



Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para mapeamento da saúde de vegetações

Projeto de Graduação

Departamento de Engenharia Mecânica

Aluno: Bernardo Craveiro Bezerra

Matrícula: 1111172

Orientador: Arthur Braga

Coorientador: Ivan Menezes

Rio de Janeiro, 03 de Dezembro de 2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a meu orientador, Arthur Braga e ao meu coorientador Ivan Menezes por terem aceitado me auxiliar na elaboração deste projeto. Sua tutoria foi fundamental para a realização deste trabalho. Fico muito grato de ter tido a possibilidade de trabalhar em conjunto com mentes tão brilhantes.

Ao grupo de pessoas que tive o prazer de conhecer e que possibilitaram a execução deste trabalho. Raphael Gonçalves, Luis Fernando e Eduardo Dutra agiram como fornecedores de conhecimento e equipamentos do mundo dos *drones*. Sem nenhum exagero, este projeto só foi possível devido a enorme paciência e boa vontade desses indivíduos.

Agradeço a minha família, que sempre me apoiou em todas as minhas iniciativas e acreditou no meu potencial desde os meus primórdios acadêmicos. Minha mãe, meu pai e minha irmã tiveram um papel fundamental na concretização deste momento tão importante para nós e, sinceramente, não acredito que palavras seriam suficientes para demonstrar a minha gratidão.

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao meu falecido avô materno, Aníbal Craveiro, que infelizmente não pôde assistir à chegada desse momento tão especial. Tutor e amigo em diversos momentos da minha vida, ele sempre me apoiou quando necessário, me criticou quando precisei e, principalmente, me ensinou que a melhor forma de viver a vida é proporcionando amor ao próximo. Espero um dia ser metade do homem que ele foi.

Devo reconhecer o papel importante que Maria Francisca exerceu na minha vida. Como “segunda” mãe, me ensinou muito sobre fidelidade, caráter, esforço e fé. Soube me criticar

quando foi necessário e me apoiou sempre que precisei. Se hoje sou esse indivíduo, devo uma grande parte a essa pessoa maravilhosa.

À minha namorada, Giovanna, que todo dia me apoia para que eu seja não só uma pessoa melhor, mas um profissional mais capacitado. Dias tiveram que ser dedicados aos estudos e ela sempre me apoiou. Não tenho como ser mais grato pela sorte que tenho de tê-la ao meu lado.

Além das pessoas citadas, devo um enorme agradecimento aos meus amigos que me incentivaram, estudaram comigo, deram dicas sobre matérias e vivenciaram as dificuldades associadas a faculdade de engenharia mecânica comigo. Graças a eles, alavanquei minha capacidade de aprendizado e obtive resultados acima da média.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer a todas as pessoas que, de alguma maneira, me influenciaram e auxiliaram a chegar nesse momento tão especial. Sei que devo a todos e espero, com toda a sinceridade, ter a oportunidade de um dia retribuí-los.

RESUMO

Este projeto consiste no desenvolvimento de um dispositivo eletromecânico que seja capaz de voar e, além disso, consiga determinar a saúde de uma vegetação a partir de imagens aéreas oriundas de uma câmera específica para esse tipo de tarefa.

Para o desenvolvimento do protótipo serão utilizados quatro motores elétricos, um micro controlador, quatro controladores eletrônicos de velocidade (ESCs), quatro hélices e a estrutura que sustentará o dispositivo eletromecânico será construída a partir de técnicas de otimização topológica com auxílio de uma impressora 3D.

Palavras-Chave: Impressão 3D, *drone*, VANT, otimização topológica, agricultura, vegetação

ABSTRACT

The main objective of this project is to develop an electro-mechanical device that is capable of flying and, through the help of a special camera, determine the vegetation's health of farms.

The development of this device will require four electric motors, a microcontroller, four electronic speed controllers (ESCs), four propellers and the structure that will sustain it. This structure will be built from topological optimization techniques with the help of the manufacturing process from a 3D printer.

Keywords: 3D printing, innovation, drones, UAV, topologic optimization, agriculture, vegetation.

