

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO
TRIPULADO PARA VOOS AUTÔNOMOS COM CARGA EMBARCADA

Pedro Henrique de Castro Albuquerque Machado



DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO PARA VOOS AUTÔNOMOS COM CARGA EMBARCADA

Pedro Henrique de Castro Albuquerque Machado

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador:

Prof. Márcio de Almeida D'Agosto

Coorientador:

Daniel Neves Schmitz Gonçalves

Rio de Janeiro

Fevereiro 2021

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO
TRIPULADO PARA VOOS AUTÔNOMOS COM CARGA EMBARCADA

Pedro Henrique de Castro Albuquerque Machado

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Márcio de Almeida D'Agosto, DSc.

Daniel Neves Schmitz Gonçalves, MSc.

Lino Guimarães Marujo, DSc.

Respício Antônio do Espírito Santo Júnior, DSc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Fevereiro de 2021

de Castro Albuquerque Machado, Pedro Henrique

Desenvolvimento e análise de um veículo aéreo não tripulado para voos autônomos com carga embarcada / Pedro Henrique de Castro Albuquerque Machado – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2021.

ix, 57 p.:il.; 29,7 cm.

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Coorientador: Daniel Neves Schmitz Gonçalves

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 53-57

1. Introdução 2. Revisão bibliográfica 3. Método 4. Aplicação 5. Comparação e recomendações futuras 6. Conclusão.

I. D'Agosto, Márcio de Almeida; II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, em especial a minha mãe, por terem me dado o apoio necessário para conclusão do curso de Engenharia Civil na UFRJ.

Agradeço a Márcio e Lísia pelo apoio ao longo dos anos na faculdade e pela oportunidade de desenvolver esse trabalho em um ambiente de trabalho bem familiar.

A minha amiga Paula e Rodrigo e aos meus amigos que fiz ao longo do curso, em especial ao Danilo, que sempre me ajudou nas horas mais difíceis e companheiro de noite adentro nos estudos na faculdade

Aos meus grandes amigos do Laboratório de Transporte de Carga (LTC) Daniel e George, que juntos conseguiram me aguentar e construir uma amizade sólida, mostrando que o trabalho não se resume somente a números e pesquisas.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO
PARA VOOS AUTÔNOMOS COM CARGA EMBARCADA

Pedro Henrique de Castro Albuquerque Machado

Fevereiro de 2021

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Coorientador: Daniel Neves Schmitz Gonçalves

O aumento contínuo dos congestionamentos de tráfego em meio urbano adensado, bem como a precariedade da infraestrutura de acesso a regiões remotas, torna a acessibilidade aos pontos de entrega de carga um desafio no processo de distribuição física. Como forma de reduzir os custos e melhorar a acessibilidade, tecnologias relacionadas a veículos autônomos têm sido desenvolvidas em todos os modos de transporte. No modo aéreo, tem-se testado o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) no transporte urbano de carga, ao invés de veículos de entrega padrão do modo rodoviário, como motocicletas e caminhões semileves, visando reduzir a emissão de poluentes atmosféricos visto que, o VANT utiliza a rede elétrica para carregar suas baterias, sendo essa, no caso do Brasil, majoritariamente proveniente das usinas hidrelétricas. Esse trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um VANT, contemplando a pesquisa dos componentes, montagem, programação e testes de voo. Os testes foram conduzidos em áreas no campus da universidade visando avaliar o consumo e a autonomia do VANT em diversos percursos de testes com diferentes cargas acopladas. Os dados foram coletados por meio do sistema de telemetria embarcado, fornecendo assim informações sobre o consumo energético, posição do VANT e a distância percorrida até que o limite máximo de operação da bateria seja atingido. Após os testes, o VANT desenvolvido mostrou atender as expectativas e realizou com sucesso voos autônomos ao longo de percursos e retornando com segurança ao ponto de partida.

Palavras-chave: VANT; Drones; Transporte urbano de carga; TUC.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF AN UNMANNED AIR VEHICLE FOR
AUTONOMOUS FLIGHTS WITH EMBARKED LOAD

Pedro Henrique de Castro Albuquerque Machado

February 2021

Advisor: Márcio de Almeida D'Agosto

Coadviser: Daniel Neves Schmitz Gonçalves

The continuous increase in traffic congestion in a dense urban environment, as well as the precarious infrastructure of access to remote regions, makes accessibility to cargo delivery points a challenge in the physical distribution process. As a way to reduce costs and improve accessibility, technologies related to autonomous vehicles have been developed in all modes of transport. In air mode, the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in urban freight transport has been tested, instead of standard delivery vehicles, such as motorcycles, light commercial vehicles and light trucks, in order to reduce the emission of air pollutants, once the energy used to charge it is provided by hydroelectric plants. This work aims to present the development of a UAV, encompassing the research of the components, assembly, programming, and flight tests. The tests were conducted in areas on the university campus in order to assess the UAV consumption and autonomy in different test paths with different loads attached. Data were collected through the embedded telemetry system, providing information on energy consumption, UAV position and the distance traveled until the maximum battery operating limit is reached. After the tests, the developed UAV met the expectations and successfully made autonomous flights along routes and safely returning to the starting point.

Keywords: UAV; Drones; Urban freight transport.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	10
1.2	MOTIVAÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DO TRABALHO	11
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	11
1.3.1	OBJETIVO GERAL	11
1.3.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	CONCEITOS DE VANTS	13
2.1.1	VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT)	13
2.1.2	DRONE	13
2.1.3	AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA)	13
2.1.4	SISTEMA DE AERONAVE NÃO TRIPULADA (UAS)	14
2.2	CATEGORIAS DOS VANTS	14
2.2.1	ASAS FIXAS	14
2.2.2	MULTIROTOR OU ASA ROTATIVA	15
2.3	REQUISITOS PARA O VANT	16
2.3.1	BATERIA	16
2.3.2	CARGA ÚTIL	17
2.3.3	AUTONOMIA	17
2.4	CLASSIFICAÇÃO DOS RPA	17
2.5	PANORAMA	18
2.6	USO DE VANT NO TRANSPORTE DE CARGA URBANO (TUC)	20
3	MÉTODO	23
3.1	FASE 1 – DESENVOLVIMENTO DE UM VANT	24
3.2	FASE 2 – AUTOMAÇÃO E TESTES DE VOO	25
3.3	FASE 3 – SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DO VANT	26

4	APLICAÇÃO	27
4.1	DESENVOLVIMENTO DO VANT.....	27
4.1.1	MONTAGEM.....	27
4.1.2	TESTES DE VOOS NO MODO MANUAL.....	32
4.1.3	ALTERAÇÃO DE COMPONENTES	33
4.2	APLICAÇÃO DA FASE 2.....	34
4.3	SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DO VANT	38
5	COMPARAÇÃO E RECOMENDAÇÕES DE NOVOS COMPONENTES	46
6	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Essa seção busca apresentar o contexto no qual este trabalho foi desenvolvido, bem como apresentar todos os dados e informações que fundamentaram o estudo. Será também apresentada a motivação que levou a realização do trabalho, assim como o seu objetivo geral e específicos.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

O aumento contínuo dos congestionamentos de tráfego em meio urbano adensado tem gerado níveis de poluição atmosférica e sonora mais elevados nas últimas décadas. Além disso, para o transporte de mercadorias em regiões remotas, a precariedade da infraestrutura de acesso tem tornado a acessibilidade aos pontos de entrega um desafio no processo de distribuição física das empresas que atuam na atividade do transporte de carga. Dessa forma, essas empresas têm buscado desenvolver tecnologias relacionadas a veículos autônomos, a fim de mitigar os impactos socioambientais provenientes de suas atividades, garantindo o nível de serviço oferecido sem onerar a operação (CRAINIC *et al.*, 2009).

Devido à complexidade espacial e operacional das cidades, o Transporte Urbano de Cargas (TUC) enfrenta diversos desafios, dentre os quais se destacam a intensificação dos congestionamentos de tráfego (CRAINIC *et al.*, 2009), as restrições espaço-temporais da circulação de veículos de carga (BALM *et al.*, 2014), além da escassez ou inadequação do uso de locais para realização de carga e descarga (BHUSIRI *et al.*, 2014).

Segundo LINDHOLM *et al.* (2012) e BROWNE *et al.* (2007), a mobilidade das cargas é considerada uma demanda secundária em relação à mobilidade das pessoas, indicando a falta de priorização dessa atividade. Nesse contexto, a identificação de meios alternativos aos veículos rodoviários utilizados tradicionalmente no TUC se mostra oportuna para mitigação desses desafios.

A atividade de transporte, sobretudo em áreas de grande concentração populacional e grande número de estabelecimentos comerciais, exige o suprimento de bens e serviços para o uso comercial e doméstico. Neste sentido, estima-se que nos próximos anos, mais da metade da população em todo mundo viverá em áreas urbanas e a tendência é que esta fração continue crescendo (ALLEN *et al.*, 2008).

1.2 MOTIVAÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DO TRABALHO

No modo aéreo tem sido testado o uso de voos autônomos em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) como possíveis substitutos dos veículos de entrega padrão do modo rodoviário, visando reduzir a emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (GEE), visto que são elétricos e, como a matriz energética brasileira é 64,9% proveniente de hidrelétricas (EPE, 2020), representam uma fonte mais limpa comparada a queima de combustíveis fósseis, já que o VANT utiliza a energia da rede elétrica para carregar as suas baterias.

No entanto, alguns aspectos técnicos e regulatórios para sua plena utilização ainda são necessários. Atualmente, existem inúmeras aplicações no campo militar, porém, suas principais aplicações ocorrem no campo civil (DALAMAGKIDS *et al.*, 2012), podendo citar as suas aplicações em inspeção de infraestrutura, aerofotogrametria, busca e resgate, agricultura e vigilância (CLOTHIER *et al.*, 2015). Ademais, na seção 2.6 será apresentado o uso de VANTs na última milha do TUC.

De acordo com BAMBURRY (2015), 86% dos pedidos da empresa Amazon pesam menos de 2,5 kg. Isto posto, os VANTs têm potencial promissor para a operação de transporte de carga, destacando os segmentos de entrega de comida, entrega de encomendas com foco no comércio eletrônico e até mesmo na área médica ou de outros produtos de urgência.

Conhecida as características adequadas para um VANT capaz de realizar entregas de pequenos volumes em áreas urbanas, suas vantagens e limitações, necessita-se adquirir ou desenvolver um equipamento para que se possa avaliar o seu desempenho.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Essa seção está dividida em duas subseções, apresentadas a seguir:

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo colaborar na mitigação dos problemas gerados pelos transportes de carga, ou seja, tentar minimizar o aumento contínuo dos congestionamentos nas cidades, assim como os impactos socioambientais gerados pela operação das empresas de transporte urbano de cargas, fazendo-se necessário o desenvolvimento de um VANT para o uso na última milha do TUC, onde serão descritos todos os processos de aquisição, montagem,

programação, procedimentos operacionais, testes e simulações comparativas com a operação de outros VANTs.

1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Como objetivos específicos desse trabalho tem-se:

- Identificar por meio da literatura, os equipamentos necessários para o desenvolvimento de um VANT;
- O processo de aquisição das peças e desenvolvimento do equipamento;
- Identificar na literatura textos e algoritmos *open source* que possam contribuir para o desenvolvimento do algoritmo de controle de voo do VANT;
- Integrar os sensores embarcados à placa controladora por meio do algoritmo desenvolvido;
- Realizar voos com o VANT no modo autônomo;
- Fazer a análise estatística dos dados coletados; e
- Analisar a viabilidade técnica para o uso do VANT na última milha do TUC.

Além dessa introdução, este trabalho possui 5 outros capítulos. No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a utilização e legislação sobre o emprego de VANTs. No capítulo 3, é apresentado o método do trabalho, e suas respectivas fases. O capítulo 4 conduz o experimento baseado no método apresentado anteriormente. Já no capítulo 5, são discutidos os resultados obtidos e recomendações de melhorias para o método empregado. Por fim, o capítulo 6 apresenta a conclusão do estudo juntamente com recomendações futuras para outros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção será apresentada a revisão bibliográfica sobre o tema do trabalho apresentado, visando com isso, adquirir o entendimento e visão geral do quadro de aplicação dos VANTs no Brasil e no mundo.

2.1 CONCEITOS DE VANTS

Os VANTs recebem diferentes nomes, sendo importante saber diferenciá-los. A seguir serão apresentados algumas de suas nomenclaturas encontradas na literatura.

2.1.1 VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT)

A International Civil Aviation Organization (ICAO), é a agência responsável pela definição dos VANT. Segundo a ICAO Circular 328-NA/190, VANT é uma aeronave que voa sem um piloto em comando a bordo do veículo e pode ser controlada remotamente de qualquer outro lugar, seja em solo, de outra aeronave, podendo ser programada ou autônoma (ICAO, 2011).

2.1.2 DRONE

De acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), “O termo “drone” é usado popularmente para descrever qualquer aeronave e até mesmo outros tipos de veículos com alto grau de automatismo. De uma forma geral, toda aeronave “drone” é um aeromodelo ou uma aeronave não tripulada remotamente pilotada (RPA)” (ANAC, 2019). Como o termo VANT é considerado sinônimo de drone, ele será adotado ao longo do trabalho, visto que é um termo técnico.

2.1.3 AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA)

A ICAO considera a definição para RPA sendo uma forma de VANT dependente do controle direto de um piloto ao longo de todo o voo, porém, ele pode operar de forma remota em relação ao piloto” (ICAO, 2011). Já no Brasil, por meio do documento ICA100-40/2015, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) considera como “qualquer aparelho que possa se sustentar na atmosfera a partir de reações do ar que não sejam as reações do ar contra

a superfície da terra. Aquelas que se pretenda operar sem piloto a bordo são chamadas de aeronaves não tripuladas e, dentre as não tripuladas, aquelas que são pilotadas por meio de uma Remotely Piloting Station (RPS) são RPAs'' (DECEA, 2015).

2.1.4 SISTEMA DE AERONAVE NÃO TRIPULADA (UAS)

De acordo com BASSET *et al.* (2015), um UAS é um veículo formado por quatro componentes principais, sendo esses, (i) o veículo aéreo (normalmente chamado de UAV), (ii) a carga útil, (iii) a estação de controle e (iv) o *link* de dados. Os operadores localizados na estação de controle se comunicam com o UAS através de um *data link*, ou seja, uma transmissão de dados em tempo real, via rádio.

2.2 CATEGORIAS DOS VANTS

Existem dois tipos de VANTS, categorizados como: asa fixa ou multirotor.

2.2.1 ASAS FIXAS

A ANAC define aeronave de asa fixa sendo, “mais pesada que o ar, propelida a motor e que é sustentada no ar pela reação dinâmica do ar contra suas superfícies de sustentação que permanecem fixas sob determinadas condições de voo.”

Esse tipo de VANT utilizam os mesmos princípios básicos dos aviões tradicionais, sendo esses: (i) *Roll* (rotação em torno do eixo longitudinal); (ii) *Pitch* (rotação em torno do eixo transversal); e (iii) *Yaw* (rotação em torno do eixo vertical) (ARIAS, 2016).

