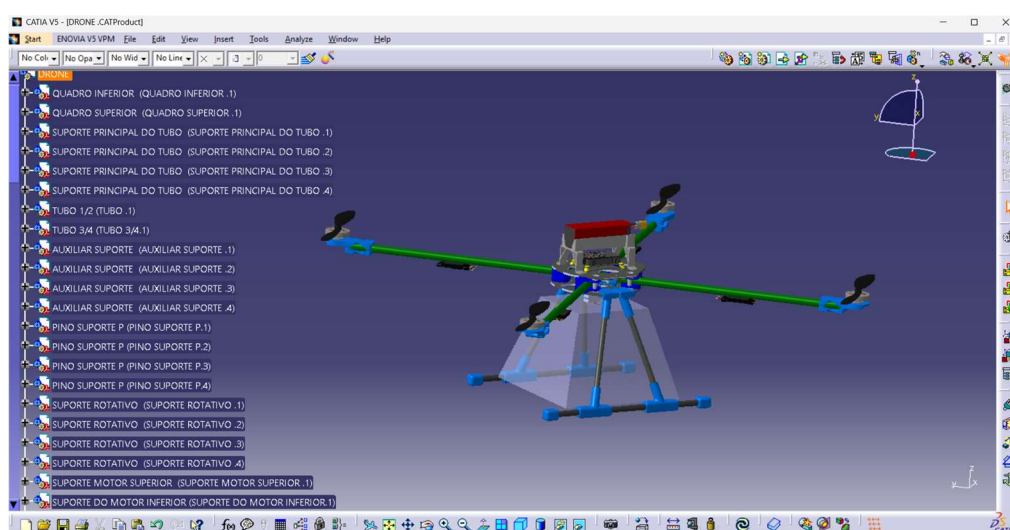
3.6. Projeto Mecânico e Estrutural

O projeto mecânico e estrutural do drone é crucial para garantir a integridade, estabilidade e segurança da aeronave, especialmente ao transportar cargas. Esta seção aborda os princípios de design do frame, a seleção de materiais e as considerações para o trem de pouso e o compartimento de carga útil, elementos fundamentais para a funcionalidade e durabilidade do drone de entregas

3.6.1. Programa Utilizado para modelagem 3D e detalhamento

Para assegurar maior precisão e eficiência no desenvolvimento do projeto, a modelagem tridimensional de todos os componentes foi realizada no *software* Catia V5, ferramenta amplamente utilizada na indústria aeronáutica para simulações, análises e otimização estrutural. Isso possibilitou a criação de um modelo detalhado, no qual foi possível verificar a integração entre os diferentes sistemas, analisar o comportamento estrutural e ajustar dimensões e geometrias de acordo com os requisitos do projeto. Como mostrar a Figura 13.

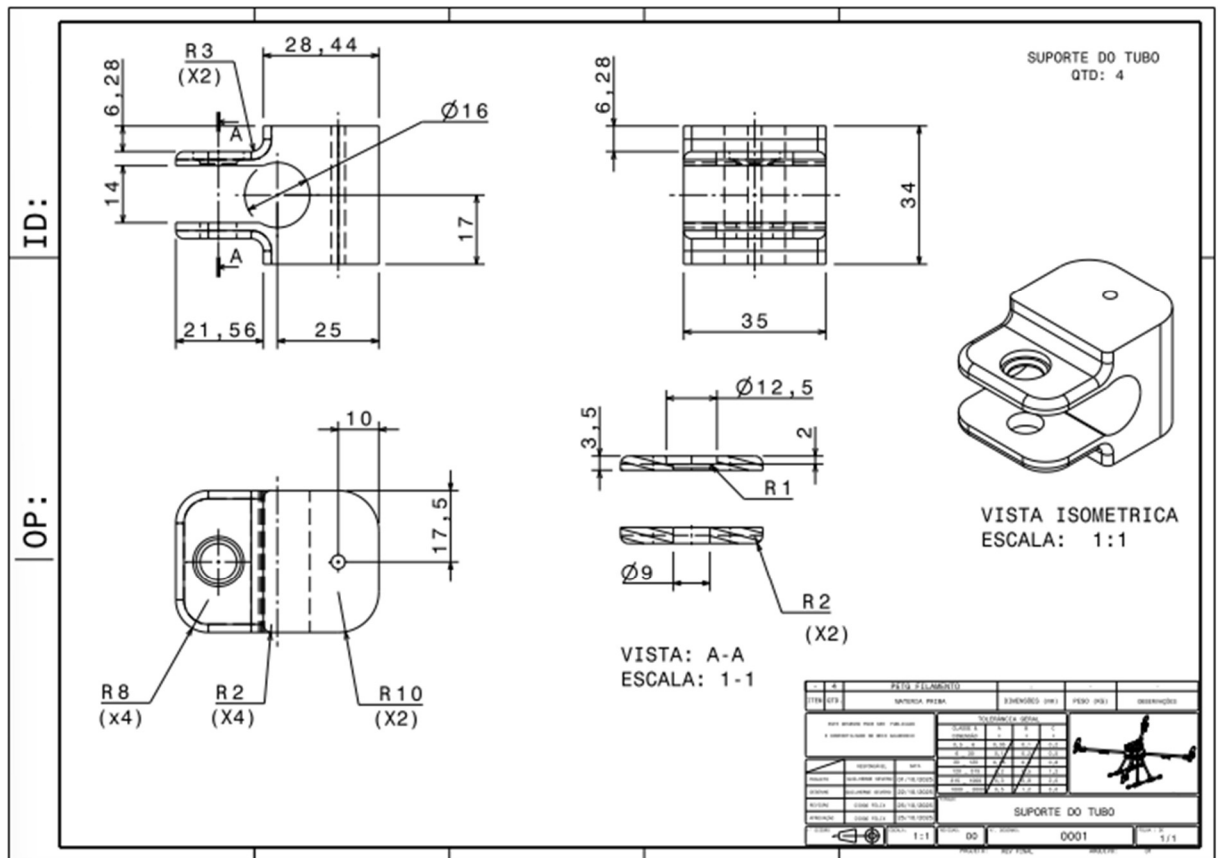
Figura 13: Modelagem 3D no *software* Catia V5



Fonte: Autores (2025)

Também foi realizado nessa etapa o detalhamento 2D das peças do drone no *software* Catia V5 como mostra a Figura 14.