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Objetivo e motivação	1
1.2 Metodologia	1
2. Contextualização da tecnologia	3
2.1 VANTs (Veículos aéreos não tripulados).....	3
2.2 Quadricóptero.....	3
2.3 Aplicações.....	4
3. Fundamentação Teórica.....	7
3.1 Impressora 3D.....	7
3.1.1 Conceito e história.....	7
3.1.2 Filamento	8
3.2 Mapeamento da saúde da vegetação	10
3.2.1 Câmeras NIR – Infravermelho próximo.....	10
3.2.2 Sensoriamento Remoto.....	11
3.2.3 NVDI	12
3.3 Estrutura mecânica	15
3.4 Motor	16
3.4.1 Tipos de motores	16

3.4.2	KV	17
3.5	Hélices.....	17
3.5.1	Explicação física	17
3.5.2	Tipos de hélices	19
3.5.3	Balanceamento de hélices	19
3.6	Controlador eletrônico de velocidade.....	20
3.7	Controlador de voo.....	20
3.7.1	Conceito	20
3.7.2	Sensores.....	21
3.8	Bateria.....	22
3.8.1	Composição Química	22
3.8.2	Capacidade	22
3.8.3	Taxa de descarga.....	22
3.8.4	Montagem	23
4.	Projeto	24
4.1	Critérios do projeto.....	24
4.2	Componentes.....	25
4.2.1	Bateria	25
4.2.2	Motor	26

4.2.3	Hélice	28
4.2.4	Câmera	31
4.2.5	Micro controlador.....	32
4.2.6	Controlador Eletrônico de Velocidade – ESC	33
4.2.7	Estrutura	34
4.3	Autonomia prevista.....	36
5.	Teste de campo	40
6.	Otimização estrutural	44
6.1	Informações mecânicas sobre o filamento utilizado	44
6.2	Ensaio de tração	45
6.3	Análise estrutural	50
6.4	Otimização topológica.....	53
6.4.1	Conceito	53
6.4.2	Aplicação da OT no braço do protótipo	54
6.5	Resultado final	54
7.	Sugestão de melhorias	56
8.	Conclusão.....	58
9.	Bibliografia	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de um quadricóptero [1].....	4
Figura 2 - Impressora 3D e objetos impressos por ela [2].....	8
Figura 3 - Carro cujas partes foram manufaturadas a partir da técnica de impressão 3D [3].....	8
Figura 4 - Filamentos de diferentes cores [4]	9
Figura 5 - Câmera NIR produzida pela empresa Teledyne [5]	10
Figura 6 - Sensoriamento remoto [6]	11
Figura 7 - Classificação da saúde da vegetação de acordo com as bandas refletidas [7]	13
Figura 8 - Mapeamento da saúde de uma vegetação em Oregon, EUA [8]	14
Figura 9 – Braços e <i>frame</i> central [9].....	15
Figura 10 - Configurações de um quadricóptero [10]	16
Figura 11 – Hélice [11].....	18
Figura 12 - Sentido de rotação das hélices de um quadricóptero [12].....	19
Figura 13 - Ilustração de um balanceador de hélices [13].....	20
Figura 14 – Bateria [14]	23
Figura 15 - Bateria utilizada na construção do protótipo [15]	25
Figura 16 - Motor DYS D2830-14 utilizado no protótipo [16]	27
Figura 17 - Informações técnicas do motor utilizado [17]	27
Figura 18 - Modelos de hélices disponíveis	28
Figura 19 - Experimento para balancear as hélices.....	29
Figura 20 - Experimento para estimar a força de sustentação proporcionada pelo movimento rotativo da hélice.....	30
Figura 21 - Câmera utilizada na construção do protótipo [18]	31
Figura 22 – APM 2.6 [19]	32
Figura 23 - APM Mission Planner [20]	33
Figura 24 - ESC utilizado no protótipo [21]	33
Figura 25 - Impressora 3D utilizada para construção da estrutura [22]	34
Figura 26 - Braço sendo construído na impressora 3D.....	35
Figura 27 - Braços do VANT	36
Figura 28 - Protótipo montado.....	41
Figura 29 – Fotografias realizadas pelo protótipo durante o voo	42
Figura 30 - Teste de campo.....	43
Figura 31 - Ensaio de tração na máquina Instron	46
Figura 32 - Curva Tensão x Deformação do plástico ABS.....	47
Figura 33 - Módulo de Elasticidade do plástico ABS	48
Figura 34 - Limite de escoamento do plástico ABS.....	49
Figura 35 - Aproximação estrutural do braço do quadricóptero.....	51
Figura 36 - Processo de Otimização Topológica de uma peça.....	53
Figura 37 - Resultado da otimização topológica bidimensional.....	54
Figura 38 – Braço otimizado do quadricóptero	55

Figura 39 - Peça produzida a partir do filamento T-Glase [23]	57
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios utilizados na elaboração do protótipo	24
Tabela 2 - Resultado do experimento para escolha da melhor hélice.....	31
Tabela 3 – Especificações técnicas da bateria.....	36