A sua sustentação é gerada pelo fluxo de ar que passa pelas suas asas, proveniente da aceleração horizontal. Essa aceleração horizontal é gerada por um ou mais motores que se encarregam em impulsionar o veículo para frente, resultando em um consumo energético menor, garantindo uma autonomia de voo maior.



Figura 2.2.1 Exemplo de VANT de asa fixa

Fonte: <http://apagri.com.br/vant/>

2.2.2 MULTIROTOR OU ASA ROTATIVA

A ANAC define aeronave de asas rotativas sendo, “Aeronave de asa rotativa significa uma aeronave mais pesada que o ar que depende principalmente da sustentação gerada por um ou mais rotores para manter-se no ar” (ANAC, 2010).

Os VANTs multirotores, como o próprio nome sugere, possui um conjunto de motores. O chassi desse tipo de aeronave, geralmente é montado centralizado em relação aos seus motores que rotacionam as suas hélices, gerando assim o empuxo vertical necessário para o voo. Ao variar a velocidade relativa de cada rotor, o torque é alterado, permitindo a movimentação da aeronave (GTA, 2019).

As variações mais comuns são dadas em função do número de motores que possuem, sendo esses: (i) quatro (quadricópteros); (ii) seis (hexacópteros); ou (iii) oito (octacópteros) (GTA, 2019)..



Figura 2.2.2 Exemplo de VANT de asa rotativa ou multirotor

Fonte: <https://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/drone-setor-telecomunicacoes-214818.html>

Os VANTs de asa fixa possuem um consumo energético menor face aos de asas rotativas e possuem um alcance e estabilidade maior em voo. Porém, são mais difíceis de pilotar e ter o contato visual com o aparelho e dependem de áreas maiores para realizarem o procedimento de pouso e decolagem, semelhantes aos aviões.

Já os de asa rotativa, são mais fáceis de controlar, exigem uma área muito pequena para pouso e decolagem, são capazes de voarem em baixas velocidades e possuem redundâncias no número de motores no caso de falha em algum deles, permitindo uma chance maior de retorno.

2.3 REQUISITOS PARA O VANT

Para se projetar um VANT, é necessário dimensioná-lo de forma a atender algumas características chaves no projeto.

2.3.1 BATERIA

De acordo com PARK *et. al.* (2017), o VANT deve ter bateria suficiente para realizar o seu percurso, pois o gerenciamento da bateria afeta seu tempo de voo, sendo esse importante para percorrer seu trajeto até o local de coleta das amostras e retornar ao local onde o piloto se encontra, podendo assim ser feita uma troca de bateria. Porém, a troca de bateria do equipamento pode ser uma desvantagem, dado o tempo que ele ficará inutilizável durante a troca. Além disso, deve ser transportada uma bateria de capacidade adequada, visto que quanto

maior o peso dela, mais energia será necessária para a realização do voo e a realização da entrega.

2.3.2 CARGA ÚTIL

De acordo com a ANAC (2014), o *payload* (carga útil) é o termo usado para definir a “diferença entre o peso total de uma aeronave carregada e o peso da mesma vazia”. No caso do VANT, o *payload* é a diferença do modelo com a sua bateria acoplada e o peso máximo de decolagem. A escolha da capacidade do VANT é uma das características mais importantes do projeto, pois tudo será dimensionado de forma a possibilitar um voo com essa carga embarcada.

2.3.3 AUTONOMIA

De acordo com VALAVANIS e VACHTSEVANOS (2015), a autonomia é característica central para qualquer VANT. É essa característica que permite que o VANT atue de forma autônoma em um raio de alcance, executando a sua missão e retornando ao ponto de origem em segurança.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS RPA

De acordo com a ANAC (2017a), a operação de RPAs no Brasil seguem as regras dos órgãos governamentais responsáveis pela regulamentação para o uso e operação dos RPAs, que se dividem da seguinte forma: (i) A ANAC, fica responsável pela regularização e fiscalização da aviação civil; (ii) Já a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), fica responsável por prover e fiscalizar os serviços de telecomunicações; e (iii) Por fim, a DECEA fornece os serviços de aeronavegação e organiza o tráfego aéreo.

Em 2017, com base no RBAC n° 94, a ANAC (2017a) agrupou os RPAs em três classes de acordo com o seu peso máximo de decolagem, sendo classificadas como: (i) Classe I - RPAs acima de 150 kg; (ii) Classe II - RPAs de 25 kg a 150 kg; e (iii) Classe III - abaixo ou igual a 25 kg.

Os RPAs de Classe I deverão possuir um certificado da ANAC de acordo com o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) n° 21 (ANAC, 2018). Esses RPAs precisam ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro (RAB) e terem todos os seus voos

registrados. Os pilotos precisam do Certificado Médico Aeronáutico (CMA) juntamente com a licença e habilitação.

Os RPAs de Classe II não precisarão ser certificados, porém, os fabricantes têm que se atentar aos requisitos técnicos. Assim como os da Classe I, esses RPAs precisam ser registrados no RAB e terem todos os seus voos registrados. Os pilotos também precisam possuir o CMA juntamente com a licença e habilitação.

Os RPAs Classe III que operarem até 400 pés, estão isentos da autorização para o projeto, porém, precisam realizar o registro no SISANT. Esse número gerado no registro, deve ser preso no veículo e fabricado em material não inflamável.

Os modelos que pesam até 250 g não necessitam de registros, pois são considerados de uso recreativo (ANAC, 2017c).

2.5 PANORAMA

Embora o uso de VANTs possa parecer um assunto recente, a aplicação de veículos aéreos não tripulados teve suas primeiras aplicações no século XIX, quando os austríacos carregavam balões sem tripulantes carregados com explosivos, com o intuito de atacar alvos na cidade de Veneza (UBIRATAN, 2015).

De acordo com BOYNE (2010), a origem dos VANTs como conhecemos hoje, remonta aos tempos do final da Segunda Guerra Mundial, onde os militares começaram a desenvolver protótipos de bombardeiros controlados através de ondas de rádio. O operador controlava a aeronave a partir de um outro avião ao lado, e ao se aproximar dos alvos, fazia o avião mergulhar e colidir detonado as cargas explosivas a bordo. Apesar do projeto não ter correspondido as expectativas, devido às limitações técnicas da época, foi o primeiro passo de muitos para o surgimento de uma nova gama de armas. Isso serviu como o primeiro passo dessas tecnologias que vieram a ser aprimoradas e desenvolvidas ao longo da segunda metade do século XX. Hoje, em pleno século XXI, existem diversas aplicações para os VANTs desde o seu emprego na área militar (CHIANG *et al.*, 2019), quanto em setores da sociedade civil.

Na área da construção civil, segundo SHAKHATREH *et al.* (2019), os VANTs são usados no monitoramento e acompanhamento de construções, possibilitando o gerente da obra acompanhar o canteiro da obra sem ter que estar presente no local. Os VANTS também podem ser empregados no monitoramento de redes suspensas de alta tensão, evitando que um ser humano tenha que se expor a altas tensões durante o monitoramento, sendo a sua presença necessária apenas quando uma intervenção física for necessária.

Ainda segundo SHAKHATREH *et al.* (2019), em 2016, a Pacific Gas e a empresa PG&E realizaram testes com esse tipo de equipamento para o monitoramento de oleodutos e turbinas eólicas. Também foram utilizados em inspeções em estruturas *offshore*, possibilitando analisar de forma simples a zona de impacto das ondas na estrutura averiguando suas condições e a necessidade de intervenção.

Os VANTs também estão sendo utilizados na indústria agrícola (HUANG *et al.*, 2013). Hoje já existem modelos equipados com aspersores capazes de voar rotas pré-programadas, pulverizando centenas de hectares em um curto período. O custo de operação também é menor face as aeronaves convencionais utilizadas, que possuem um custo de hora de voo muito mais alto e manutenção mais cara.

Já na aplicação industrial, os VANTs têm o potencial de fornecer um nível de segurança maior e melhorar a qualidade de vida de muitas pessoas. Já foram registrados casos em que o emprego de VANTs salvaram vidas, como por exemplo: (i) ajudou a localizar uma criança autista; e (ii) já ajudou a distribuir medicamentos em zonas remotas de países onde a saúde é muito precária, entre outros.

Uma parte significativa das aplicações civis do VANTs está atrelada a fotografia aérea (CHENG, 2015), ou acompanhamento em vídeo, permitindo identificar tráfego nas vias, monitorar e seguir veículos nas ruas, analisar o fluxo das vias e extrair parâmetros do tráfego em centros urbanos (BARMPOUNAKIS *et al.*, 2016).

Em contrapartida, de acordo com VASZARY (2014), existem dois lados antagônicos em relação ao uso e aplicações deles. Por um lado, há pessoas que alegam que o uso de VANTs contribua para a violação da privacidade das pessoas, outras alegam que causam desconforto devido ao barulho gerado durante a sua utilização. Em relação a segurança, sempre paira a dúvida sobre o indivíduo que está no controle do VANT, e se ele domina os controles para garantir uma operação segura. Porém, há quem diga que os VANTs não representam uma ameaça a privacidade das pessoas, visto que eles podem voar relativamente alto e que hoje em dia é possível ter acesso a fotos de satélites que fornecem o mesmo tipo de resolução que as câmeras normalmente embarcadas nos VANTs.

Alguns países como os Estados Unidos, China, Rússia, Turquia e Irlanda, desenvolveram sistemas semelhantes ao sistema de cadastro brasileiro, o Sistema de Aeronaves não Tripuladas (SISANT) para o registro dos VANTs, de acordo com a legislação. Esses países compartilham os seus registros de dados com a ICAO, que fica responsável por agrupar todos os cadastros em âmbito internacional.

Ainda de acordo com o VASZARY (2014), a Áustria é um dos países com a legislação mais restritiva. O uso de VANTs apesar de permitido, é extremamente limitado. Se um voo possui uma aplicação específica, que não seja o próprio voo do equipamento, esse, está sujeito a taxas e regulamentações mais duras do que os de uso recreativo, ou seja, sem um objetivo específico. Essas taxas e regulamentações podem variar de acordo com o peso do VANT.

Segundo a Price Waterhouse Coopers (2016), países como Alemanha, Canadá, China, Polônia e Reino Unido, que já possuem regulamentação consolidada em relação aos VANTs, exigem que para a operação desse tipo de equipamento, é obrigatório a contratação de uma seguradora, visando assim proteger as empresas, os clientes e terceiros para uma operação mais segura.

2.6 USO DE VANT NO TRANSPORTE DE CARGA URBANO (TUC)

A população mundial, vem cada vez mais se concentrado nos grandes centros urbanos. De acordo com as Nações Unidas (2020), atualmente, metade da população do planeta está localizada em regiões urbanas e para o ano de 2050, é esperado um aumento para 70% da população urbana (Nações Unidas, 2019). Com isso, o transporte de carga vem ganhando cada vez mais destaque, visto que ele incentiva o desenvolvimento de cidades e regiões, permitindo o acesso a importantes recursos sociais e econômicos (GASPARINI, 2008).

O TUC pode ser descrito como a movimentação de bens e matérias primas que transitam em áreas urbanas (DABLANC, 2007). Essa atividade pode ocorrer por meio de transferência, coleta ou distribuição (VILELA *et al.*, 2013) e é uma fonte geradora de empregos, contribuindo assim com o desenvolvimento econômico de uma região ou cidade (LINDHOLM e BEHRENDTS, 2012). Os impactos gerados por essa atividade podem ser, sociais, econômicos e ambientais, sendo esse, no aumento do tráfego nas cidades, gerando uma intensificação dos congestionamentos, que por sua vez, resulta no aumento do consumo de combustível, à emissão de poluentes atmosféricos e GEE e no aumento da poluição sonora (DABLANC, 2007).

Os custos com o transporte são da ordem de 60% dos custos logísticos totais. Isso faz com que empresas de transporte desenvolvam métodos de planejamento de rota e utilização dos veículos da frota atuante (AMARAL *et al.*, 2014).

A etapa final da entrega, conhecida com a última milha ou *last mile*, representa a etapa de entrega da carga ao consumidor final. Os custos de operação dessa única etapa, podem chegar à metade do valor total gasto no transporte da mercadoria (ROUMBOUTSOS *et al.*, 2014) e com o surgimento do *e-commerce*, o número de mercadorias vêm aumentando

significativamente e apresentando uma redução em suas dimensões. Isso vem gerando um aumento dos custos relativos ao transporte, uma vez que essas mercadorias são entregues individualmente (MELO, 2002).

Segundo JOERSS *et al.* (2016), alguns meios convencionais aplicados hoje são: (i) Um entregador, ou seja, funcionário dedicado de uma transportadora recebe a encomenda em um depósito e com o uso de um veículo leve, leva a encomenda até o destino; (ii) Aeronaves autônomas de pouso e decolagem verticais com capacidade de carga de até 15 kg. Esse meio possui uma velocidade média acima dos veículos tradicionais e utilizam rotas mais diretas para chegar e retornar ao destino; e (iii) Entrega por meio do uso de bicicletas. Esses, são realizados para um número menor de entregas em curtas distâncias ou para o transporte de documentos ou comidas.

Já para o futuro, ainda de acordo com JOERSS *et al.* (2016), pode-se esperar mais opções como, (i) veículos terrestres semiautônomos, que possam trafegar pelas vias, porém, com um operador a bordo responsável pela entrega da mercadoria; (ii) Veículos autônomos leves que possam trafegar pelas calçadas realizando as entregas sem intervenção humana; e (iii) Entrega por meio de aplicativo, visando utilizar motoristas que já façam aquela rota para transportar a carga para o destino, diminuindo os custos de operação.

Segundo SOUZA *et al.* (2020), a utilização de VANTs para a etapa de última milha está sendo considerada viável tanto por empresas quanto por clientes para as cargas cuja dimensões e pesos estejam dentro do envelope operacional do modelo utilizado. O estudo mostra que dos entrevistados, 34% aprovam e 33% não aprovam o uso desse tipo de veículo, 22% afirmaram que o tipo de produto de sua empresa não permitiria o uso desse tipo de equipamento e 11% ficaram na dúvida se utilizariam ou não esse veículo em suas operações.

A agilidade na entrega pode ser considerada a principal vantagem em relação ao uso de VANTs para o TUC. Contudo, se aplicado em massa poderá ocasionar o congestionamento aéreo. Atender a legislação local de utilização, o tamanho e o peso da carga a ser transportada, são os principais desafios a serem vencidos para uma utilização prática desse tipo de veículo (SOUZA *et al.*, 2020).

Segundo CHIANG *et al.*, (2019), o roteamento e a entrega de cargas com emprego do VANTs podem economizar energia e reduzir as emissões de carbono, ou seja, o uso de VANTs para a logística do *last mile* não se resume a um custo eficaz, mas também a uma atividade ambientalmente melhor.

O uso de VANTs para a entrega de carga também já vêm sido testados e utilizados, atendendo a vários clientes, e podendo ser carregados em depósitos em toda a região de entrega

(MATHEW *et al*, 2015). Segundo DORLING *et al.* (2017), outra situação que vêm sido testada é de *hub*, onde alguns VANTs estão atrelados a um veículo de entrega convencional. Esse veículo tem a função de se movimentar até os locais predeterminados, e a partir disso, os VANTs passam a atuar, realizando as entregas a partir do veículo para cada cliente da região designada, ou seja, a entrega não é realizada pelo veículo convencional (FERRANDEZ *et al.*, 2016).