Figura 14: Detalhamento 2D no *software* Catia V5 do Suporte do Tubo



Fonte: Autores (2025)

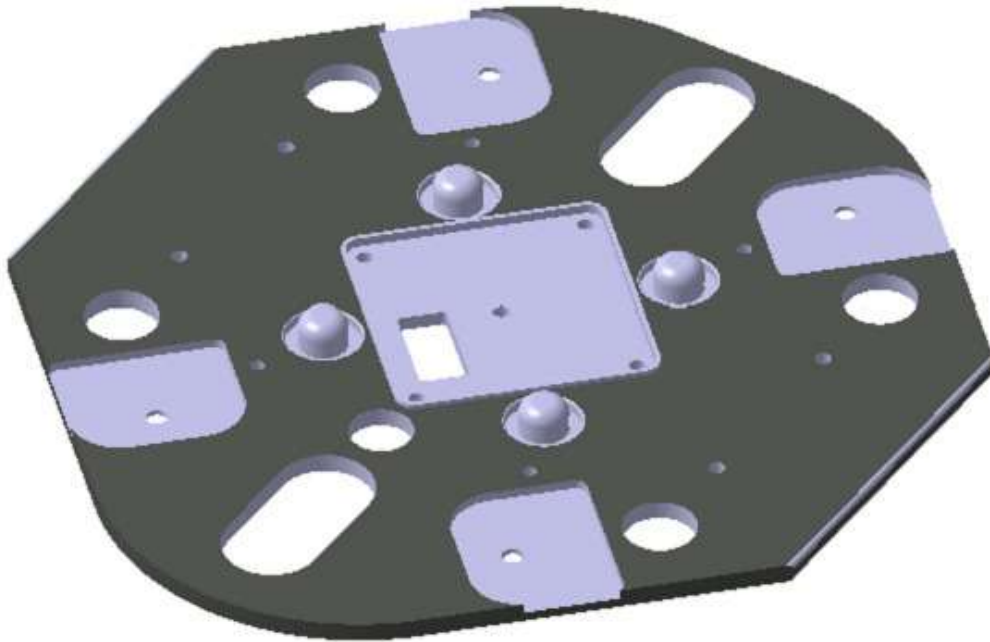
3.6.2. Estrutura (*Frame*)

A estrutura, ou *frame*, é a espinha dorsal do drone, a Figura 15 mostra a base do drone modelada, fornecendo a base para a montagem de todos os componentes e suportando as forças geradas durante o voo e o pouso. Para um drone de entregas, o design do frame deve equilibrar leveza, rigidez e resistência.

A escolha do material é um dos aspectos mais importantes no design do frame. Os materiais escolhidos como fibra de carbono, alumínio e Manufatura aditiva.

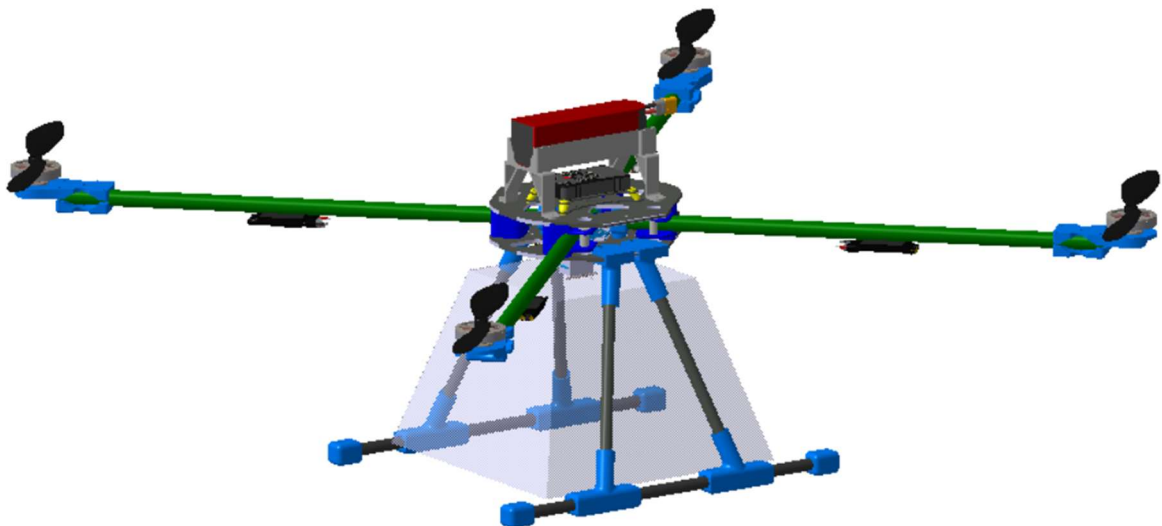
A estrutura do drone de entregas será baseada em um design de quadricóptero, que oferece boa estabilidade e manobrabilidade. A configuração em 'X' é comum, proporcionando uma boa distribuição de peso e visibilidade para câmeras e outros componentes demonstrados na Figura 16.