LISTA DE SÍMBOLOS

K_v	Constante do motor	$\frac{rpm}{v}$
d	Diâmetro da hélice	m
P	Passo	$\frac{voltas}{polegada}$
E	Módulo de Elasticidade	MPa
S_e	Limite de Resistência ao escoamento	MPa
S_r	Limite de Resistência a Ruptura	MPa
RA	Redução de Área	—
L	Comprimento	m
w	Largura	m
H	Altura	m
M	Massa	kg

y	Entalpia específica	m
I	Momento de inércia de área	m^4
b	Comprimento da base	m
h	Altura	m
P	Pressão	Pa
T	Tempo	s
V	Voltagem	V
I	Corrente elétrica	A
D	Densidade de energia	$\frac{Wh}{kg}$
E_e	Empuxo específico	$\frac{G}{W}$
E_{tm}	Empuxo total médio	G
E_f	Energia fornecida pela bateria	Wh
A	Autonomia	min

Letras gregas

ω	Velocidade Angular	$\frac{rad}{s}$
σ	Tensão	MPa
ε	Elongamento	$\frac{mm}{mm}$

1. Introdução

1.1 Objetivo e motivação

O objetivo geral deste trabalho é, através do auxílio de uma impressora 3D, desenvolver um veículo aéreo não tripulado (VANT) otimizado e capaz de mapear o estado de saúde de uma vegetação.

1.2 Metodologia

O presente trabalho é constituído de oito capítulos que visam detalhar todo o processo de desenvolvimento e construção de um veículo aéreo não tripulado. Nos parágrafos adiante, o escopo de cada capítulo será brevemente apresentado.

O capítulo 1 se resume à descrição do que este projeto propõe e o motivo para a escolha deste tema. Pretende-se nesta seção, apresentar ao leitor as razões que me levaram a explorar esse assunto.

O segundo capítulo pretende apresentar e contextualizar a tecnologia dos veículos aéreos não tripulados. O objetivo desta seção introdutória é tornar o leitor mais familiarizado com tema

No capítulo 3, serão apresentados os principais componentes utilizados na construção e montagem do veículo aéreo de uma forma mais genérica. Além de apresentar os componentes, seus mecanismos de funcionamento serão devidamente explicados nesta seção.

O capítulo quatro revelará o critério de projeto e a escolha dos componentes do protótipo. Neste capítulo, também serão analisadas as características do veículo.

No quinto capítulo, o protótipo será levado a campo e a experiência de voo será analisada e detalhada.

Durante o sexto capítulo, será realizada uma tentativa de otimização estrutural do VANT de acordo com a técnica de otimização topológica. Todo o procedimento será escrito detalhadamente neste tópico.

O sétimo capítulo terá o objetivo de pontuar melhorias que poderiam ser feitas no protótipo a partir dos resultados obtidos na experiência de voo. A intenção deste tópico é fornecer as informações necessárias ao leitor de modo a auxiliá-lo na construção de futuros projetos que possuam um escopo similar a este trabalho de conclusão de curso.

Finalmente, no oitavo capítulo, uma conclusão será escrita com o intuito de ressaltar os principais pontos abordados durante a elaboração deste trabalho.

2. Contextualização da tecnologia

2.1 VANTs (Veículos aéreos não tripulados)

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs), também chamados de UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*) podem ser definidos como aeronaves que não requerem a presença de um piloto embarcado para ser controlada, ou seja, são veículos operados remotamente por meios eletrônicos e computacionais.

Frequentemente, o nome *drone* é associado aos VANTs. Esses veículos utilizam hélices para voar e o barulho oriundo do movimento das hélices é similar ao som de um zangão (significado de *drone* em português). No entanto, existe uma distinção entre essas duas nomenclaturas que merece ser ressaltada. O termo VANTs se refere a veículos utilizados de maneira comercial e profissional, enquanto que um *drone* se trata de uma aeronave utilizada para recreação, sendo considerado um aeromodelo pela legislação brasileira.

Logo, visto que o protótipo desenvolvido nesse projeto visa ter uma aplicação profissional – mapear a saúde da vegetação de uma fazenda – ele será referenciado como um veículo aéreo não tripulado (VANT).

2.2 Quadricóptero

O quadricóptero, figura 1, é uma aeronave de asas rotativas, composto de quatro motores e capaz de utilizar hélices de elevação fixa que, em conjunto, possibilitam a sua sustentação em voo. A configuração mais típica é a instalação dos propulsores em uma estrutura em forma de X com os equipamentos necessários para operação no centro de massa da mesma.