A empresa DHL realizou os seus primeiros testes com VANTs em 2013, especificamente, um quadricóptero controlado por um operador (GRIFFITH, 2013). No momento atual, está realizando entregas com VANTs para um cliente na cidade de Liaobu, na China. A rota utilizada liga a sede da DHL e as instalações do cliente que possui uma extensão de oito quilômetros, reduzindo o tempo de entrega e os custos de envio em 80% (PERALTA, 2019).

Nos Estados Unidos, a empresa Amazon realizou em 2016 a sua primeira entrega de testes com VANTs, com o objetivo de entregar mercadorias em um curto espaço de tempo para os seus clientes (PAIVA, 2020). Em 2020, a Administração Federal Americana (FAA), autorizou a Amazon a testar entregas de produtos por meio de VANTs (PALMER, 2020),

A empresa americana Zipline, cujo foco é a ajuda humanitária, vem atuando desde 2016 em Ruanda, distribuindo bolsas de sangue e medicamentos para a população em áreas remotas. Para isso, a empresa utiliza modelos de VANTs com asas fixas, semelhante a um pequeno avião (KHAZAN, 2016). Em 2021, a Zipline irá utilizar VANTs para a realização de entregas de doses da vacina do Covid 19 nos Estados Unidos (REICHMANN, 2021).

Atualmete, a pizzaria Domino's, também vem testando a entrega de pizzas por meio desse tipo de veículo na costa norte de Amsterdã (GARRENT, 2020).

Já no Brasil, em 2020, a ANAC liberou a empresa Speedbird para realizar testes de entregas com VANTs, sendo essa a única com esse tipo de autorização no país até o momento (ANAC, 2020).

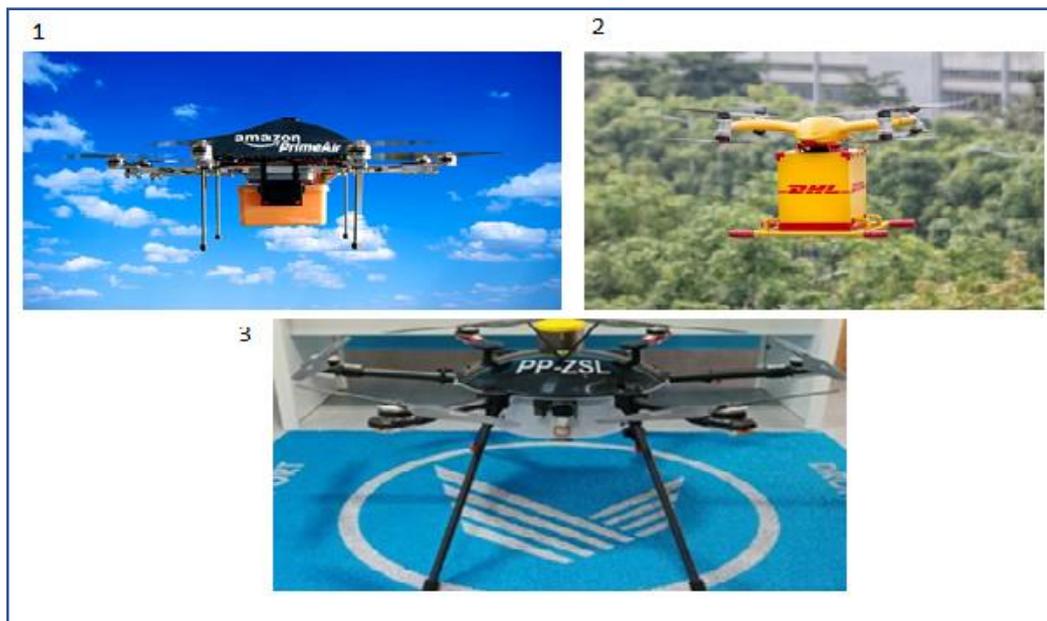


Figura 2.6 Modelos utilizados por algumas das empresas mencionadas

Legenda: 1- Modelo utilizado pela Amazon; 2 – Modelo utilizado pela DHL; 3 – Modelo utilizado pela Speedbird

3 MÉTODO

O método desenvolvido para o atendimento dos objetivos do estudo possui dez etapas, divididas em três fases. As etapas têm como objetivo demonstrar a sequência dos processos para a realização do estudo. O método foi desenvolvido a partir da revisão na literatura contemplando artigos científicos e relatórios técnicos. A Figura 3.1 apresenta o método proposto:

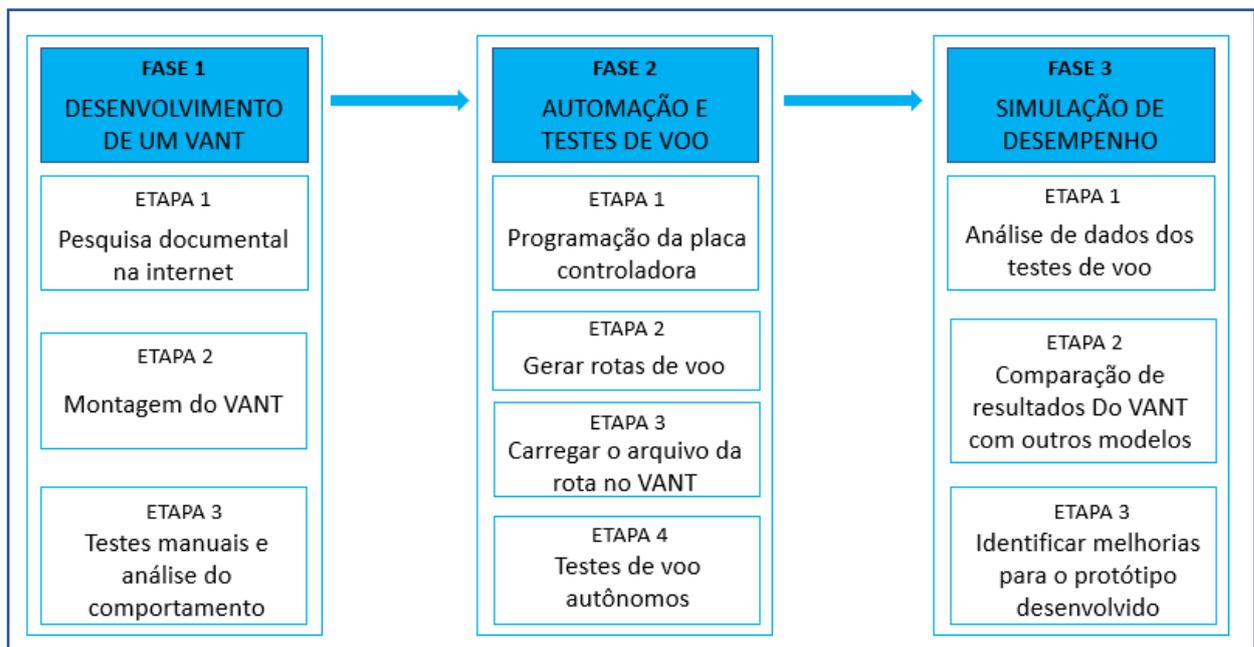


Figura 3.1 Método proposto.

3.1 FASE 1 – DESENVOLVIMENTO DE UM VANT

Nessa fase, serão apresentadas as etapas para que o VANT possa ser idealizado tomando como um ponto de partida, estudos e projetos anteriores descritos na literatura. O modelo deverá atender alguns critérios de corte, como: (i) Deve ser capaz de transportar uma caixa padrão de entrega dos correios; (ii) Atender uma distância de 500m, compatível com uma distância de distribuição de última milha dentro de um bairro a partir de depósitos locais (MARUJO, 2018); e (iii) Seu custo de montagem não deve ser superior aos modelos de mesmo porte disponíveis no mercado.

Na etapa 1, deve-se realizar pesquisas na internet, visando entender como se monta e quais peças são necessárias e as suas respectivas funções para a montagem de um VANT. Após isso, deve-se identificar possíveis fornecedores, realizar cotações, adquirir as peças e acompanhar os seus prazos de entrega.

Com base na literatura, deve-se determinar os principais componentes necessários para o funcionamento do VANT de forma autônoma. Esses componentes podem ser divididos em dois grupos: embarcados e não embarcados, ou seja, os que ficam acoplados ao VANT durante a sua operação e os que ficam em solo, respectivamente.

A etapa 2 consiste na montagem do VANT, porém, antes de iniciar a montagem, todas as peças devem ser emparelhadas para uma checagem visual, a fim de verificar as condições

delas, e se não apresentam falhas ou defeitos aparentes. A montagem inicial deve ser realizada por meio do processo de soldagem dos conectores elétricos nos componentes eletrônicos. Após o processo de soldagem realizado, a parte estrutural do VANT deve ser montada.

Na etapa 3, após a conclusão da montagem do VANT, deve ser feito uma série de testes manuais, com um operador controlando remotamente o VANT por meio de um rádio controle, com o intuito de averiguar o comportamento do VANT em voo e aferir se todos os componentes estão funcionando corretamente. Caso não esteja funcionando corretamente, deve-se identificar o(s) ponto(s) crítico(s) ou defeituoso(s) para uma intervenção e reparo no equipamento, podendo, inclusive, realizar a troca de componentes com o intuito de aumentar o desempenho do VANT e a robustez da operação.

3.2 FASE 2 – AUTOMAÇÃO E TESTES DE VOO

Essa fase tem como objetivo apresentar as quatro etapas necessárias para a realização da programação da placa de controle do VANT. Para isso, recomenda-se que a placa utilizada seja baseada na placa *Arduino*, que é uma placa de prototipagem *open source*, ou seja, de *hardware* livre. Esse tipo de placa é utilizada no desenvolvimento do VANT por possuir uma interação simples e amigável com o programador. Além disso, ela pode receber uma vasta gama de sensores como os mencionados na fase anterior.

Na etapa 1, a programação da placa de controle do VANT deverá ser realizada com o auxílio de um *software*. Foi identificado na literatura diversos programas que poderiam auxiliar nessa etapa. Neste estudo, o *software Mission Planner* foi escolhido para ser utilizado, dado que também é *open source*, bem como utiliza a linguagem C++, que é a mesma linguagem utilizada nas placas *Arduino*.

Para que o VANT seja capaz de se auto-orientar, bem como ser capaz de realizar a correção da direção e posição, caso seja atingido por uma rajada de vento forte, devem ser realizadas a programação em diversos componentes do equipamento. Essas programações consistem em: (i) especificar o tipo de *firmware* utilizado; (ii) calibrar o acelerômetro, a bússola, o rádio e os sensores de tensão da bateria; e (iii) especificar os modos de voos e os sistemas de segurança para que, em caso de perda de sinal, o VANT consiga voltar para o ponto de decolagem automaticamente.

Na etapa 2, deve-se criar um conjunto de rotas pré-estabelecidas e pré-programadas. Essas rotas deverão ter alturas de voo e extensões que atendam a legislação local, respeitando as normas de operação desse tipo de equipamento. Esse conjunto deve ser formado por diversas

rotas, cada uma com distâncias e percursos distintos entre si, visando atender diversos cenários possíveis em regiões urbanas e rurais. Além disso, para uma única rota, devem ser realizados diversos ensaios, para que haja consistência nos dados coletados.

Na etapa 3, essas rotas são sincronizadas para a placa controladora do VANT, via *data link* de rádio, que permitirá que o processo de transferência de dados do computador para o VANT seja mais rápido, e que os dados referentes a sua posição, orientação, altitude e taxa de descarga da bateria, possam ser coletados em tempo real.

A etapa 4 é iniciada após a finalização da programação, e consiste na realização dos testes de voo autônomos. Para isso, os testes deverão ser feitos em uma área ampla e aberta (com poucas árvores no entorno), bem como esta área deve ser afastada de aglomerações.

Por meio da literatura, deve-se identificar a faixa de peso das cargas de pequeno volume que possam ser normalmente transportadas por um VANT. Os testes devem ser realizados da mesma forma para cada valor da carga a bordo.

Os instrumentos de medição devem ser desvinculados aos do VANT para aferição dos dados, que devem ser comparados com os fornecidos pelo próprio VANT, por meio da sua telemetria, possibilitando aferir a coerência dos dados transmitidos, bem como se os seus sensores estão calibrados.

Os instrumentos de medição podem ser:

- cronômetro digital;
- anemômetro digital;
- termômetro digital; e
- balança digital de precisão.

3.3 FASE 3 – SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DO VANT

Essa fase tem como objetivo apresentar o tratamento de dados, bem como a comparação dos resultados de desempenho obtidos nos testes do VANT utilizado com outros modelos de VANT.

A etapa 1 consiste na avaliação da consistência dos dados gerados durante os testes de voo. A análise é realizada por meio de uma estatística descritiva dos dados coletados, considerando cada rota, com o intuito de gerar uma média e uma dispersão dos dados.

Na etapa 2, deve ser realizada a comparação com outros modelos de VANTs identificados na literatura e que sejam levantados os pontos de convergência ou divergência. Em caso de divergências negativas, segue-se para a etapa 3, em que se busca compreender tais

divergências, de modo a realizar ajustes e/ou aprimoramentos no projeto do VANT, aumentando sua eficiência, alcance e capacidade de transporte da carga útil.

4 APLICAÇÃO

Nessa seção é apresentada a aplicação do método descrito no capítulo 3.

4.1 DESENVOLVIMENTO DO VANT

Nessa fase, serão apresentados os processos de montagem do VANT, sua programação básica para voos manuais e algumas modificações em seus componentes.

4.1.1 MONTAGEM

A pesquisa das peças foi realizada por meio da busca de vídeos sobre montagem de VANTS e busca por manuais e relatórios teóricos dos componentes necessários para o seu pleno funcionamento. Com base nas pesquisas feitas, foi possível criar uma tabela com todos os componentes necessários, separando-os em embarcados e não embarcados.

O processo de verificação das peças iniciou-se no momento da entrega no Laboratório de Transporte de Cargas - LTC. Todas as embalagens das peças compradas foram abertas e foram emparelhadas para uma checagem visual, a fim de verificar as condições das mesmas e se não apresentam falhas ou defeitos aparentes. A Tabela 4.1.1 mostra os componentes embarcados e não embarcados no VANT.

Tabela 4.1.1 Componentes embarcados e em solo utilizados

Componentes embarcados	Quantidade	Componentes em solo	Quantidade
Frame	1	Computador	1
Motores	4	Receptor do Rádio	1
Controlador de Velocidade	4	Receptor de telemetria	1
Placa controladora	1	Carregador LiPo	1
GPS, bússola e barômetro	1	Motores (sobressalentes)	2
Bateria	1	Controlador de velocidade (sobressalentes)	2
Hélices	4	Hélices (sobressalentes)	12
Rádio Transmissor	1		
Antena de telemetria	1		
Câmera	1		
Trem de pouso	1		

A seguir, será mostrado na Figura 4.1.1.1 os principais componentes utilizados no projeto.