Figura 15: Modelagem 3D no *software* Catia V5 da Base do Drone



Fonte: Autores (2025)

Figura 16: Modelagem 3D Frame com componentes eletrônicos



Autores (2025)

3.6.3. Trem de Pouso

O trem de pouso foi projetado para permitir o encaixe de uma caixa padronizada, fabricada em material reutilizável, como o papelão. Essa caixa será utilizada para acondicionar as encomendas durante o transporte e, após a entrega, poderá ser descartada de forma adequada pelo cliente. Para a fabricação do trem de pouso, será empregado um material resistente e leve, garantindo praticidade no acoplamento da caixa e segurança no processo de entrega.

3.6.4. Compartimento de Carga Útil

O compartimento de carga útil é um dos elementos mais importantes no projeto do drone de entregas, pois é responsável por garantir que o item a ser transportado seja armazenado com segurança durante o voo e liberado de forma controlada no destino.

Para isso, foi desenvolvida uma caixa padronizada, fabricada em material reutilizável e de baixo custo, como o papelão, que além de proteger a encomenda, permite que o cliente realize o descarte adequado em local apropriado, contribuindo para a sustentabilidade do sistema de entregas.

3.7. Algoritmos de Controle

A controladora de voo utiliza algoritmos de controle sofisticados para manter a estabilidade do drone e seguir as trajetórias desejadas. O algoritmo mais fundamental e amplamente utilizado é o PID (Proporcional-Integral-Derivativo). O controlador PID atua em três componentes para corrigir erros entre o estado desejado (setpoint) e o estado atual do drone (medido pelos sensores) (MATHWORKS, 2025):

Proporcional (P): Responde ao erro atual. Quanto maior o erro, maior a correção. Ajuda a reduzir o erro rapidamente.

Integral (I): Responde ao erro acumulado ao longo do tempo. Ajuda a eliminar erros de estado estacionário (offset) e a manter o drone na posição desejada.

Derivativo (D): Responde à taxa de variação do erro. Ajuda a amortecer oscilações e a prever erros futuros, melhorando a estabilidade e a resposta dinâmica.

3.7.1. Bateria

A bateria LiPo (Polímero de Lítio) de 10000mAh 6S (22.2V) é a fonte de energia principal do drone. As baterias LiPo são a tecnologia de bateria mais comum em drones devido à sua alta densidade de energia, que permite armazenar uma grande quantidade de

energia em um volume e peso relativamente pequenos, e sua capacidade de fornecer altas correntes de descarga necessárias para os motores. A designação “6S” indica que a bateria é composta por seis células de lítio conectadas em série, resultando em uma tensão nominal de 22.2V (cada célula LiPo tem uma tensão nominal de 3.7V). A capacidade de 10000mAh (miliampere-hora) determina a quantidade de carga elétrica que a bateria pode armazenar e, consequentemente, por quanto tempo ela pode fornecer energia ao drone (RC GROUPS, 2025).

Além da tensão e capacidade, o C-rating é uma especificação crucial para baterias LiPo. Ele representa a taxa máxima segura na qual a bateria pode ser descarregada continuamente sem sofrer danos. Por exemplo, uma bateria de 10000mAh com um C-rating de 20C pode fornecer uma corrente contínua de 200 Amperes ($10 \text{ Ah} * 20 \text{ C}$). É fundamental que o C-rating da bateria seja adequado para a demanda de corrente máxima do drone, especialmente durante picos de aceleração ou manobras intensas, para evitar quedas de tensão excessivas, superaquecimento da bateria e, em casos extremos, falha da bateria (RC GROUPS, 2025).

O monitoramento da tensão da bateria durante o voo é de suma importância. As baterias LiPo não devem ser descarregadas abaixo de 3.0V por célula (idealmente não abaixo de 3.5V por célula em voo), pois a descarga excessiva pode causar danos irreversíveis à química interna da bateria, reduzindo sua vida útil e capacidade. Sistemas de gerenciamento de bateria (BMS) ou alarmes de baixa tensão são frequentemente utilizados para alertar o operador ou acionar o retorno automático do drone antes que a bateria atinja níveis críticos de descarga (RC GROUPS, 2025).

A escolha da bateria de 10000mAh 6S (22.2V) para este projeto foi resultado de uma análise de otimização que buscou o melhor equilíbrio entre capacidade, peso e autonomia, conforme detalhado na Seção 3.4. Esta configuração oferece uma autonomia razoável para missões de entrega, ao mesmo tempo em que mantém o peso total do drone dentro de limites operacionais aceitáveis. A Figura 17 ilustra um exemplo de bateria LiPo 6S de alta capacidade.

Figura 17: Bateria LiPo 6S 10000mAh



Fonte: Rc Groups (2025)

3.8. Sistema de Navegação e Comunicação

O sistema de navegação e comunicação permite que o drone opere de forma autônoma e seja controlado remotamente, além de transmitir dados importantes para o operador.

3.8.1. GPS

O módulo GPS GNSS com tecnologia RTK (*Real-Time Kinematic*) foi selecionado para o sistema de navegação do drone de entrega mostrado na Figura 18. Esse tipo de módulo combina múltiplos sistemas de satélite — GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou — proporcionando posicionamento de alta precisão, essencial para operações autônomas e seguras.

A escolha se justifica pela necessidade de precisão centimétrica, fundamental para pousos e entregas exatas, otimização de rotas e evitação de obstáculos em ambientes urbanos, onde interferências de sinal (“canyon urbano”) são comuns. Além disso, o suporte ao modo RTK reduz significativamente erros de posicionamento em tempo real, aumentando a confiabilidade do sistema de navegação (DRONEDEPLOY, 2025).