Figura 1 - Exemplo de um quadricóptero [1]

O quadricóptero possui diversas vantagens perante um helicóptero convencional, com destaque para a facilidade de implementação do conjunto mecânico, o fato de possuir propulsores de dimensão menor, possibilitando a locomoção em espaços reduzidos e a maior manobrabilidade e estabilidade dinâmica, desde que baseado em um projeto confiável. Este tipo de veículo tem capacidade de decolagem e aterrissagem vertical e seu posicionamento depende apenas da variação de velocidade dos quatro motores.

2.3 Aplicações

Devido a sua capacidade de sobrevoar em locais que dificilmente seriam acessados por um humano e por um preço muito mais atrativo que a utilização de um avião (alternativa para este tipo de serviço), veículos aéreos não tripulados têm sido utilizados em diversos setores da indústria como: construção civil, agricultura, óleo e gás, filmagens, etc.

De acordo com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO)¹, o Brasil assumirá a liderança das exportações mundiais do setor agrícola em 2024. Dessa forma, acredita-se que esse segmento tem um potencial enorme de absorver novas tecnologias, dentre elas, a utilização de VANTs.

Após a realização de um mapeamento via livros, notícias, entrevistas e outras fontes, descobriu-se que existem inúmeras aplicações para um veículo aéreo não tripulado no segmento agrícola. A seguir, algumas das principais utilidades deste veículo serão explicitadas:

- Inspeccionar terrenos, pedras e mapear obstáculos
- Determinar a saúde da vegetação
- Detectar danos à clorofila
- Impulsionar crescimento da plantação através de voo com luz noturna
- Analisar o perfil do vento
- Inspeccionar concentrações de metano, amônia e gás carbônicos
- Determinar o perfil de cobertura vegetal
- Determinar a qualidade da água
- Estimar a topografia
- Avaliar o plantio (qualidade, topografia, etc.)

¹ Fonte: <http://www.visaoagro.com/-!Brasil-será-maior-exportador-agrícola-mundial-em-2024-dizem-OCDE-e-FAO/c1nni/559566910cf28e6871292bb2>

- Localizar formigueiros
- Determinar perfil de temperatura e pressão barométrica da plantação
- Monitorar a concentração de nitrogênio

Devido ao grande número de aplicações deste veículo elétrico na agricultura, tornou-se necessário estabelecer uma maneira de entender melhor as demandas de fazendeiros. Acredita-se que o melhor método de entender os desejos do mercado seja conversando com seus atores. Dessa forma, optou-se por conversar com profissionais que estivessem diretamente relacionados com o setor agrícola e que soubessem dos problemas recorrentes encontrados em plantações.

Diversas pessoas foram cruciais nessa etapa de realização de entrevistas. Encontros foram realizados com o pesquisador Otniel Freitas (EMBRAPA), alguns donos de fazenda de Vitória (Espírito Santo), Cascavel (Paraná) e Natal (Rio Grande do Norte). De uma maneira geral, todos eles pontuaram um problema que ansiavam por uma solução: a **determinação das áreas dentro de uma fazenda em que fertilizantes precisariam ser utilizados de modo a manter a vegetação saudável.**

Normalmente, quando se acredita que a plantação não esteja rendendo o esperado, fertilizantes são utilizados, de maneira não otimizada, em toda a extensão da fazenda ou em grande parte de seu território. O grande problema disso é que investimentos significativos na compra de fertilizantes precisam ser feitos, resultando em gastos enormes para o proprietário do terreno.

Assim, é possível concluir que existe uma oportunidade em destinar os VANTs ao mapeamento da saúde da vegetação de uma plantação. A partir deste mapeamento, o proprietário

teria fundamentos para determinar os locais que realmente precisam de fertilizantes, gerando um ganho financeiro significativo para o agricultor.

3. Fundamentação Teórica

3.1 Impressora 3D

3.1.1 Conceito e história

Impressão 3D é uma forma de tecnologia de fabricação aditiva² onde um modelo tridimensional é criado através da deposição de camadas sucessivas de material.

A primeira impressora 3D foi inventada por Chuck Hull em 1984 e devido a proteção intelectual de sua tecnologia não houve um avanço significativo das tecnologias de impressão 3D.

No entanto, no ano de 2014, muitas patentes que limitavam o desenvolvimento de possíveis modelos de impressora 3D expiraram e, conseqüentemente, muitas empresas surgiram com o intuito de explorar e desenvolver a tecnologia.