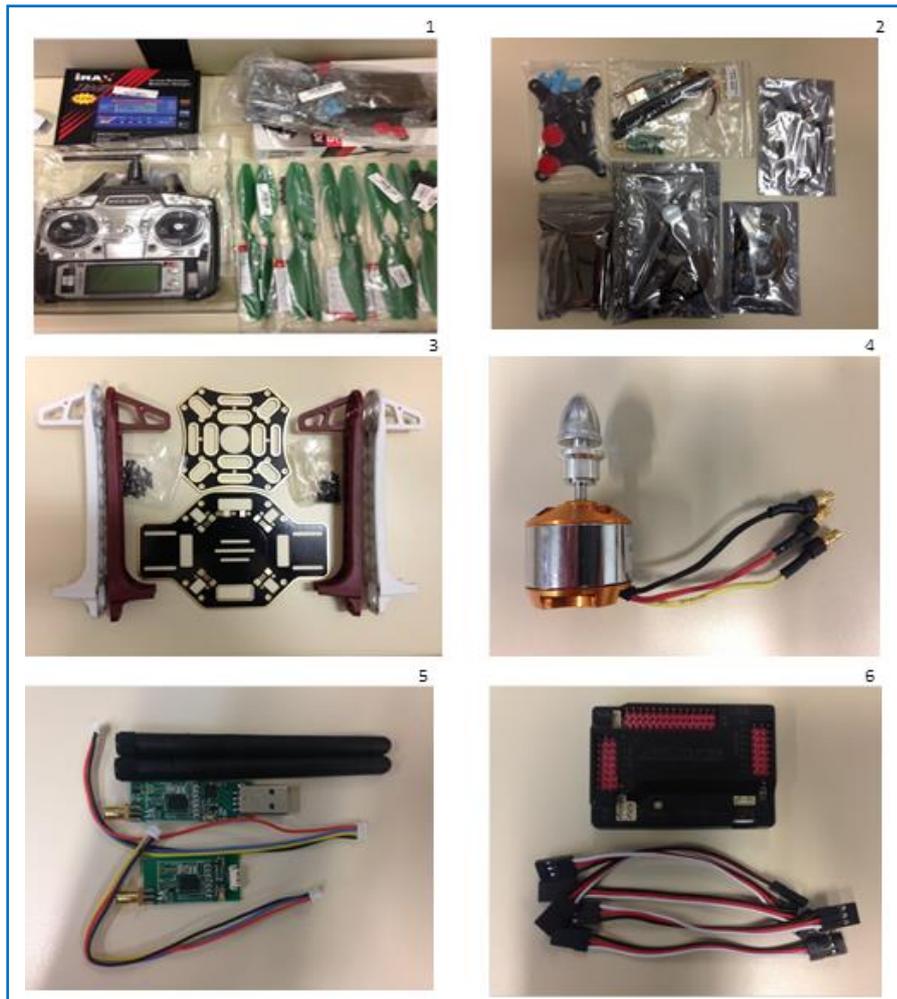


Figura 4.1.1.1 Principais componentes utilizados

Legenda: 1- Rádio controle; 2 - Placa controladora e sensores; 3 - Chassi; 4 - Motor; 5 - Antena de transferência de dados; 6 - Placa controladora

A montagem do VANT foi iniciada por meio do processo de soldagem dos conectores do tipo *bullet* nos componentes eletrônicos (controladores de velocidade e motores). Os dispositivos de controle de velocidade foram soldados nos pontos de ligação elétrica localizados no chassi de acordo com as polaridades indicadas no mesmo. Esse circuito integrado ao chassi permite uma ligação de todos os controladores ao conector XT60 fêmea ligado ao circuito, permitindo assim, uma conexão segura com a bateria utilizada.

Após a instalação elétrica dos motores e controladores eletrônicos, a placa controladora AMP 2.6 foi alocada dentro de um invólucro plástico, sendo esse, fixada na parte superior do chassi por meio de 3 camadas de fita dupla face siliconada. A fita siliconada além de garantir a fixação da placa ao VANT, tem a função de amortecer pequenas vibrações geradas devido ao funcionamento dos motores, permitindo assim, uma leitura mais estável dos dados gerados pelo acelerômetro, possibilitando um grau de estabilização mais preciso.

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é o dispositivo responsável pela localização do VANT, fornecendo as coordenadas de onde o mesmo se encontra e dos pontos inseridos na rota, possibilitando a execução da mesma durante os testes.

O barômetro, é o dispositivo responsável pela determinação da altitude do equipamento em relação ao nível do mar. Já o cálculo da altura de voo do VANT será determinado com base na diferença da leitura do barômetro no solo e na altitude estabelecida.

Por sua vez, a bússola eletrônica tem a função de determinar a orientação do VANT em relação ao polo norte magnético do planeta. Para que essa leitura seja feita da forma correta, deve-se informar para o *software* o valor atual da defasagem magnética do local.

Tanto o GPS, o barômetro e a bússola estão integrados em uma placa de circuito impresso dentro de um invólucro plástico. A fixação desses dispositivos ao VANT será feita por meio de uma haste de 15 cm e um suporte para a fixação que vieram com os sensores, permitindo que fiquem posicionados acima dos motores e controladores eletrônicos, eliminando assim as interferências eletromagnéticas na captação de dados da orientação do equipamento pela bússola eletrônica embarcada.

A telemetria tem a função de criar um *data link* ente o VANT e a estação em terra, possibilitando a troca instantânea de todos os dados de navegabilidade do equipamento, assim como o comando para novas coordenadas, modos de voo e acompanhamento do nível de tensão da bateria em tempo real. Esse equipamento será instalado ao lado da placa controladora por meio de fita dupla face siliconada na parte superior do VANT.

Todas as conexões dos sensores e dos controladores de velocidade dos motores na placa são realizadas por entradas padrões utilizados no universo da eletrônica, tornando a ligação segura e com fácil substituição em caso de troca de componentes ou consertos.

Foi utilizada uma bateria de lítio de 11.1 V 3S, sendo a nomenclatura 3S referente ao fato da bateria ser composta por três células de 3,7 V cada uma. A capacidade da bateria escolhida foi de 5000 mAh, que deverá dar uma autonomia teórica de cerca de 15 minutos de voo. Um conector XT60 macho soldado nos cabos da bateria garante a ligação correta delas no VANT. Além disso, a bateria é fixada na parte oca do chassi, permitindo assim, uma distribuição uniforme do seu peso em relação ao centro geométrico do VANT, tornando-o estável para o voo.

Por fim, as hélices foram instaladas nos respectivos motores, de acordo com o seu sentido correto de rotação para cada motor. O esquema de posicionamento e rotação pode ser visto na Figura 4.1.1.2:

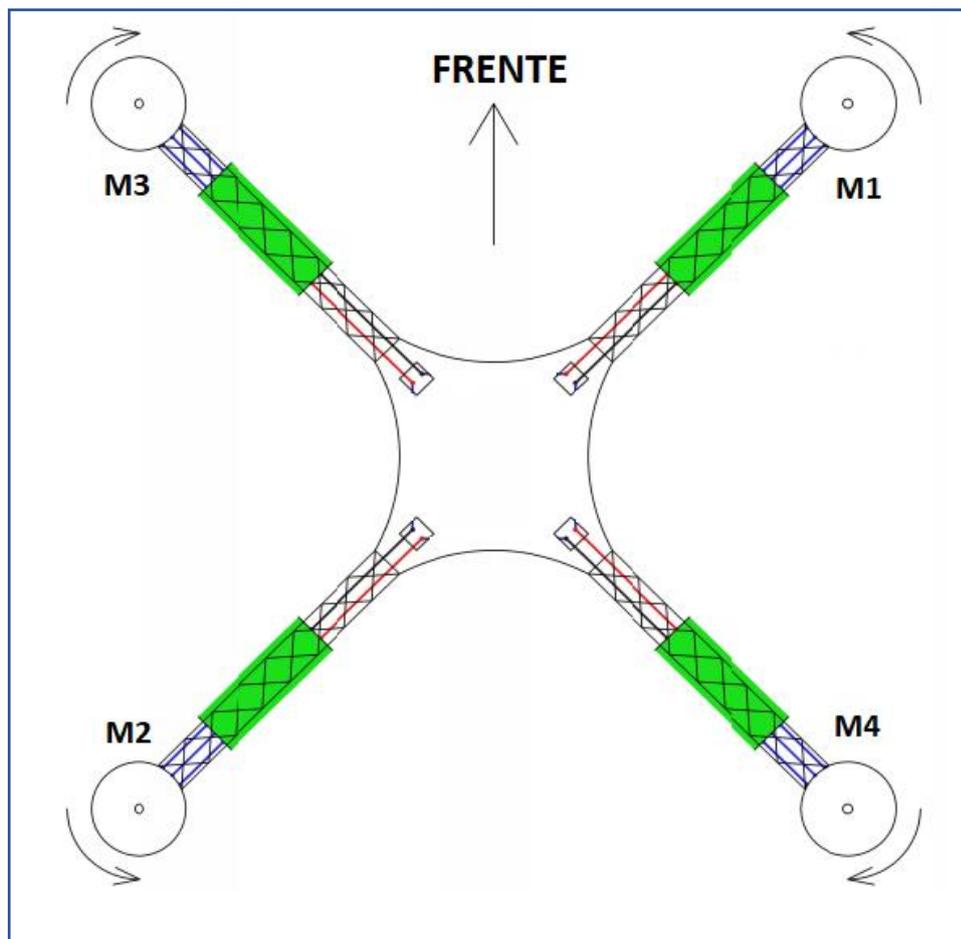


Figura 4.1.1.2 Esquema de posicionamento dos motores e os seus sentidos de rotação.

Após a montagem estar finalizada, sua placa foi conectada via cabo USB ao computador para o primeiro sincronismo e instalação do *firmware*. Em seguida, instalou-se o *software* com a configuração básica do VANT.

A Figura 4.1.1.3 ilustra o VANT montado, que possui um peso de 1404 g sem carga acoplada a sua estrutura.



Figura 4.1.1.3 O VANT com o processo de montagem concluído.

4.1.2 TESTES DE VOOS NO MODO MANUAL

Pela primeira vez, foi feita a sincronia do VANT com o controle via rádio, com isso, foi possível o controle no modo manual que será utilizado nos testes futuros, em caso de alguma pane ou perda de controle do equipamento, fazendo-o posar com segurança. Os canais do rádio devem ser postos em seus limites máximos e mínimos, para que o valor dos sinais recebidos pelo receptor do rádio, possa passar para a controladora os valores atrelados a intensidade do comando que se espera que o VANT realize.

Foi necessário adicionar um trem de pouso para fixar uma caixa padrão de entrega dos Correios ao VANT. Então, foram realizados os testes preliminares sem carga, que consistiram em voos simples para averiguar tanto a estabilidade em voo por parte do VANT, quanto o controle manual via rádio por parte do operador. Esses testes também tiveram o intuito de fornecer uma noção prévia do consumo energético, da curva de descarga da bateria utilizada e testar o sistema de telemetria, que já estava conectado e transmitindo os dados em tempo real do VANT para o computador.

No primeiro teste, o protótipo conseguiu se manter no ar por aproximadamente 16 minutos, apresentando assim um tempo de voo aceitável para o que se espera alcançar com o projeto. Os dados coletados do desempenho podem ser vistos na Figura 4.1.2.1:

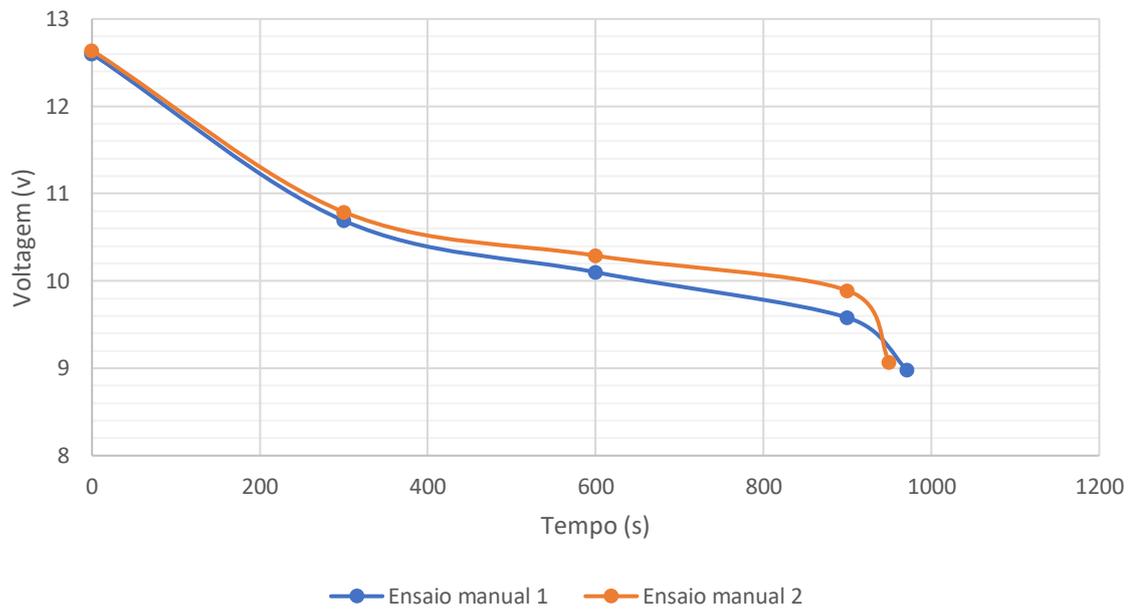


Figura 4.1.2.1 Ensaios sem carga (manual) - voltagem da bateria



Figura 4.1.2.2 – O VANT realizando voos controlados por um piloto

4.1.3 ALTERAÇÃO DE COMPONENTES

Após a primeira rodada de testes, verificou-se a necessidade da realização da troca de alguns componentes com o intuito de aumentar o desempenho do VANT e a robustez dos

motores. Dessa forma, foram adquiridos novos componentes (motores e trem de pouso) de qualidade superior aos utilizados até então no projeto.

Os novos motores adquiridos e instalados são do modelo SunnySky 2212 de 980 kV que possuem uma rotação menor do que os anteriores de 1000 kV. Isso possibilitará uma maior sustentação, aumentando a eficiência energética e o alcance do VANT.

Por fim, foi acoplado ao VANT um novo trem de pouso de fibra de vidro, capaz de suportar esforços mecânicos de maior intensidade e acoplar uma caixa padrão dos Correios para a realização dos testes de voo. A Figura 4.1.3 mostra o protótipo finalizado.



Figura 4.1.3 – Protótipo finalizado

4.2 APLICAÇÃO DA FASE 2

Para programar a placa foi utilizado o *software MISSION PLANNER*. As etapas envolvidas na programação consistem em: especificar o tipo de *firmware* utilizado, calibrar o acelerômetro, calibrar a bússola, calibrar o rádio, calibragem dos sensores de tensão da bateria, especificar os modos de voos e os sistemas de segurança para que, em caso de perda de sinal, o VANT consiga voltar para o ponto de decolagem.

O primeiro passo para a realização da programação para os voos autônomos consiste em selecionar o *firmware* correto para a geometria adotada para o VANT. Esse *firmware* vem pré-selecionado no *software* utilizado, bastando selecioná-lo pela interface do mesmo e realizar o *upload* para a placa controladora. No caso do protótipo desenvolvido, é um modelo quadricóptero com os braços em “X”. A Figura 4.2.1 mostra o modelo adotado.