Figura 18: Módulo GPS para Drones



Fonte: Unmanned Systems Technology (2025)

3.9. Conexões elétricas do Drone

As conexões dos componentes elétricos do drone foram dimensionadas para resistir as correntes de pico que se encontram no momento de voo no qual o drone pode necessitar de sua potência máxima para operar em alguma situação em específico, se não forem dimensionadas de forma correta pode ocorrer um sobre aquecimento no sistema. As conexões devem também ser interligadas de forma correta, como demonstrado na Figura 7, para se obter um êxito no momento de funcionamento do drone e calibração da placa controladora.

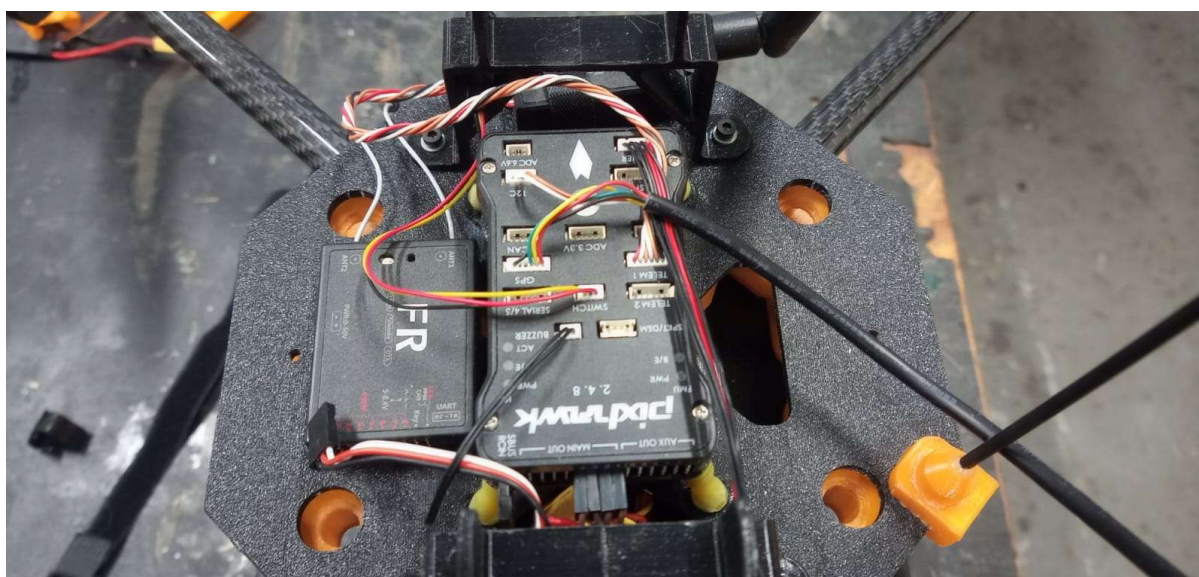
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento do projeto do drone de entregas, com uma análise crítica que compara os achados com as expectativas iniciais e a fundamentação teórica. A validação da parte elétrica, a montagem bem-sucedida e a otimização de componentes são pontos centrais desta discussão.

4.1. Manufatura, Montagem e Validação Elétrica

A montagem física do drone foi concluída com sucesso, resultando em uma estrutura robusta e funcional, conforme o projeto mecânico detalhado na Seção 3.6. A integração dos componentes eletrônicos, incluindo motores, ESCs, controladora de voo e módulo de rádio, foi realizada seguindo as especificações e diretrizes de montagem como mostra a Figura 19. A validação da parte elétrica, um marco crucial no desenvolvimento, confirmou a correta interconexão e funcionamento dos sistemas de propulsão e controle.

Figura 19: Conexão dos componentes eletrônicos na placa controladora



Fonte: Autores (2025)

4.1.1. Manufatura dos Componentes do Drone

A Manufatura foi realizada por meio do processo de Manufatura aditiva o que barateia no custo final, também a escolha do material é um dos aspectos mais importantes

no design e robustez. Os materiais escolhidos foram fibra de carbono para os braços, alumínio para o trem de pouso e PET G na Manufatura aditiva como mostra a Figura 20.

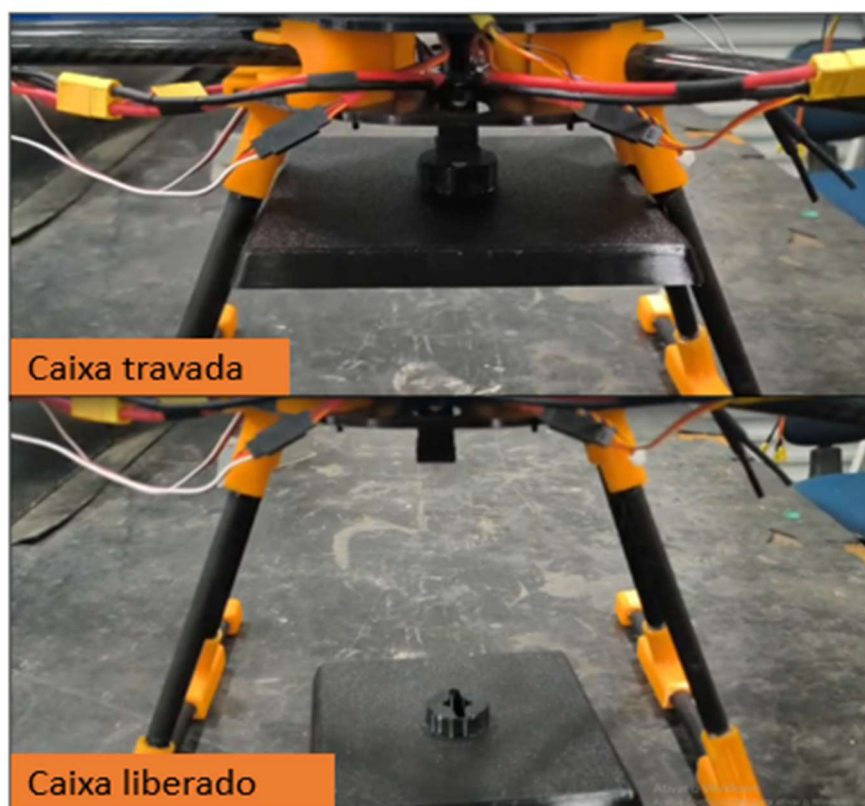
Figura 20: Manufatura aditiva do Suporte do motor e Quadro principal