² Fabricação aditiva é o processo de criar objetos sólidos tridimensionais a partir de modelos digitais.



Figura 2 - Impressora 3D e objetos impressos por ela [2]

Através da deposição de materiais em uma superfície, as impressoras 3D podem criar miniaturas de personagens, porta-lápis, bonecos, suportes, entre muitos outros objetos.



Figura 3 - Carro cujas partes foram manufaturadas a partir da técnica de impressão 3D [3]

3.1.2 Filamento

Atualmente, impressoras 3D já conseguem contemplar diferentes tipos de materiais. No entanto, os modelos mais comuns costumam trabalhar com apenas dois tipos de materiais: o PLA e o ABS. A seguir, eles serão explicados em maiores detalhes:

- I. **PLA** ³ : O filamento plástico PLA (poliácido láctico) é um material totalmente biodegradável, produzido a partir de fontes naturais como milho e cana de açúcar. Apesar de ele originar impressões de maior qualidade, o PLA precisa ser protegido da umidade.
- II. **ABS** ⁴ : O material mais comum utilizado em impressoras 3D é o plástico ABS. Derivado do petróleo, este material é formado por acrilonitrila, butadieno e estireno. Esse material é bastante rígido, leve, tenaz e relativamente barato (R\$ 120 – 180 por Quilograma de filamento)

Através da impressão, estes materiais conseguem gerar objetos com uma vasta gama de propriedades e que podem ser usados em peças moldadas como dutos, peças de automóveis, eletrodomésticos, bagagens, equipamentos esportivos, barcos, brinquedos (blocos de Lego).



Figura 4 - Filamentos de diferentes cores [4]

³ PLA é uma abreviação para *Polyactid Acid*.

⁴ ABS é uma abreviação para *Acrylonitrile Butadiene Styrene*.

3.2 Mapeamento da saúde da vegetação

3.2.1 Câmeras NIR – Infravermelho próximo

O termo NIR é derivado da expressão em inglês *Near Infrared* cujo significado em português é infravermelho próximo. O espectro de frequências referente ao infravermelho próximo não é visível a olho nu para o ser humano, no entanto, existem câmeras que são capazes de capturar imagens nessa banda de frequência: as câmeras NIR.



Figura 5 - Câmera NIR produzida pela empresa Teledyne [5]

A partir das imagens provenientes desse tipo de câmera, é possível avaliar como está a saúde de uma determinada vegetação. Essa análise depende de dois outros conceitos que serão explicados a seguir: o **Sensoriamento Remoto** e o **Índice de Vegetação por Diferença Normalizada**.

3.2.2 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é uma ciência que estuda a interação dos objetos em solo com a energia eletromagnética radiada pelo sol. Essa energia é emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima do zero absoluto. Na figura 6, pode-se verificar a energia eletromagnética do solo sendo capturada pelo satélite

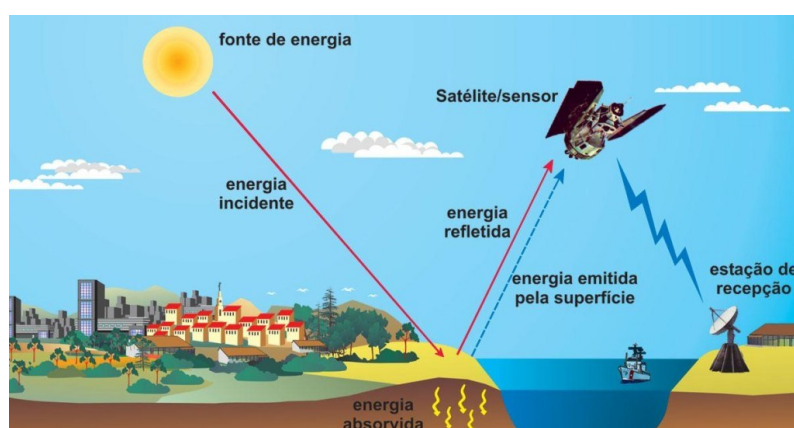


Figura 6 - Sensoriamento remoto [6]

Através de estudos em sensoriamento remoto, pode-se determinar em qual banda de frequência determinado objeto pode ser avaliado. Nestes estudos, concluiu-se que a vegetação teria uma resposta melhor na banda infravermelha.