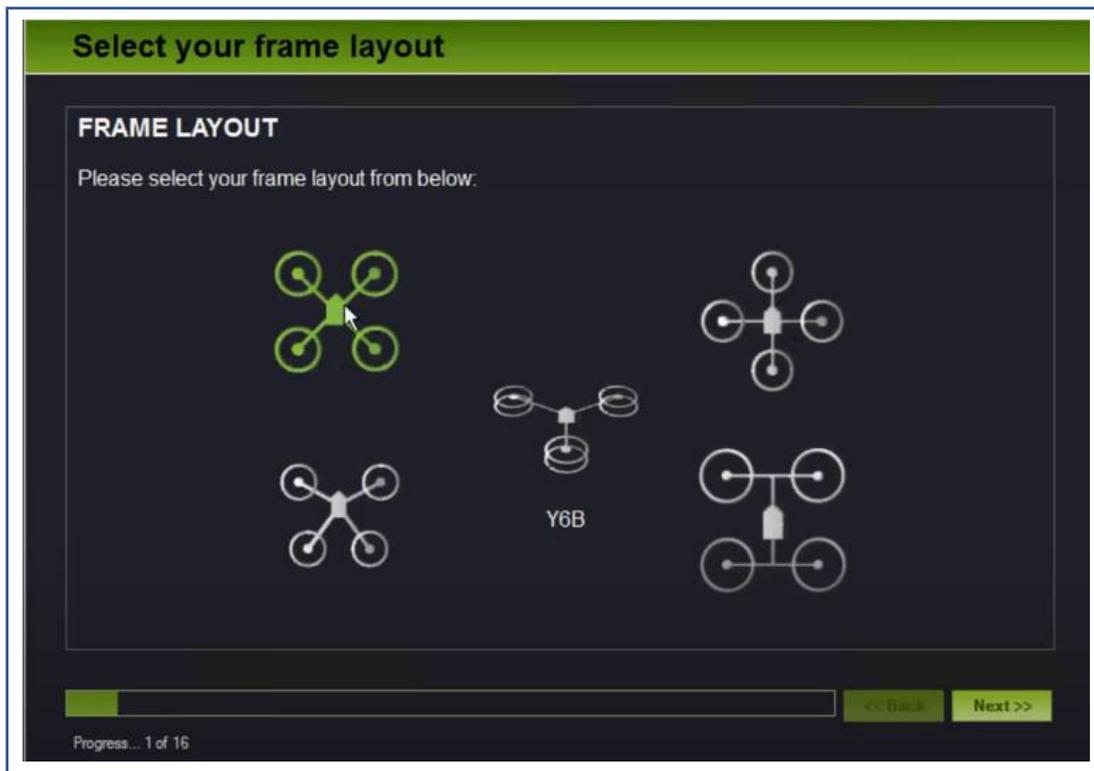


Figura 4.2.1 – Modelo do VANT selecionado para a instalação do *firmware*

O segundo passo, consiste em calibrar o acelerômetro do VANT. Para isso, o VANT deve ser apoiado em uma superfície plana em todos os eixos e direções. Em cada uma dessas posições, é registrado pelo acelerômetro um valor que indica a posição preestabelecida, e com isso, é possível determinar a orientação espacial em relação ao solo. Com isso, a controladora é capaz de interpretar em qual direção o equipamento se encontra, permitindo ajustes para manter um voo estabilizado e nivelado.

Após a calibragem do acelerômetro, terá início a calibragem do compasso ou bússola digital embarcada. Para isso, o VANT deve ser alinhado com o norte com auxílio de uma bússola. Após alinhá-lo para o norte, devemos manter a frente do VANT fixo na direção norte e rotacionar apenas a bússola no valor da declinação magnética do planeta para o local em que o equipamento se encontra, nesse caso, na cidade do Rio de Janeiro esse valor é de 22°54' (NOAA, 2020).

Tendo fixado a bússola nessa direção, deu-se início da leitura do sensor, girando o equipamento em todas as direções e eixos em 360°, para que a controladora possa se localizar e orientar no espaço. A Figura 4.2.2 mostra o processo de leitura de dados durante esse procedimento.



Figura 4.2.2 - Processo de leitura de dados durante a calibragem da bússola

A calibragem do rádio é uma das etapas mais importantes e ao mesmo tempo, mais sensível, pois é ela que permitirá a escolha dos modos de voo e uma retomada de controle do equipamento em caso de falha, perda de sinal ou desorientação por parte do VANT. Serão calibrados por meio do processo de modulação por largura de pulso (MLP), ou seja, diversas amplitudes dos sinais enviados pelo rádio, para dar o comando que deverá ser interpretado e executado pelo equipamento.

Os intervalos para determinar o modo de voo a ser utilizado em tempo real são:

- Modo *Stabilize* ou manual – 0 a 1230 MLP: controle 100% do operador, sem interferência do sistema para orientar o VANT. O sistema limita-se apenas a manter o mesmo nivelado em relação ao solo.

- Modo *Loiter* – 1231 a 1360 MLP: O sistema se encarrega de manter o VANT em uma altura constante e travado em uma posição sem interferência humana.
- Modo *Alt_Hold* – 1491 a 1620 MLP: O sistema mantém a altura a partir do comando e permite que o operador conduza o VANT horizontalmente.
- Modo *Auto* – 1621 a 1749 MLP: O sistema se encarrega de executar autonomamente toda a cadeia de comando pré-programada para a execução 100% autônoma de um plano de voo.
- Modo *Fail Safe* – > 1750 MLP: O sistema se encarrega de trazer de volta o VANT para o ponto de origem e aterrissar de forma autônoma devido uma falha.

Foram adicionadas camadas de segurança para que em caso de perda de sinal ou comunicação com o computador e o rádio controle ou do computador ou a tensão da bateria atinja os 12 V, sendo esses, os 11,1 V nominais da bateria acrescido de margem de segurança de 15% da sua capacidade (curva exponencial de descarga), o VANT irá retornar automaticamente para o ponto de decolagem e efetuar a aterrissagem autonomamente, prevenindo possíveis acidentes por falta de energia ou falta de comunicação com o operador.

O sensor de tensão da bateria pode muitas vezes vir descalibrado, gerando dados falsos sobre a real tensão entregue pela bateria. Por isso, a sua calibragem também é um dos passos mais importantes, uma vez que a leitura errada da bateria pode levar a falhas perigosas, pondo em risco a segurança das pessoas envolvidas nos testes em campo. A calibragem do sensor de tensão da bateria é realizada com o auxílio de um multímetro digital, ajustado para leitura de tensão em corrente contínua. Uma vez medida a bateria, é determinado o valor real da sua voltagem, esse valor é inserido no *software*, o qual automaticamente calibra e reajusta o valor indicado para o valor real medido.

Foram realizados testes preliminares onde o VANT percorreu rotas menores (50m), para averiguar se o equipamento estava funcionando corretamente e se o GPS estaria funcionando com um erro aceitável para guiar e retornar com o VANT para o mesmo ponto de partida. O erro mensurado foi de cerca de um metro de raio a partir do ponto de partida, o que foi considerado aceitável para prosseguir para os testes autônomos definitivos.

Os testes autônomos foram realizados de forma com que o VANT sempre realizasse a mesma rota, com o intuito de analisarmos a taxa de descarga da bateria com diferentes pesos embarcados para analisar a real viabilidade do projeto. O local escolhido para a realização dos testes de voos foi o campo do Grêmio, localizado na Ilha do fundão atrás do bloco H do Centro

de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Por questões de segurança, a altura de todos os testes foi limitada a 10 m, fazendo que o VANT não ultrapassasse a altura dos prédios ao seu redor, mantendo-o confinado dentro da área estabelecida. A rota elaborada e utilizada nos testes foi uma rota em *loop*, ou seja, o VANT fica voando percorrendo os mesmos pontos até o indicador da bateria indicar o momento de retornar. Para uma melhor visualização, a Figura 4.2.3 mostra essa rota com apenas uma volta, diminuindo o número de pontos mostrados e facilitando a visualização.

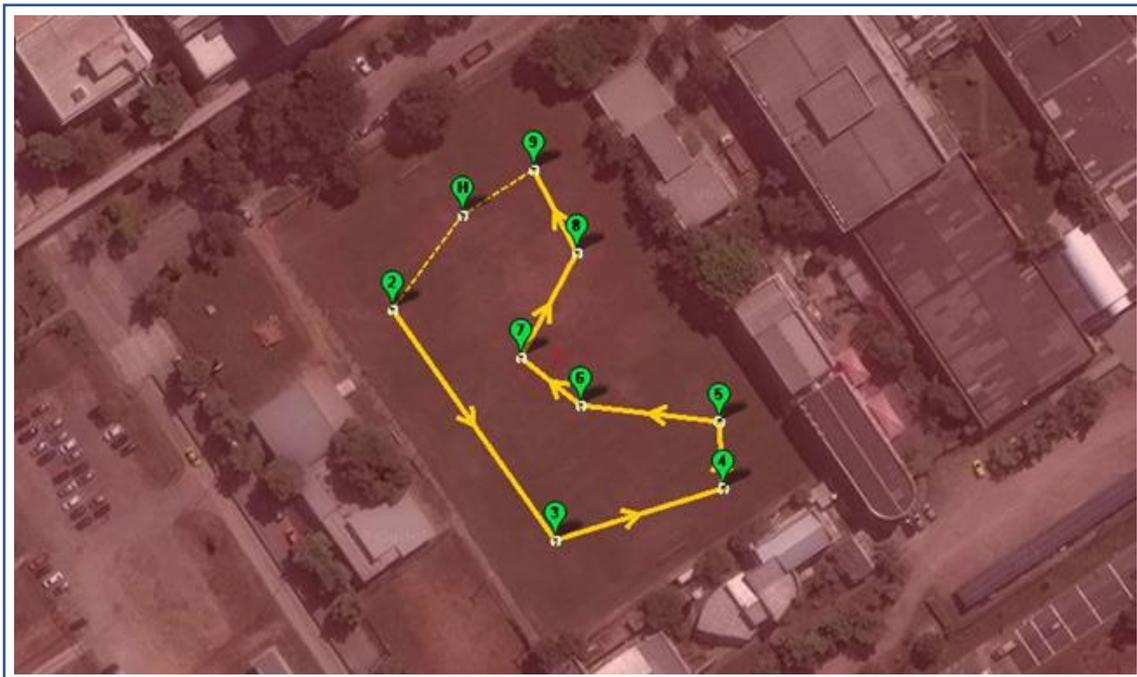


Figura 4.2.3 – Rota utilizada nos testes com 250 m de extensão por volta.

4.3 SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DO VANT

Nessa fase será feita a análise e compilação dos dados coletados durante a fase dois. Os principais dados utilizados para análise são a corrente e tensão da bateria em intervalos de tempo equivalentes a uma volta no trajeto. Com isso, foi possível determinar a potência teórica e prática para avaliar se os ensaios corresponderão com resultados fiáveis na aplicação prática.

Para a validação da leitura de dados, foram considerados como base o ensaio autônomo sem carga 1. Para o cálculo teórico da corrente utilizada nos ensaios em função do tempo pode ser dada pela Equação 1.

$$Corrente_{teórica}(A_t) = \frac{Capacidade\ da\ bateria\ (mAh)}{\left(\frac{tempo\ (s)}{3600}\right)} \quad (1)$$

$$Corrente_{teórica}(A_t) = \frac{5000\ mAh}{\left(\frac{702\ (s)}{3600}\right)} = 25,64\ A$$

O mesmo ensaio prático exigiu uma corrente de 27 A, ou seja, uma diferença de 5,3%, com isso, pode-se dizer que os sensores estão calibrados e apresentam uma faixa de perdas de eficiência e incerteza aceitável para o embasamento dos dados descritos ao longo dessa seção do trabalho.

Os ensaios foram realizados tendo os parâmetros e seus valores médios apresentados na Tabela 4.3.1.

Tabela 4.3.1 – Parâmetros médios anotados durante os ensaios de voo.

CARGA	MÊS	PERÍODO	TEMPERATURA MÉDIA (° C)	VENTO MÉDIO (m/s)
Sem carga	JAN	INÍCIO DA TARDE	29	1,7
250 g	JAN	FINAL DA MANHÃ	36	1,4
500 g	FEV	INÍCIO DA TARDE	32	1,2
750 g	FEV	INÍCIO DA TARDE	29	1,3
1000 g	MAR	INÍCIO DA MANHÃ	27	1,6

Os ensaios sem carga acoplada, foram realizados com o intuito de avaliar o desempenho do VANT na segunda metade do trajeto, ou seja, após ter entregado a carga no destino programado e estiver retornando para a origem. Os resultados dos três ensaios realizados podem ser vistos na Figura 4.3.1. Durante a realização dos ensaios foram coletadas informações como: a temperatura ambiente; velocidade do vento no nível do solo; e horário de cada voo. O apêndice I apresenta o formulário utilizado.

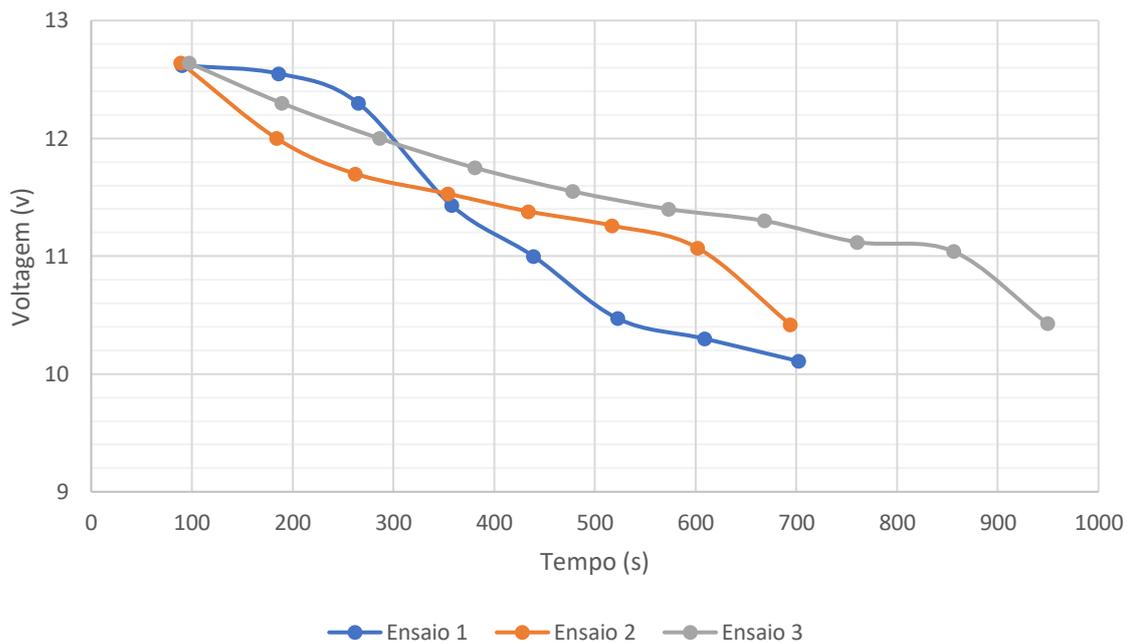


Figura 4.3.1 Ensaios sem carga - tensão da bateria

Com base na corrente fornecida pelo sensor e enviada pelo *data link*, foi possível aferir que o VANT necessitou de uma potência média ao longo do trajeto de 193 W, 195 W e 194 W para os ensaios 1, 2 e 3 respectivamente. Foi observado que o ensaio 3 teve um tempo de voo consideravelmente maior, possivelmente devido as correntes de vento na altitude de voo durante a realização do ensaio. No entanto, foi adotada a média da potência entre os três ensaios para determinar a potência necessária para realizar o voo sem nenhuma carga acoplada. Logo, a potência necessária adotada foi de 194W.