Fonte: Autores (2025)

O mecanismo de liberação da carga foi projetado e fabricado para ser simples, como mostrado na Figura 21, confiável e de fácil manutenção. Ele funciona por meio de uma garra acoplada ao compartimento, que é controlada por um servo motor. Esse servo, quando acionado remotamente pelo operador, abre a garra e libera a caixa de maneira precisa após o pouso do drone, evitando quedas bruscas e garantindo que a entrega ocorra de forma segura.

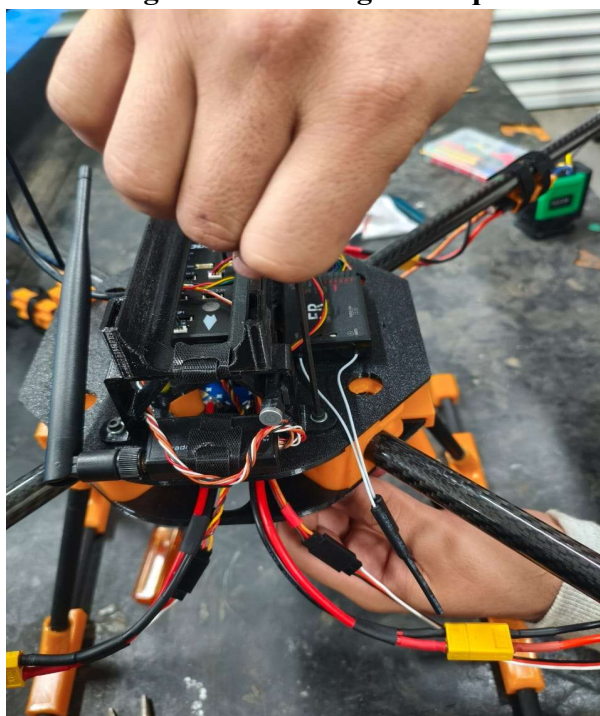
Figura 21: Sistema de liberação da caixa para carga útil mostrando duas etapas, a caixa travada e a caixa liberada



Autores (2025)

4.1.2. Montagem do quadro

A montagem do quadro do drone foi realizada com sucesso, demonstrando boa precisão no alinhamento e na fixação dos componentes estruturais mostrado na Figura 22. Durante o processo, foi necessário realizar alguns ajustes finos para garantir o encaixe adequado das peças, especialmente nas junções entre braços e suportes, assegurando a rigidez e o equilíbrio da estrutura. Esses ajustes, no entanto, foram mínimos e não comprometeram o desempenho nem o resultado final esperado, mantendo a conformidade com os objetivos definidos na etapa de projeto conceitual.

Figura 22: Montagem do quadro

Autores (2025)

4.1.2. Instalação do sistema eletrônico

Na instalação do sistema elétrico a partir do esquema elétrico confeccionado anteriormente mostrado na Figura 07, interligando os componentes eletrônicos na placa controladora, como mostra a Figura 22, e a conexão dos ESC's nos motores que aparecem na Figura 23 para que ela se comunique com o rádio controlador e o *software mission planer* para programação da placa controladora. Na segunda etapa do processo sem configurar a placa foi feito o teste para ver se teria conexão com o rádio, ligando o rádio e alimentando o drone com a bateria, após um sinal sonoro emitido pela placa foi feito o teste dos motores empurrando para cima a alavanca esquerda, a confirmação da conexão se dá com os motores girando, após isso configuramos a placa no *software mission planer*. Infelizmente a não foi possível voar pois os ESC's estavam apresentando problemas na hora de emparelhamento com a placa (os motores estavam girando em velocidades diferente mesmo após a calibração da placa), foi realizada a compra de novos ESC's, e no momento estamos aguardando para realização de um teste de voo.

Figura 22: Interligando os componentes eletrônicos PPM e ESC



Autores (2025)

Figura 23: Montagem da conexão entre ESC e Motor



Autores (2025)