Apesar das câmeras NIR conseguirem captar imagens na banda mencionada, ainda é preciso avaliar a resposta da vegetação e determinar se esta se encontra saudável ou não. Para isso, pesquisadores desenvolveram uma equação denominada *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

3.2.3 NVDI

Uma imagem normal é composta das seguintes bandas: vermelha, verde e azul (RGB). A equação NVDI Sabemos que uma imagem “comum” é a composição das bandas vermelha verde e azul (RGB), portanto, temos a banda vermelha que denominaremos de (V), também já sabemos que uma câmera é capaz de capturar imagens na banda infravermelha próxima que denominaremos de (IVP).

A equação NVDI foi desenvolvida por Comptor Tucker em 1977 – cientista da NASA – e descrita no seu artigo “*Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation*” e possui a seguinte forma:

$$NVDI = \frac{NIR - VIS (verde)}{NIR + VIS (verde)} \quad (1)$$

Onde NIR representa imagens na banda infravermelha próxima (700 a 1300 nm) e VIS, na banda visível, ou seja, a vermelha (400 a 700 nm).

No documento científico elaborado por Tucker, revelou-se que folhas de plantas saudáveis não possuem uma grande capacidade de absorver feixes na banda infravermelha próxima, resultando em uma reflexão de uma quantidade significativa de luz na banda NIR. Plantas que estão sob um nível de estresse, tendem a absorver mais a banda NIR, promovendo índices menores de reflexão.

Para uma determinação mais concreta da saúde da vegetação, leva-se em consideração o espectro visível. Pigmentos de clorofila presentes nas plantas conseguem absorver

consideravelmente ondas de energia de comprimento 650 nm (vermelha) e 450 nm (azul) para a realização da fotossíntese. Dessa forma, a cor predominantemente refletida quando comparada à vermelha e azul, é a verde, justificando o fato de enxergarmos as plantas sob o efeito dessa pigmentação. Vegetações que não estão em um estado saudável, possuem menos clorofila e consequentemente não possuem o mesmo poder de absorção desse espectro visível (efeito mais notado sobre a cor verde). Assim, além de refletir ainda mais a cor verde (tornando a folha mais clara), a falta de saúde da vegetação pode trazer um aspecto amarelado a fisionomia da planta, em virtude de uma maior reflexão das ondas vermelhas e azul.

Portanto, monitorando o nível de reflexão das bandas infravermelho próxima e visível, é possível determinar como se encontra o estado de saúde da vegetação, como ilustrado na figura a seguir:

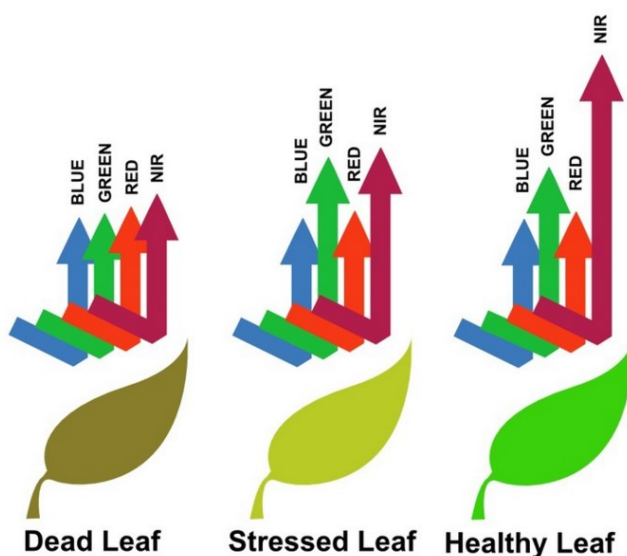


Figura 7 - Classificação da saúde da vegetação de acordo com as bandas refletidas [7]

A figura demonstra que não existe variação na reflexão das cores vermelho e azul. Essa aproximação é feita, pois, quando comparadas a cor verde, a variação da reflexão das cores vermelhas e azul pode ser desprezada. Isso justifica o fato de a equação NVDI levar em consideração apenas a cor verde.

Pode-se tomar como exemplo prático, uma plantação de soja localizada no estado de Oregon vítima de uma tempestade de granizo. Um voo foi realizado para verificar a situação do plantio. Essa análise foi realizada a partir de uma câmera NIR e as áreas mais afetadas pelo temporal foram identificadas através da equação NVDI. O resultado pode ser observado na figura a seguir:

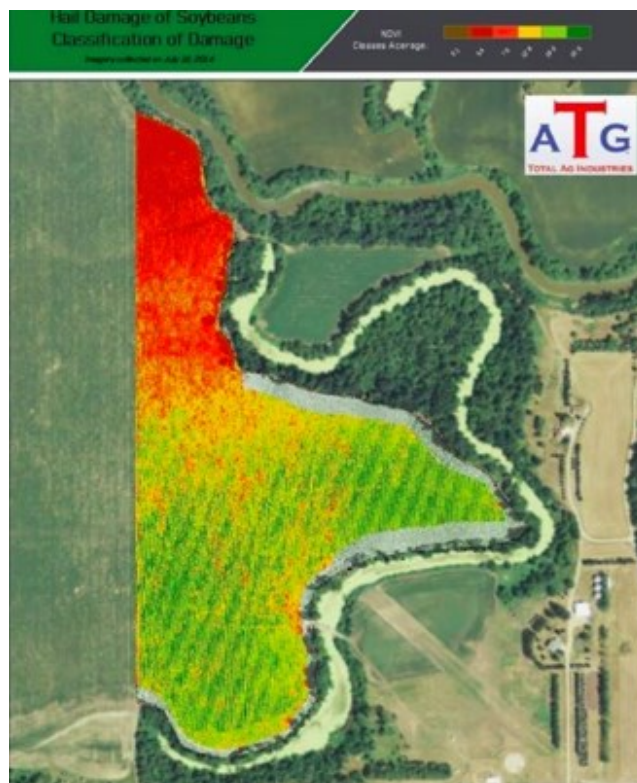


Figura 8 - Mapeamento da saúde de uma vegetação em Oregon, EUA [8]

O mapeamento foi feito de modo a identificar em vermelho a área mais atingida pela tempestade de granizo. De acordo com o produtor e dono da fazenda, o norte da plantação realmente foi o local mais afetado pelo fenômeno, comprovando a aplicabilidade da equação NVDI.

3.3 Estrutura mecânica

Um quadricóptero é caracterizado por possuir 4 braços e cada um deles deve estar conectado a um motor em uma extremidade e a um frame central na outra.



Figura 9 – Braços e *frame* central [9]

A frente deste tipo de VANT pode estar localizada entre dois braços (configuração e “X”) ou ao longo de um dos braços (configuração em “+”). Ambos os possíveis modelos estão ilustrados na figura a seguir:

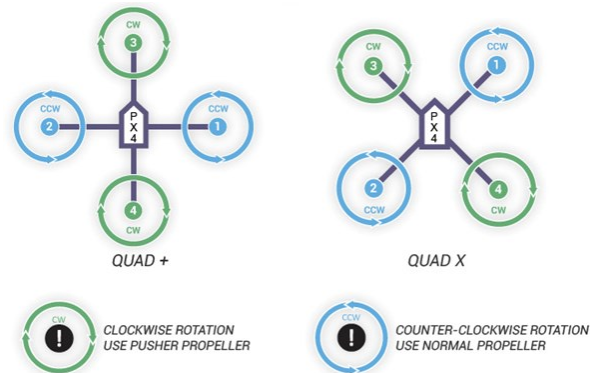


Figura 10 - Configurações de um quadricóptero [10]

3.4 Motor

Os motores utilizados em um VANT terão um grande impacto no peso da carga que poderia ser transportado e no tempo de autonomia durante o voo e por isso sua escolha é de extrema importância para o projeto de um quadricóptero.

3.4.1 Tipos de motores

Motores de corrente direta (DC) são universalmente utilizados em aeromodelos. Os tipos mais comuns de motor DC são os escovados e os sem escova.

1. **Escovados (*brushed*):** Motores escovados dependem do contato físico de escovas de metal para trabalhar e, justamente por isso, estão sujeitos a uma perda de eficiência devido ao atrito e ao desgaste proporcionado por essa ação.
2. **Sem escova (*brushless*):** Por não precisarem trabalhar com escovas, esses motores não sofrem tanta influência do atrito, esquentando menos e, conseqüentemente, conseguindo trabalhar em velocidades de rotação maiores. Dessa forma, motores sem escova são os mais difundidos no aeromodelismo. Além disso, esses motores produzem menos ruído.

3.4.2 KV

O parâmetro “KV” remete ao número de voltas que um motor faz por minuto (RPM) por voltagem aplicada. Dessa maneira, pode-se chegar a conclusão de que quanto maior o KV, maior a velocidade de rotação e, conseqüentemente, menor o torque.

A maioria dos motores de VANTs utilizam um KV baixo (algo em torno de 500 a 1000 rpm/V por exemplo) visto que isso acarreta em uma maior estabilidade. Para voos que envolvam acrobacias, um KV mais adequado está na ordem de 1000 a 1500 rpm/V.