Os ensaios com carga acoplada são referentes a primeira metade do trajeto, ou seja, antes de ter entregado a carga no destino programado. Os resultados dos três ensaios realizados para cada valor de carga serão apresentados a seguir.

No teste com 250 g de carga, o VANT necessitou de uma potência média ao longo do trajeto de 245 W, 245 W e 249 W para os ensaios 1, 2 e 3, respectivamente. Com isso, será adotada a média das potências entre os três ensaios para determinar a potência necessária para realizar o voo sem nenhuma carga acoplada. Logo, a potência necessária foi de 246 W. A Figura 4.3.2 demonstra os resultados do teste de 250 g.

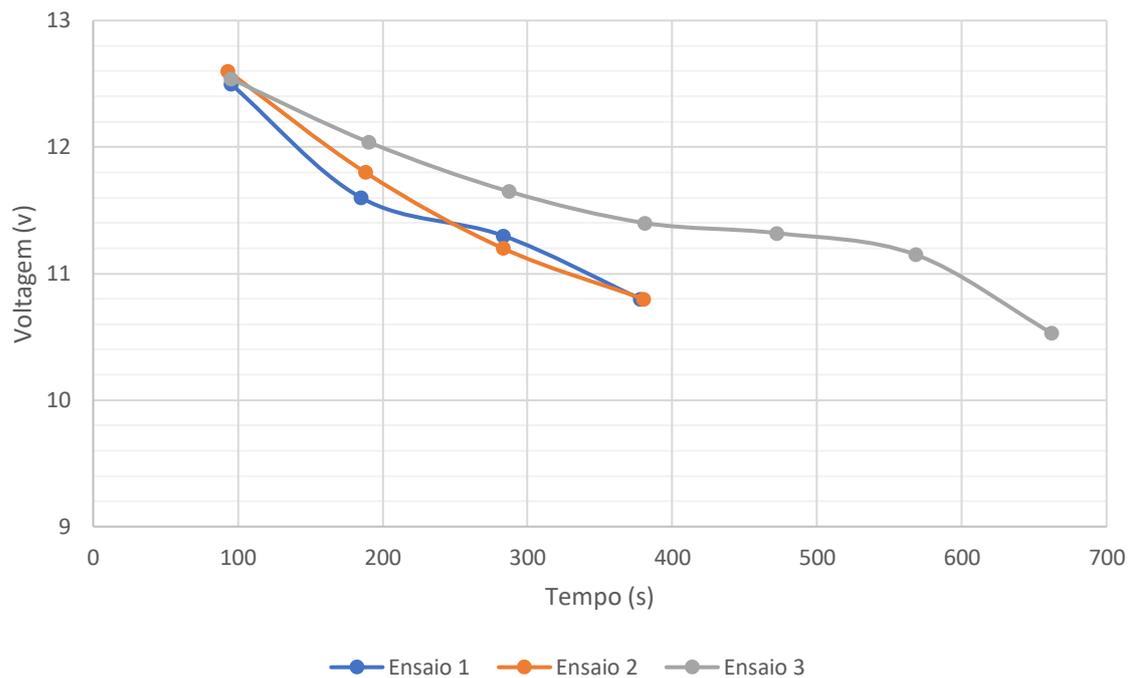


Figura 4.3.2 Ensaios com 250 g de carga - tensão da bateria

No teste com 500 g de carga a bordo, o VANT necessitou uma potência média ao longo do trajeto de 313 W, 314 W e 311 W para os ensaios 1, 2 e 3, respectivamente. Com isso, será considerada a média da potência entre os três ensaios para determinar a potência necessária para realizar o voo com 500 g de carga acoplada. Logo, a potência necessária foi de 313 W. A Figura 4.3.3 demonstra os resultados do teste de 500 g.

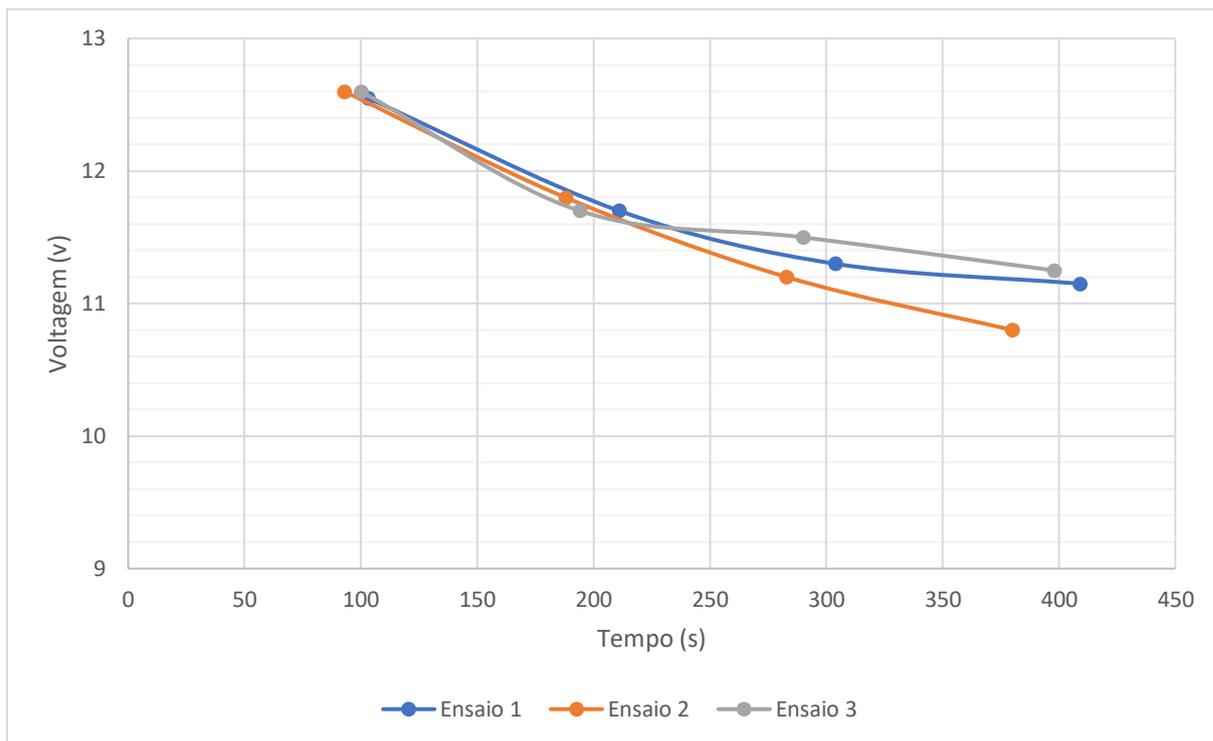


Figura 4.3.3 Ensaios com 500 g de carga - voltagem da bateria

Os ensaios com carga de 750 g e 1000 g só puderam ser realizados uma única vez, visando evitar quedas e danificar o equipamento permanentemente. Foi constatado que a curva de descarga da bateria ultrapassou o seu limite operacional.

No teste com 750 g, o VANT necessitou de uma potência média ao longo do trajeto de 321 W. Nesse ensaio, a bateria apresentou uma queda de tensão em um ritmo acima do comportamento dos testes anteriores, resultando em um resultado pouco fiável, visto a queda rápida de tensão e uma corrente não proporcional para se atingir uma potência maior esperada.

Por fim, no teste de 1000 g, apresentou uma queda de tensão ainda maior em relação ao do teste de 750 g, porém, com uma corrente inferior, resultando em uma potência de 305 W. Esse teste resultou na queda do VANT por falta de energia antes que ele pudesse aterrizar, o que torna o teste inválido para análise comparativa posterior.

Os resultados dos ensaios realizados para essas cargas podem ser vistos no Figura 4.3.4.

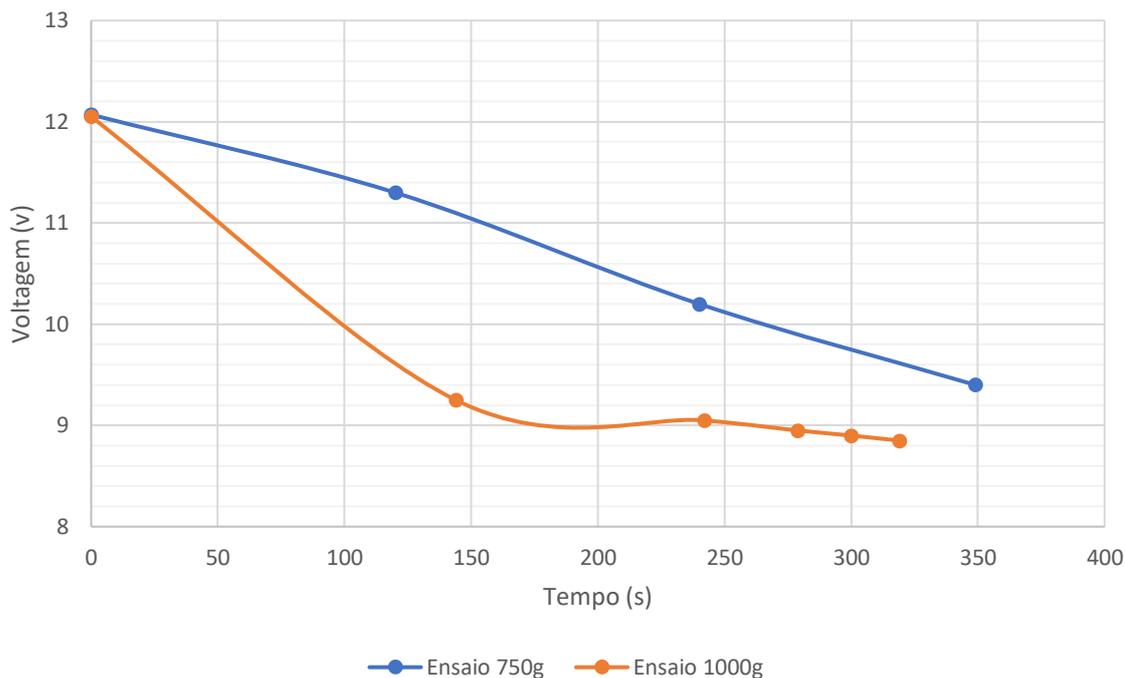


Figura 4.3.4 Ensaios com carga - voltagem da bateria

A queda de tensão abaixo dos 9 V ao longo dos testes resultaram em danos aparentes como pequenas deformações em sua geometria original. Foram feitas duas tentativas posteriores de voo com e sem carga, porém, a bateria já não apresentava o mesmo desempenho, resultando em dados muitos distintos dos já coletados. Com isso, e com o fato do uso prolongado e repetitivo nessas condições, a bateria poderia sofrer uma falha inesperada inutilizando-a repentinamente, gerando assim um potencial risco de acidente e incêndio na bateria.

Contudo, o VANT se mostrou plenamente capaz de levar 100 g por cerca de 3 minutos, mostrando que se houvesse uma segunda bateria em paralelo, ele conseguiria realizar com êxito o trajeto proposto. Os dados coletados durante todos os ensaios podem ser vistos na Tabela 4.3.2 a seguir:

Tabela 4.3.2 – Dados coletados durante os testes de voo autônomos

Carga (g)	Ensaio	Potência (W)	Pot. Med (W)	Dist. Perc. (m)	Dist. Med. Perc. (m)	Tempo (s)	Temp. Med. (s)	Velocidade Med. (km/h)
0	1	193	194	2196	2282	702	782	10,5
	2	195		2113		694		
	3	194		2537		949		
250	1	245	246	1471	1542	378	473	11,7
	2	245		1474		380		
	3	249		1680		662		
500	1	313	313	632	655	409	394	6,0
	2	314		712		375		
	3	311		621		398		
750	1	361	361	432	432	350	350	4,4
1000	1	380	380	267	613	319	319	6,9

A partir dos dados da Tabela 4.3.2, foi possível agrupar alguns desses dados e gerar gráficos relativos ao desempenho e capacidade do VANT ao longo dos testes.

A Figura 4.3.5, mostra para cada valor de carga testado, as distâncias percorridas em cada ensaio, fornecendo uma noção da autonomia do VANT para cada situação.

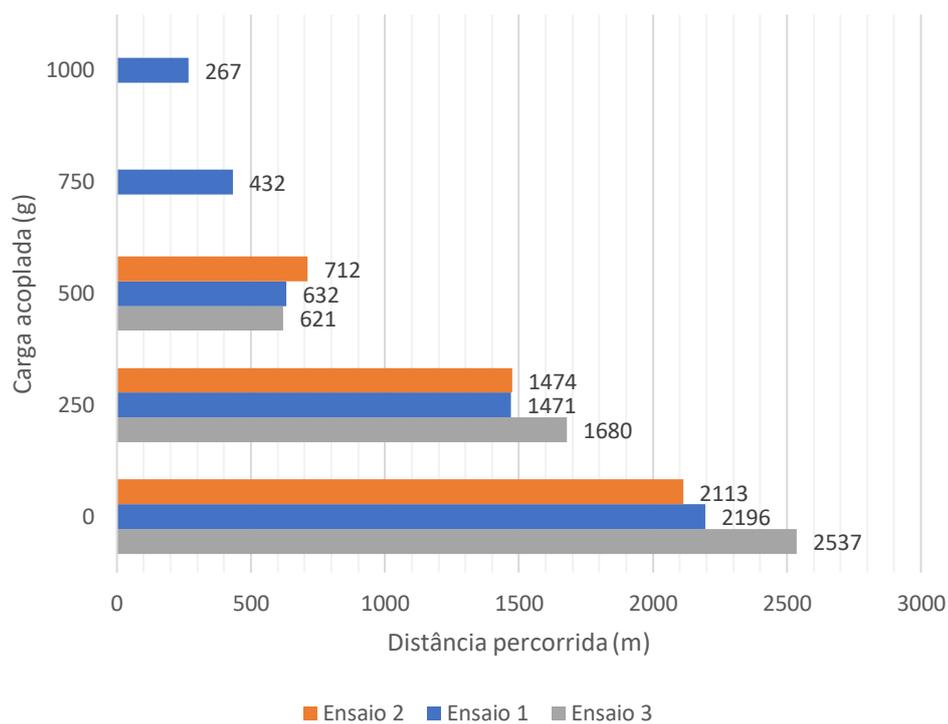


Figura 4.3.5 Carga x Distância

Figura 4.3.6, mostra a média da potência utilizada pelo VANT para diferentes cargas acopladas.