4.2. Otimização de Componentes e Desempenho

4.2.1. Sistema de Propulsão e Energia

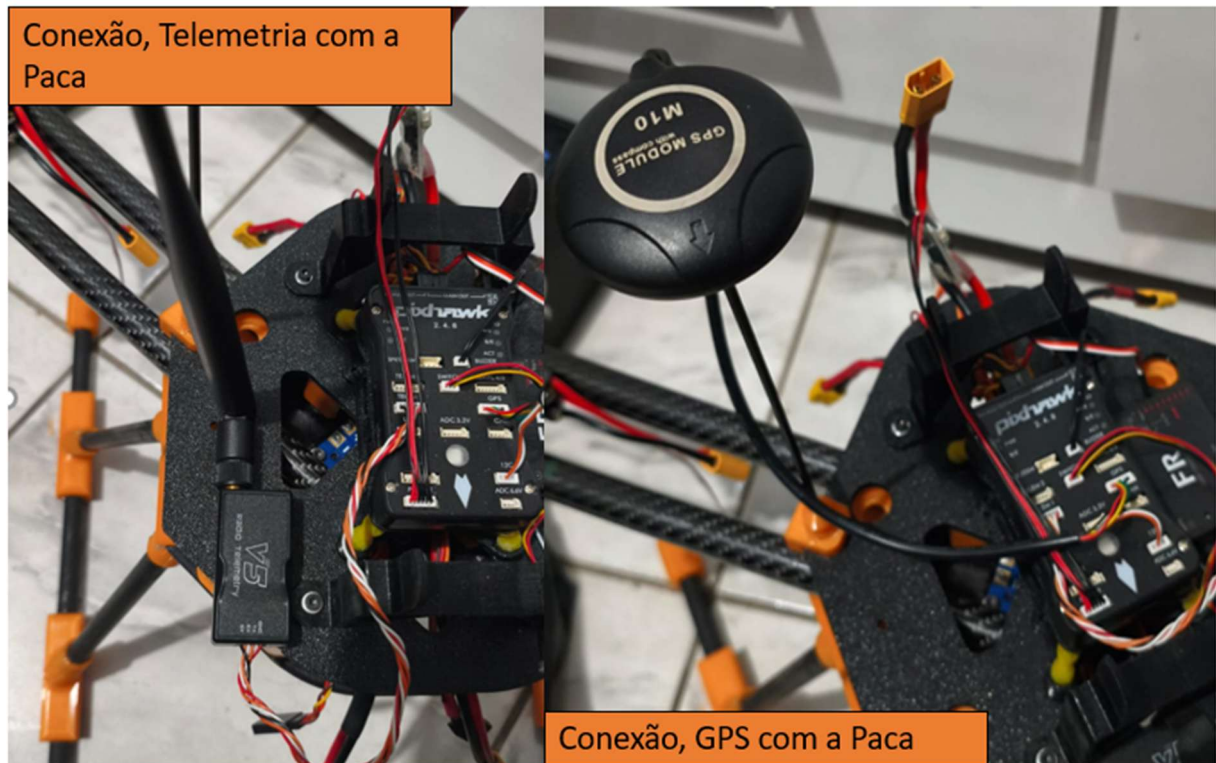
A análise e otimização do sistema de propulsão e energia foram etapas críticas para garantir a autonomia e capacidade de carga necessárias para um drone de entregas. Inicialmente, a bateria 4S 6000mAh apresentou uma autonomia limitada, conforme discutido na Seção 3.5.2. A transição para uma bateria 6S 10000mAh no modelo de projeto do drone apesar de um aumento no peso total (AUW), passando de 6.90 minutos para 14.63 minutos. Detalhes sobre o comparativo de autonomia com diferentes baterias podem ser encontrados na Tabela 2, no entanto utilizamos a primeira bateria para o protótipo do drone visando o custo de montagem.

O motor selecionado, MAD 3508 IPE 360KV, com seu empuxo máximo de 1800g por eixo e compatibilidade com hélices de 13-16 polegadas, alinha-se com a necessidade de transportar cargas pesadas, operando em rotações mais baixas com maior torque, o que é crucial para a eficiência em voo de cruzeiro. A escolha do ESC de 60A, superdimensionado em relação à corrente nominal, oferece uma margem de segurança para picos de corrente, garantindo a longevidade e confiabilidade do sistema de propulsão. As hélices de 16 polegadas com passo de 5.5 polegadas foram escolhidas para maximizar o empuxo em baixas rotações, otimizando o desempenho para entregas.

4.2.2. Controle e Comunicação

A controladora de voo Pixhawk PX4 2.4.8 foi integrada com sucesso, proporcionando a robustez e flexibilidade necessárias para o controle autônomo. Seus recursos avançados, como GPS, telemetria para modos de voo autônomos, esses dois componentes mostrados na Figura 24, são essenciais para a navegação precisa e a segurança das operações de entrega em ambientes complexos. O módulo de rádio SIYI FM30, operando em 2.4 GHz, demonstrou ser uma escolha eficaz para comunicação de longo alcance e baixa latência, fundamental para o controle manual e a transmissão de telemetria em tempo real, aumentando a segurança e a capacidade de resposta do operador.

Figura 24: Instalação do GPS e modulo de Telemetria



Autores (2025)

4.3. Considerações Finais dos Resultados

Os resultados obtidos até o momento demonstram que o projeto do drone de entregas está em conformidade com os objetivos propostos, a estrutura projetada se saiu como previsto e teve grande êxito na questão de manufatura. A validação elétrica e a montagem bem-sucedida confirmam a exequibilidade do design. Com todas as etapas concluídas com sucesso fizemos o teste de voo, mostrado na Figura 25, no qual o drone se demonstrou eficaz para cumprir sua missão com êxito. A otimização contínua dos componentes, especialmente o sistema de energia, resultou em melhorias significativas na autonomia com base nos cálculos, um fator crítico para a aplicação de entregas. Embora os detalhes finais ainda estejam sendo concluídos, a base do projeto é sólida e promissora para futuras etapas de testes e refinamento.

Figura 25: Teste de voo com o drone.



Autores (2025)

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento do projeto conceitual de um drone de entregas, abordando os requisitos logísticos, funcionais e estruturais para sua aplicação em ambientes urbanos. Ao longo do estudo, foram exploradas as diversas facetas da engenharia de drones, desde a análise de componentes e dinâmica de voo até a otimização de sistemas de propulsão e energia.