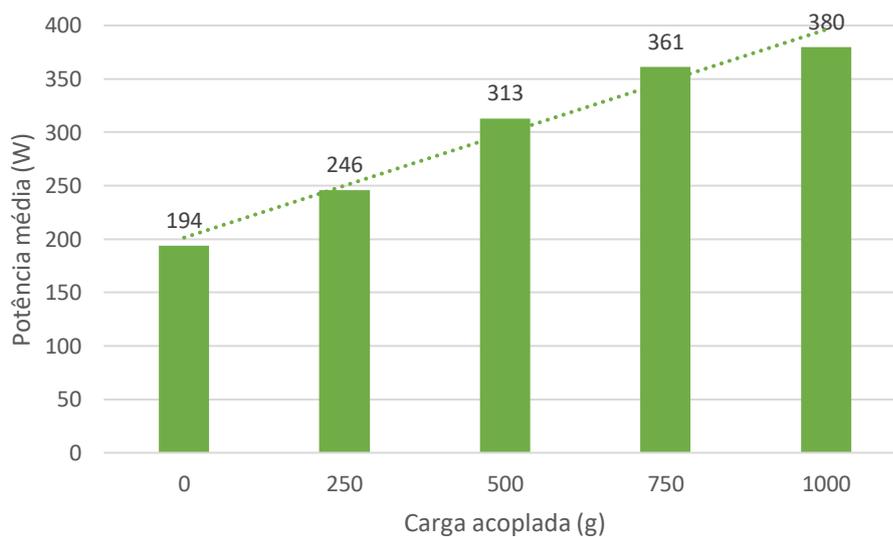


Figura 4.3.6 Potência média x Carga acoplada

A Figura 4.3.7, mostra a média das velocidades alcançadas nos testes para cada valor de carga acoplado ao VANT.

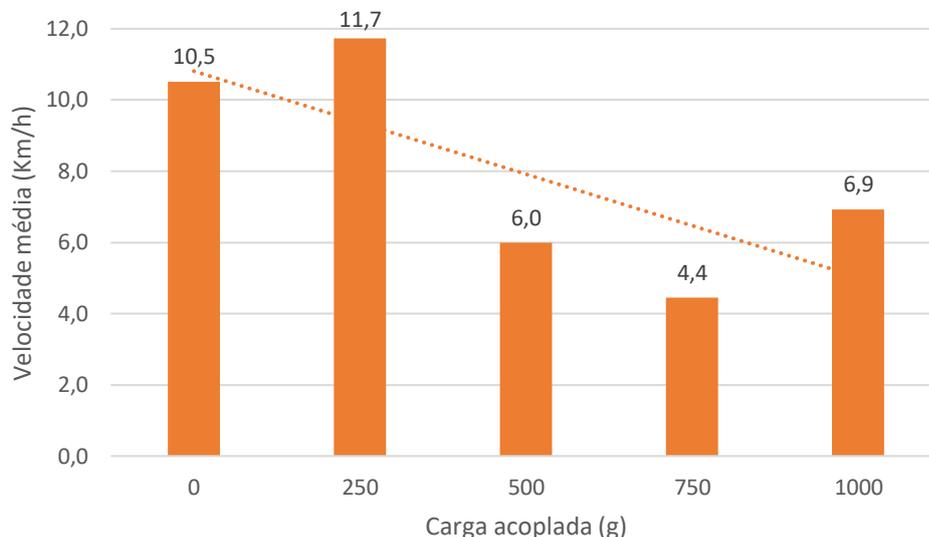


Figura 4.3.7 Velocidade x Carga acoplada

Assim, foram encerrados todos os testes e análises relativos com o protótipo desenvolvido para a execução do projeto. Na próxima seção serão apresentadas algumas comparações com outros modelos de VANTs e algumas recomendações de aprimoramentos para o projeto.

5 COMPARAÇÃO E RECOMENDAÇÕES DE NOVOS COMPONENTES

Após uma busca na literatura sobre projetos, desenvolvimentos e testes de VANTs autônomos, foi encontrado o estudo de D'ANDREA (2014), onde foram utilizados dois VANTs, o 3DR SOLO e o DJI Matrice 100 para voos autônomos. Esses modelos possuem pesos e dimensões similares ao VANT desenvolvido no presente trabalho, logo, esses serão utilizados como comparação para análise de desempenho. A Figura 5.1.1 mostra os dois modelos referidos anteriormente e a Tabela 5.1, algumas das características de cada modelo.



Figura 5.1.1 VANTs modelo 3DR SOLO e o DJI Matrice

Fonte: Amazon (2020) e Beedrines (2020)

TABELA 5.1 Dados de cada modelo de VANT

Características	3DR Solo	DJI Matrice 100	Desenvolvido
Peso (g)	2.000	2.800	1.404
Bateria (mAh / V)	5.200 / 14,8	5.700 / 22,8	5.000 / 11,1
Tempo de recarga (min)	90	180	100
Software	Python Developer kit	DJI SDK & ROS	Mission Planner
Velocidade Máxima (km/h)	20	60	40
Motores (kV)	4 × 880	4 × 350	4 × 980

Apesar dos modelos possuírem pesos distintos, ao compararmos o peso do 3DR Solo vazio com o VANT desenvolvido com a carga de 500 g, chegamos a uma equivalência nos pesos. Com isso, será possível ter uma noção sobre o desempenho entre os três modelos e se estão de acordo.

A Figura 5.1.2 apresenta os dados obtidos no estudo de D'ANDREA (2014), onde estão descritos os consumos de cada modelo em função do peso que carregam.

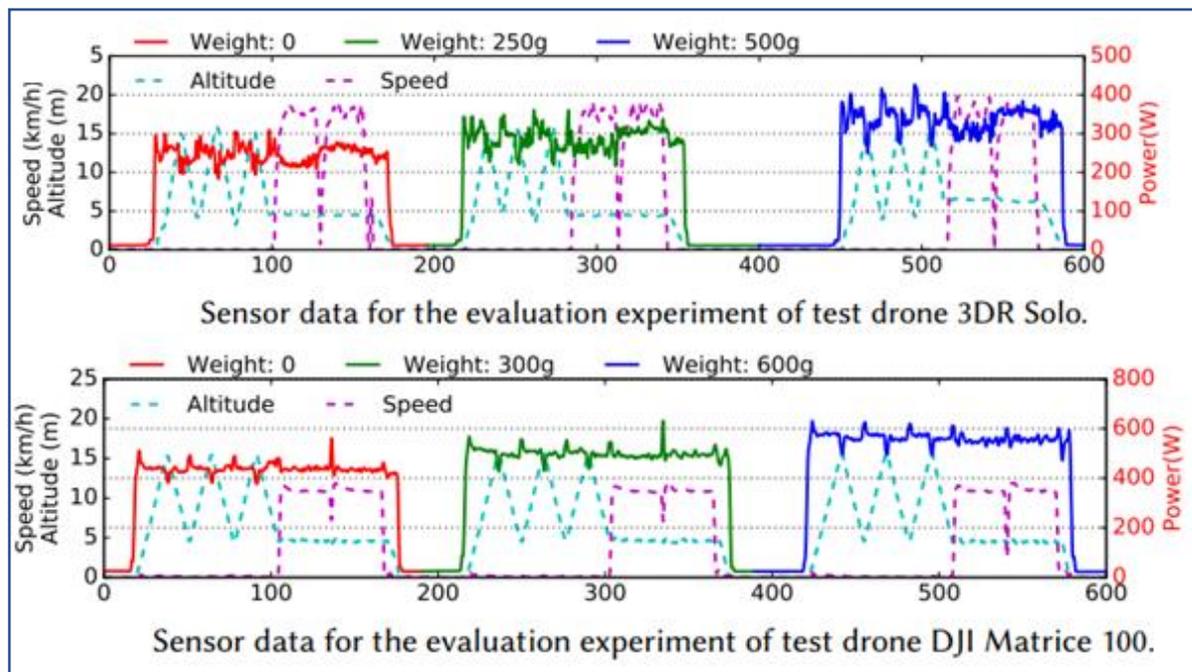


Figura 5.1.2 Dados dos VANTs 3DR Solo e DJI Matrice 100

Fonte: D'Andrea (2014)

Ao compilar os dados obtidos nos testes de forma a obter o mesmo tipo de análise apresentada acima de D'ANDREA (2014), obtivemos os seguintes dados dispostos na Figura 5.1.3:

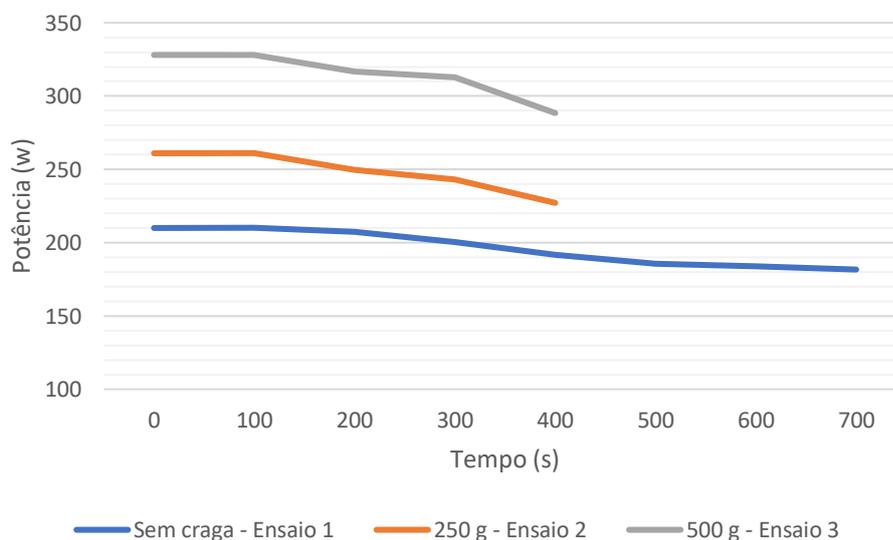


Figura 5.1.3 Potência (w) x Tempo (s)

Por fim, foi gerado a Figura 5.1.4, onde é mostrada a velocidade do VANT desenvolvido para a comparação da sua velocidade com as dos demais modelos apresentados de acordo com a Tabela 5.1:

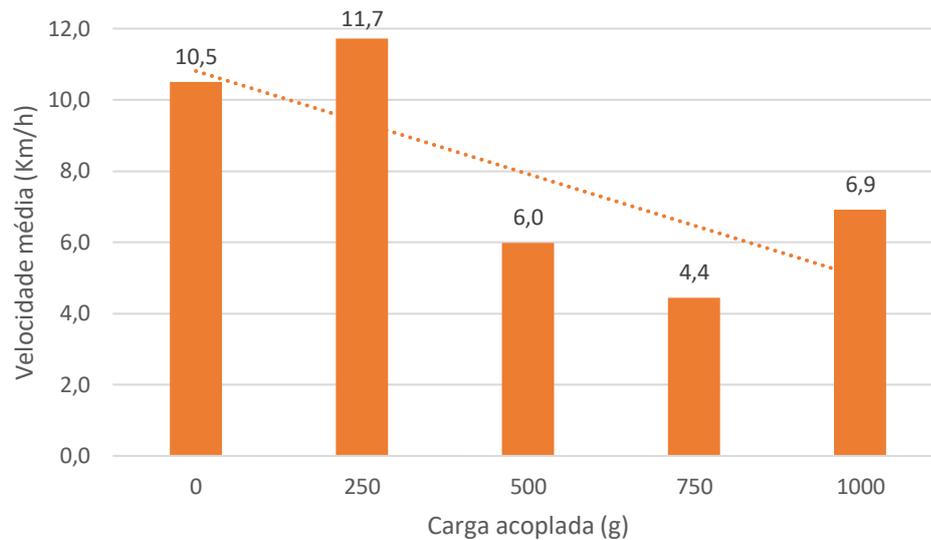


Figura 5.1.4 Velocidade x Carga acoplada

As comparações apresentadas e os testes realizados permitiram identificar pontos que possam levar a melhorias no projeto do VANT, aumentando sua eficiência, alcance e capacidade de transporte da carga útil, visando assim, estimular futuros projetos e o desenvolvimento da tecnologia e conhecimentos por outras pessoas.

Para protótipos futuros, recomenda-se mudar a geometria do chassi do VANT para uma que possibilite a instalação de mais motores como os hexacópteros ou octacópteros, pois esses permitem a fixação de dois motores em cada extremidade, podendo assim comportar 12 ou 16 motores face aos 4 utilizados nesse trabalho. O chassi também deverá apresentar uma robustez maior e ter um espaço interno maior para a instalação de duas baterias 4S com capacidade acima dos 5000 mAh, dado que conseguem entregar 14,8 V nominais, o que permite que os motores compatíveis com sua tensão apresentem rendimentos superiores aos utilizados. A instalação em paralelo de duas dessas baterias, garantirá uma autonomia maior, sendo essa não linear, pois ao dobrar a capacidade do conjunto de bateria. O ganho de capacidade energética é superior ao acréscimo de peso do equipamento, pois apenas o peso da segunda bateria seria adicionado, fazendo com que a capacidade adicionada seja utilizada na autonomia, visto que uma bateria é capaz de sustentar o voo considerando o peso do VANT e o da carga.

Ressalta-se que hoje existem no mercado chassis fabricados em materiais compósitos como fibra de carbono ou fibra de vidro, que possuem uma relação peso e resistência muito promissora. Esses materiais são amplamente empregados na indústria aeroespacial, automobilística e militar. Os motores devem possuir um kV mais baixo, sendo o kV o número

de rotação por minuto por volts aplicados ao motor. Com isso, o motor com 14,8 V apresentaram uma rotação por minuto menor que os utilizados na execução desse trabalho, porém, com uma hélice com um passo superior em relação as de rotações mais baixas, apresenta uma sustentação superior ao conjunto utilizado, representando um ganho na eficiência energética e maior capacidade de gerar empuxo.

O uso da impressão 3D também pode otimizar o conjunto como um todo. Para isso, recomenda-se a modelagem de um domo na parte superior do VANT para uma proteção extra dos componentes instalados nessa área, e a modelagem de uma carenagem aerodinâmica para a caixa dos Correios, visto que essa possui um formato de paralelepípedo, ou seja, todas as faces possuem superfícies planas, o que aumenta o arrasto do conjunto drasticamente.

Outro ponto a ser aprimorado é a instalação de um sistema eletromecânico para a desacoplagem da caixa de entrega ao chegar no destino programado, pois além de tornar o sistema de entrega 100% autônomo, protege as pessoas fazendo com que não precisem se aproximar do veículo ao realizar a entrega. Nessa etapa recomenda-se também a instalação de mecanismos de redundância físicos e digitais ao sistema, evitando assim uma interpretação equivocada por parte do equipamento que resulte na liberação da carga ainda em voo.

Por fim, a instalação de luzes de aeronavegabilidade para que pessoas em solo possam avistar o veículo a distância e evitar colisões com demais veículos aéreos como helicópteros e aviões em baixas altitudes.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo mostrar o processo de desenvolvimento de um VANT para o uso na última milha do TUC e em áreas rurais de difícil acesso por meio rodoviário. Ao longo do trabalho foram abordados os processos de aquisição, montagem, programação, procedimentos operacionais, testes e simulações comparativas com a operação de outros VANTs encontrados na literatura.

Com base nos dados obtidos na literatura, referentes a potência e ao tempo de voo, o VANT desenvolvido nesse trabalho atendeu as expectativas e obteve resultados semelhantes em relação ao seu consumo energético. Ademais, em relação a autonomia, não foi possível fazer uma comparação clara, pois o estudo buscado na literatura, possuía testes limitados a um percurso de uma única volta de 350 m, enquanto o percurso abordado nesse trabalho, fez com que o VANT voasse até o limite estabelecido para a utilização segura da bateria.

Contudo, avaliando especificamente o modelo desenvolvido, ele atingiu distâncias de 2200 m sem carga a bordo e 1500 m com carga de 250 g. Isso mostra que o modelo conseguiria atender trajetos com raios de até 700 m com segurança, considerando duas decolagens e aterrisagens. Já com uma carga de 500 g, o VANT se mostrou um pouco limitado, podendo percorrer trajetos com segurança de até 200 m de raio, nas mesmas condições.

As Figuras 4.3.5, 4.3.6 e 4.3.7 mostram que o veículo foi capaz de atuar nas condições do *last mile*, proporcionando um possível serviços de entregas rápidas a uma curta distância com cargas leves, proporcionando para a última milha do TUC, novos meios de transporte, visando uma otimização do serviço de entrega e com isso, ajudando a desenvolver regiões urbanas.

O estudo mostrou que não é complexa a parte de montagem e programação de um VANT, visto que, hoje há *softwares open source* que simplificam muito a parte complexa da programação avançada. Com isso, espera-se que o tema adquira uma interdisciplinaridade e que possa ser estudado e aplicado em diversas áreas da academia e do mercado de trabalho, de modo a incentivar novas pesquisas para novas aplicações.

O trabalho possui algumas limitações, tais como: (i) A falta de um comparativo entre outros veículos de entrega para cargas com pesos e dimensões equivalentes e/ou com veículos usualmente utilizados na última milha do TUC; (ii) A limitação da altura dos testes de voo em 10 m não abrange um cenário prático no uso cotidiano em meios urbanos; e (iii) O equipamento possui uma autonomia relativamente pequena para um uso prático, limitando os resultados para estimativa de desempenho para curtas distancias.

Isto posto, recomenda-se para trabalhos futuros, a análise comparativa com outros tipos de veículos utilizados na última milha. Com isso, será possível estimar a mitigação de CO₂ e a intensidade energética do VANT em comparação a outros meios disponíveis hoje no mercado, podendo assim, avaliar em quais cenários cada um deve ser melhor empregado. Também poderão ser desenvolvidos cenários de uso de energia e emissões de GEE e poluentes atmosféricos para avaliar o impacto da penetração de drone no transporte urbano, assim como a verificação do uso de drone em horários de pico como forma de reduzir o efeito dos congestionamentos em áreas urbanas

Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de um modelo VANT mais adequado para o transporte de carga, para que possa ser empregado em situações que atenda entregas de até 2,5 Kg com uma autonomia superior a obtida nesse trabalho. O aprimoramento de sensores, visando uma navegação mais segura e precisa por meio de GPS e transmissão de dados via rádio mais fiáveis. Isso posto, recomenda-se a utilização de um local mais amplo para a realização de testes, com percursos mais extensos e que não sejam confinados a uma área relativamente pequena.

Por fim, a escolha do local de testes, deve-se levar em conta a viabilidade da realização de testes de voos com altitudes acima das realizadas nesse trabalho. Com isso, o comportamento e desempenho do VANT poderão ser analisados em diversos cenários de ventos e transposição de obstáculos no terreno, tornando-se os testes mais fidedignos com cenários reais de aplicações práticas.

Enfim, o estudo atendeu aos objetivos propostos (geral e específicos) a um custo 40% menor do que o modelo de porte e capacidade equivalente, atendeu a distância média estabelecida de alcance, apresentado ser uma alternativa viável nos próximos anos para a realização de entregas de pequenas cargas na última milha do TUC, dado que, a tecnologia por trás do projeto de um VANT, pode ser aprimorada e certamente, tende a ser uma área de destaque nos próximos anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, J. e BROWNE, M., 2008, Review of Survey Techniques Used in Urban Freight Studies, In: Report produced as part of the Green Logistics Project: Work Module 9 (Urban Freight Transport), London, U.K.

AMARAL, D., SOUZA, A., OI, R., CARNEIRO, J. B. e SANTOS, R. M., 2014, Estudo de Roteirização de Veículos com Aplicação da Técnica de Varredura para Cargas Fracionadas, “XI Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia”.

ANAC, 2010. Disponível em: < https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_por/tr72.htm >. Acesso em 07/01/2021.

ANAC, 2014. Disponível em: < https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_por/tr717.htm >. Acesso em 07/01/2021

ANAC, 2017A. Disponível em < https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones/orientacoes_para_usuarios.pdf >. Acesso em 10/01/2021.

ANAC, 2017B. Disponível em: < <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94> >. Acesso em 10/08/2021.

ANAC, 2017C. Disponível em: < <https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones/aeronaves-nao-tripuladas-da-classe-3-com-peso-maximo-de-deco-lagem-maior-que-250g-e-ate-25-kg> >. Acesso em: 10/01/2021.

ANAC, 2018. Disponível em: < https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-021-emd-05/@@display-file/arquivo_norma/RBAC21EMD06.pdf >. Acesso em 10/08/2021.

ANAC, 2019. Disponível em: < <https://www.anac.gov.br/aceso-a-informacao/perguntas-frequentes/drones/aeronaves/o-que-sao-drones> >. Acesso em 15/01/2021.

ANAC, 2020. Disponível em: < <https://www.anac.gov.br/noticias/2020/anac-emite-primeira-autorizacao-para-entrega-de-produtos-com-drones> >. Acesso em 15/01/2021.

ARIAS, A., 2016. Disponível em: < <http://blog.droneng.com.br/vant-de-asa-fixa-componentes/> >. Acesso em 07/01/2021.

BALM, S., BROWNE, M., LEONARDI, J. e QUAK, H., 2014, *Developing an Evaluation Framework for Innovative Urban and Interurban Freight Transport Solutions*, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* v. 125, pp. 386 – 397.

BAMBURRY, D., 2015, *Drones: Designed for Product Delivery*, *Design Management Review*, v. 26, n. 1, p. 40-48.

BASSET, P. M., TREMOLET, A. e LEFEBVRE, T., 2015, *Rotary Wing UAV pre-sizing: Past and Present Methodological Approaches at Onera*, “AerospaceLab,2014”, pp. 1-12.

BHUSIRI, N., QURESHI, A. G. e TANIGUCHI, E., 2014, *Application of the Just-In-Time Concept in Urban Freight Transport*, “Procedia - Social and Behavioral Sciences” v. 125, pp. 171 – 185.

BOYNE, W. J., 2010. Disponível em: < <https://www.airforcemag.com/article/1110bombers/> >. Acesso em 06/02/2021.

BROWNE, A. e ATTLASSY, 2007, *Comparing freight transport strategies and measures in London and Paris*, “International Journal of Logistics: Research and Applications” v. 10, n.3, pp. 205-219.

CHENG, E., 2015, *Aerial Photography and Videography Using Drones*, Peachpit Press, San Francisco, CA”

CHIANG, W., LI, Y., SHANG, J. e URBAN, T., 2019, *Impact of drone delivery on sustainability and cost: Realizing the UAV potential through vehicle routing optimization*, “Applied Energy”.

CLOTHIER, R. A., GREER, D. A., GREER, D. G. e MEHTA, A. M., 2015, *Risk Perception and the Public Acceptance of Drones*, “Risk Analysis. Advance online publication”. DOI: 10.1111/risa.12330.

CRAINIC, T. N., RICCIARDI, G. e STORCHI, G., 2009, *Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems*, “Transportation Science” v.43, n.4, pp. 432-454.

DABLANC, L., 2007, *Goods transport in large European cities: difficult to organize, difficult to modernize*, “Transportation Research Part” A. v. 41, pp. 280 – 285.

DALAMAGKIDS, K., VALAVANIS, K. P. e PIEGL, L. A., 2012, *On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System: Issues, Challenges, Operational restrictions, Certification, and Recommendations, Intelligent Systems, Control and Automation*, “Science and Engineering” (vol. 54). 2nd ed. New York: Springer, pp. 305

D'ANDREA, R., 2014, *Guest editorial can drones deliver?*, July 2014 “IEEE Transactions on Automation Science and Engineering”, v.11, pp. 647 – 648.

DECEA, 2015. Disponível em: < <https://www.decea.gov.br/static/uploads/2015/12/Instrucao-do-Comando-da-Aeronautica-ICA-100-40.pdf> >. Acesso em 10/01/2021.

DORLING, K., HEINRICHS, J., MESSIER, G. e MAGIEROWSKI, S., 2017, *Vehicle routing problems for drone delivery*, “IEEE Trans Syst, Man, Cybernetics: Syst” 47(1):70–85.

EMMANOUIL, N. B., VLAHOGIANNI, E. I., GOLIAS, J. C., 2016, *Unmanned Aerial Aircraft Systems for transportation engineering: Current practice and future challenges*.

EPE, 2020. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#:~:text=A%20matriz%20el%C3%A9trica%20brasileira%20%C3%A9,Brasil%20vem%20de%20usinas%20hidrel%C3%A9tricas.&text=Aprendemos%20com%20o%20gr%C3> >

%A1fico%20que,contr%C3%A1rio%20da%20matriz%20el%C3%A9trica%20mundial. >. Acesso em 05/01/2021.

FERRANDEZ S. M., HARBISON T, WEBER T., STURGES, R., e ROBERT, R., 2016, *Optimization of a truckdrone in tandem delivery network using k-means and genetic algorithm*, “J Ind Eng Manage”, 9(2):374–88

GARRENT, F., 2020. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/2020/06/empresa-testa-delivery-com-drones-entregando-pizzas-na-praia-entenda.ghtml> >. Acesso em 08/01/2021.

GRIFFITH, S., 2013. Disponível em: <<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2520818/DHL-tests-delivery-drone-airborne-robots-used-deliver-medicine.html>>. Acesso em 08/01/2021.

GTA, 2019. Disponível em: <<https://www.gtalevantamentos.com.br/asa-fixa-ou-multirotor-principais-diferencas/> >. Acesso em 07/01/2021

HUANG, Y., THOMSON, S. J., HOFFMANN, W. C., LAN, Y. e FRITZ, B. K., 2013, *Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management*, “International Journal of Agricultural and Biological Engineering”, vol. 6, no. 3, pp. 1–10.

ICAO, 2011. Disponível em: <https://www.icao.int/meetings/uas/documents/circular%20328_en.pdf >. Acesso em 09/01/2021

JOERSS, M., SCHRÖDER, J. e NEUHAUS, F., 2016, *How customer demands are reshaping last-mile delivery*, “McKinsey & Company”.

KHAZAN, O., 2016. Disponível em: <<https://www.theatlantic.com/technology/archive/2016/04/a-drone-to-save-the-world/476592/> >. Acesso em 08/01/2021.

LINDHOLM, M. e BEHRENDTS, S., 2012, *Challenges in urban freight transport planning – a review in the Baltic Sea Region*, “Journal of Transport Geography” v. 22, pp. 129–136.

LINDHOLM, M. e BEHRENDTS, S., 2012, *Challenges in urban freight transport planning – a review in the Baltic Sea Region*, “Journal of Transport Geography” v. 22, pp. 129–136. Doi:10.1016/j.jtrangeo.2012.01.001.

MARUJO, L. M., GOES, G. V., D’AGOSTO, M. A., FERREIRA, A. F., WINKENBACH, M., BANDEIRA, R. A. M., 2018, *Assessing the sustainability of mobile depots: The case of urban freight distribution in Rio de Janeiro*, “Transportation Research part D”.

MATHEW, N., SMITH, S. L, WASLANDER, S. L., 2015, *Planning paths for package delivery in heterogeneous multirobot teams*, “IEEE Trans Autom Sci Eng”, p.1298–308.

NAÇÕES UNIDAS, 2019. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701> >. Acesso em 28/12/2020.

NAÇÕES UNIDAS, 2020. Disponível em: < <https://news.un.org/pt/story/2020/12/1735882> >. Acesso em 28/12/2020.

NOAA, 2020. Disponível em: < <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml> >. Acesso em 09/01/21.

PAIVA, V., 2020. Disponível em: <<https://www.hypeness.com.br/2020/09/drone-delivery-da-amazon-esta-a-apenas-um-passo-de-ser-lancado/> >. Acesso em 08/01/2021.

PALMER, A., 2020. Disponível em: < <https://www.cnbc.com/2020/08/31/amazon-prime-now-drone-delivery-fleet-gets-faa-approval.html> >. Acesso em: 18/02/2021.

PERALTA, B., 2019. Disponível em: < <https://noardrone.com.br/lancamentos/3444/> >. Acesso em 08/01/2021.

PRICE WATERHOUSE COOPERS, 2016. Disponível em: < <https://www.pwc.pl/pl/pdf/clarity-from-above-pwc.pdf> >. Acesso em : 08/08/2021

REICHMANN, K., 2021. Disponível em: < <https://www.aviationtoday.com/2021/02/04/zipline-drones-deliver-covid-19-vaccines-us/> >. Acesso em 23/03/2021.

ROUMBOUTSOS, A., KAPROS, S., e VANELSLANDER, T., 2014, *Green city logistics: systems of innovation to assess the potential of E-vehicles*, “Research in Transportation Business & Management”, 11, 43-52.

SANGYOUNG, P., ZHANG, L. e CHAKRABORTY, S., 2017, *Battery Assignment and Scheduling for Drone Delivery Businesses*, “Chair of Real-Time Computer Systems, Technical University of Munich, Germany”

SHAKHATREH, H., SAWALMEH, A., FUQAHA, A., DOU, Z., ALMAITA, E. KHALIL, I. e OTHMAN, N., 2019, *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges*.

SOUZA, C. O., DAGOSTO, M. A., BANDEIRA, R. A. M., e POMBO, I. R., 2020, *Soluções para o transporte urbano de cargas na etapa de última milha*, “urbe, Rev. Bras. Gest. Urbana” vol.12 Curitiba.

UBIRATAN, E., 2015. Disponível em: < https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/origem-dos-vant_1907.html - aeromagazine 2015 >. Acesso em : 06/02/2021

VALAVANIS, K. P., VACHTSEVANOS, G. J, 2015, “*Handbook of Unmanned Aerial Vehicles* “UAV Autonomy: Introduction.”, 1(Chapter 144), pp.1723–1724.

VASZARY, Z., 2014. Disponível em: < <https://www.dronethusiast.com/uav-regulations-around-the-world/> >. Acesso em 10/01/2021

VILELA, L. O., PENNISI, R., ARANTES, T. e RODRIGUES, W. F., 2013, *Transporte Urbano De Cargas: reflexões à luz da geografia dos transportes*, “Revista Eletrônica de Geografia” v. 5, n. 14, p. 103- 120.