Os resultados obtidos nas fases foram amplamente satisfatórios, confirmando a viabilidade do projeto e a eficácia das soluções propostas. Apesar de durante a montagem de componentes estruturais, o que exigiram ajustes e adaptações, mas, essa questão foi resolvida sem comprometer a integridade da aeronave. Porém com os testes de voo validado (feitos com a carga útil de 1kg), é válido afirmar que o projeto é viável.

Este projeto não só contribui para o avanço da mobilidade aérea urbana, mas também destaca a importância de uma abordagem integrada que considera aspectos técnicos, operacionais e regulatórios. A experiência adquirida na superação dos desafios de montagem e na validação em voo reforça a robustez do design e a capacidade de adaptação da equipe. Futuras pesquisas poderão focar na otimização de algoritmos de controle e na exploração de materiais mais leves e resistentes para a estrutura, visando aprimorar ainda mais a autonomia e a capacidade de carga do drone.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMAZON.COM, 2025a. **Amazon.com. 16x5.5 Carbon Fiber Propeller.** Disponível em: <https://www.amazon.com/Carbon-Propellers-Multicopter-Quadcopter-Compatible/dp/B0DRS6LBTM> Amazon Acesso em: 17/09/2025

AMAZON.COM, 2025b. **Amazon.com. Pixhawk PX4 2.4.8 Flight Controller.** Disponível em: <https://www.amazon.com/pix2-4-8-ArduPilot-Flight-Controller-Compass/dp/B0F9F1JY3> Amazon Acesso em: 17/09/2025

ANAC, Assessoria de Comunicação Social da ANAC. **ANAC apresenta novo sistema de cadastro de drones (SISANT).** GOV, 2022. Disponível em: [de-drones-sisant](https://www.anac.gov.br/de-drones-sisant). Acesso em: 10/05/2025.

ANAC, Assessoria de Comunicação Social da ANAC. **ANAC Propõe modernizar o regulamento de 2017, ampliar a segurança das operações e fortalecer o desenvolvimento desse setor.** GOV, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2025/anac-abre-consulta-publica-para-atualizar-regras-de-operacao-de-drones>. Acesso em: 09/10/2025.

ANAC. **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: 10/05/2025

ANATEL. **Homologar produtos de telecomunicações - ANATEL.** 2024. Disponível em: https://www.gov.br/pt-br/servicos/homologar-produtos-de-telecomunicacoes-anatel?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 14/05/2025.

BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D.- REVISTAELETRÔNICA DOS CURSOS DE ENGENHARIA, Curitiba, v. 1, n.3, p. (7) set-dez, 2017.** Disponível em: [pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf](https://www.repositorio.ufpr.br/bitstream/handle/2011-6/100000000/1/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf). Acesso em: 11/05/2025.

CARVALHO, E.; FERREIRA, G.; GARCIA, C.; FARINAZZO, K. 2021. 11 f. **Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo) - Faculdade de Tecnologia de Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes, 2021.** Acesso em: 10/05/2025.

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: 10/05/2025.

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: 10/05/2025.

CRUZ, D.; FERRERIA, J.; SILVA, J.; SILVA, U. **Entrega e recebimento por meio de drones: estudo de caso sobre a opinião de estudantes da área de logística.** Guarulhos: Fateclog, 2019. Acesso em: 13/05/2025.

DECEA. **Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro, 2023.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2023. 20 p. Acesso em: 10/05/2025.

DEMOLINARI, H. **Projeto De Construção Um Drone Hexacoptero. 2016. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.** Acesso em: 10/05/2025.

DRONE LIFE, 2020. **Understanding ESCs for Drones.** Disponível em: <https://oscarliang.com/esc/>. Acesso em: 17/09/2025.

DRONEDEPLOY, 2025. **Unmanned Systems Technology. Best Drone GPS Modules for Accurate Navigation and Positioning.** Disponível em: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/gps-gnss-products/>. Acesso em: 17/09/2025.

DRONEDEPLOY, 2025. **DroneDeploy. GPS for Drones: How it Works and Why it Matters.** Disponível em: <https://www.dronedeploy.com/blog/what-is-the-difference-between-rtk-ppk-and-gcp-and-why-does-it-matter>. Acesso em: 17/09/2025.

D'ANDREA, R. **Can drones deliver? IEEE Transactions On Automation Science and Engineering., v. 11, n. 3, p. 647–648, 2014.** Acesso em: 13/05/2025.

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-poucoantes-de-aterrissar-em-aeroporto-de-mocambique-20737523.html>. Acesso em: 10/05/2025.

FAXINA, L. **Projeto De Drone De Baixo Custo Para Monitoramento Em Áreas Agrícolas. 2021. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Avaré, 2023.** Acesso em: 08/05/2025.

FLITE TEST, **Flite Test. Propellers Explained 2025.** Disponível em: <https://www.flitetest.com/>. Acesso em: 17/09/2025

FPV KNOW-IT-ALL, **FPV Know-It-All. ESC Basics: How Electronic Speed Controllers Work, 2025.** Disponível em: <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/what-is-an-esc-how-does-an-esc-work>. Acesso em: 17/09/2025

GEOONE. **Qual drone comprar para fazer Mapeamento? 2023.** Disponível em: <https://geoone.com.br/qual-drone-comprar-para-fazer-mapeamento/>. Acesso em: 08/05/2025.

GETFPV, **GetFPV. BEC vs UBEC: What's the Difference? 2025**. Disponível em: <https://www.getfpv.com/learn/fpv-essentials/bec-vs-ubec-whats-the-difference/>. Acesso em: 17/09/2025

GETFPV, **GetFPV. RC Link Basics: How Your Drone Communicates, 2025a**. Disponível em: <https://www.getfpv.com/learn/new-to-fpv/all-about-multirotor-fpv-drone-radio-transmitter-and-receiver/>. Acesso em: 17/09/2025

GOMES, E.; SOARES, J.; GOMES, J.; COLETO, L.; MORO, M.; FAUSTINO, W. **Implementação Da Tecnologia Drone Na Logística: Projeto Crows Da Etec De Fernandópolis. 2023**. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Habitação Profissional Técnica de Nível Médio de Técnico) - Escola Técnica Estadual Prof. Armando José Farinazzo, Fernandópolis, 2023. Acesso em: 10/05/2025.

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-djip-drone-f450-f550-_JM. Acesso em: 11/05/2025.

HOBBYWING, **2025 Hobbywing. Hobbywing XRotor Micro 40A 4in1 BLHeli_32 DShot1200 ESC**. Disponível em: <https://www.hobbywing.com/en/products/xrotor-micro-40a20x20-6s-4in1-esc116>. Acesso em: 17/09/2025

LEMES, F. **Uso de drones em processos logísticos. Pedro Leopoldo: Fundação Pedro Leopoldo, 2017**. Acesso em: 10/05/2025.

LIANG, O. **Power Distribution Board (PDB) for FPV Drones, 2025**. Disponível em: . Acesso em: 17/09/2025

LIANG, O. **FPV Drone Flight Controller Explained, 10 fev 2020a**. Disponível em: <https://oscarliang.com/flight-controller-explained/>. Acesso em: 10/05/2025.

LIANG, O. **RC Protocols Explained: SBUS, CRSF, PWM, FPORT and More, 1 abr 2021a**. Disponível em: <https://oscarliang.com/rc-protocols/>. Acesso em: 11/05/2025.

LIANG, O. **Using Li-Ion Battery Pack for Long Range FPV Flying, 1 ago. 2020**. Disponível em: <https://oscarliang.com/li-ion-battery-long-range/>. Acesso em: 10/05/2025.

MAD COMPONENTS, **MAD Components. MAD 3508 IPE 360KV, 2025a**. Disponível em: <https://mad-motor.com/products/madcomponents3508ipe>. Acesso em: 17/09/2025

MAD COMPONENTS, **MAD Components. MAD 3508 IPE Drone ESC 60A Brushless, 2025b**. Disponível em: <https://redrone.top/products/mad-xrotor-pro-60a-4-6s-drone-esc>. . Acesso em: 17/09/2025

MAGRINELLI, R.; FERREIRA, F. **A importância da logística: um estudo de caso de um escritório de advocacia de palmital. Ourinhos: Revista Hórus, 2010**. Acesso em: 10/05/2025.

MATHWORKS, 2025 **MathWorks. PID Control for Drones**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/slcontrol/ug/pid-controller-tuning-for-a-uav-quadcopter.html>. Acesso em: 17/09/2025

MOLLICA, C. **FPV Flight Dynamics: Mastering Acro Mode on High-Performance Drones**. 1ªed. Vespula Ventures LLC, 30 mar. 2021. Acesso em: 10/05/2025.

OMNI CALCULATOR. **Drone Flight Time Calculator, 2025**. Disponível em: <https://www.omnicalculator.com/other/drone-flight-time>. Acesso em: 17/09/2025.

PIXHAWK. **Sistemas de Controle de Rádio**. 2018. Disponível em: https://docs.px4.io/v1.11/en/getting_started/rc_transmitter_receiver.html. Acesso em: 11/05/2025

PX4 AUTOPILOT, 2025 **Autopilot. Flight Controller Overview**. Disponível em: https://docs.px4.io/main/en/getting_started/px4_basic_concepts.html. Acesso em: 17/09/2025

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/matecconf/201815202023>. Acesso em: 10/05/2025.

RC GROUPS, 2025 **Amazon.com. Zeee 6S Lipo Battery 10000mAh 22.2V 120C Soft**. Disponível em: <https://www.amazon.com/Zeee-Battery-10000mAh-22-2V-Connector/dp/B0BHQX8XQX>. Acesso em: 17/09/2025

ROSKAM, J. **“Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls”**, DARcorporation, Lawrence, 2003. Acesso em: 10/05/2025.

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: 11/05/2025.

SANTOS, L. **Aplicações da manufatura aditiva e otimização topológica em projetos aeroespaciais e robóticos**. Revista Brasileira de Engenharia e Inovação Tecnológica, v. 9, n. 2, p. 45–62, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/rbeit.v9n2.santos2023>. Acesso em: 10 maio 2025.

SPEEDBIRD. **Aircraft systems built to transform logistics**. 2020. Disponível em: <https://www.speedbird.aero/#about> . Acesso em: 10/05/2025.

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: 13/05/2025.

TKác, M.; MésÁROš, P. **Utilizing drone technology in the civil engineering**. Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering, v. 14, n. 1, December 2019. Acesso em: 10/05/2025.

UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY, *2025 Unmanned Systems Technology.*

Calculating How Much Weight a Drone Can Carry. Disponível em:

<https://www.unmannedsystemstechnology.com/feature/calculating-how-much-weight-a-drone-can-carry/>. Acesso em: 17/09/2025

WAWRLA, Ls; MAGHAZEL, O; NETLAND, T. **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%200warehouse%20opeations_POM%20whitepaper%202019_Final.pdf. Acesso em: 11/05/2025.

WORLD DRONE MARKET, **World Drone Market. SIYI FM30 2.4GHz Long Range Radio System, 2025.** Disponível em: <https://www.worlddronemarket.com/siyi-fm30-2-4ghz-long-range-radio-system>. Acesso em: 17/09/2025