3.5 Hélices

3.5.1 Explicação física

O movimento das hélices é quem gera a propulsão necessária para o voo do quadricóptero. O material com que elas são feitas possuem um impacto moderado sobre as características de voo:

- a) **Plástico:** devido ao seu baixo custo, características de voo decentes e durabilidade razoável, este material representa a escolha mais comum para multirrotores, entretanto, ao sofrer acidentes, essas hélices são facilmente danificadas.
- b) **Polímero reforçado com fibras:** uma hélice reforçada por fibras (carbono, nylon, etc.) é a melhor tecnologia para o voo de um multirroto. No entanto, devido à sua dificuldade de fabricação, esse tipo de hélice tende a ser mais caro.
- c) **Natural:** mais utilizadas para aviões, hélices feitas de materiais naturais como a madeira requerem uma certa engenharia para a sua produção, o que eleva o seu custo. A vantagem

é que madeiras são mais tenazes e não fletem com tanta facilidade quanto uma hélice feita de plástico.

Basicamente, as hélices podem ser especificadas por dois parâmetros:

- D: diâmetro de giro, dado em polegadas
- A: ângulo de ataque, dado em voltas para subir 1 polegada

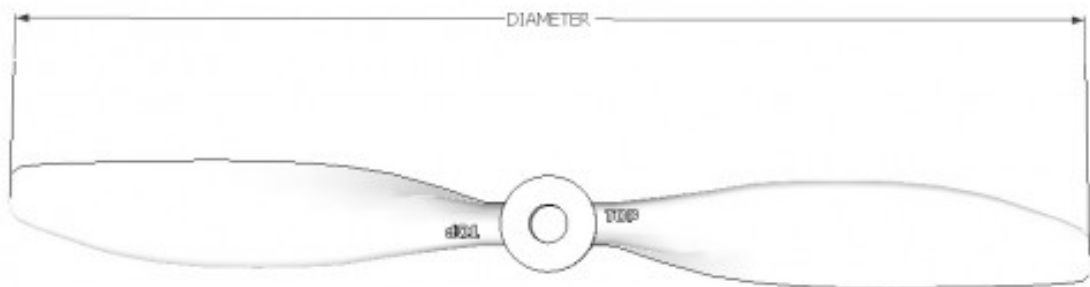


Figura 11 – Hélice [11]

Além disso, o fabricante precisa especificar o sentido de giro da hélice, ou seja, se ela é CW (clockwise – sentido horário) ou CCW (counter clockwise – sentido anti-horário). O primeiro tipo de hélice aplica uma força de sustentação para baixo se girar no sentido horário enquanto o segundo faz o inverso.

Essas características específicas da hélice são muito importantes, pois, no caso de um quadricóptero, a diferença no sentido da rotação faz com que os torques resultantes gerados pelos motores sejam nulos.

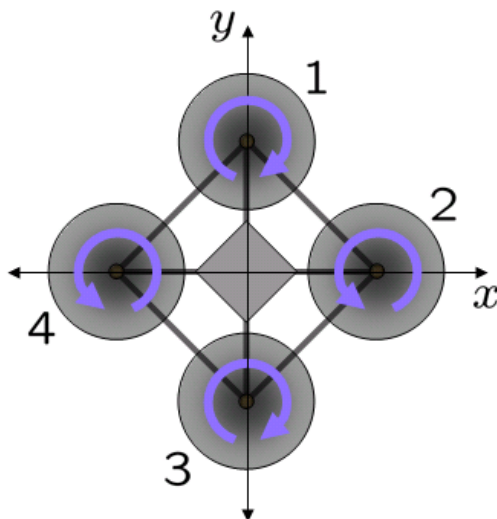


Figura 12 - Sentido de rotação das hélices de um quadricóptero [12]

3.5.2 Tipos de hélices

A escolha das hélices precisa ser feita de maneira que garanta uma eficiência energética de forma a maximizar o tempo de voo. Normalmente, hélices utilizadas em quadricópteros são caracterizadas como hélices de voo lento. Algumas marcas de hélices estão muito presentes no mercado, como: APC, EPP, Gemfan, T-Motor, RCTimer, entre outras.

3.5.3 Balanceamento de hélices

Muitas vezes, hélices baratas não são devidamente balanceadas, o que pode ocasionar, em virtude das vibrações decorrentes desse desbalanceamento, uma instabilidade relevante durante o voo.

Existem diversas maneiras de verificar o balanceamento de uma hélice. Uma das maneiras mais simples de realizar essa inspeção, consiste na utilização de um suporte que mantenha a hélice pendulada. Abaixo encontra-se uma ilustração desse tipo de teste:

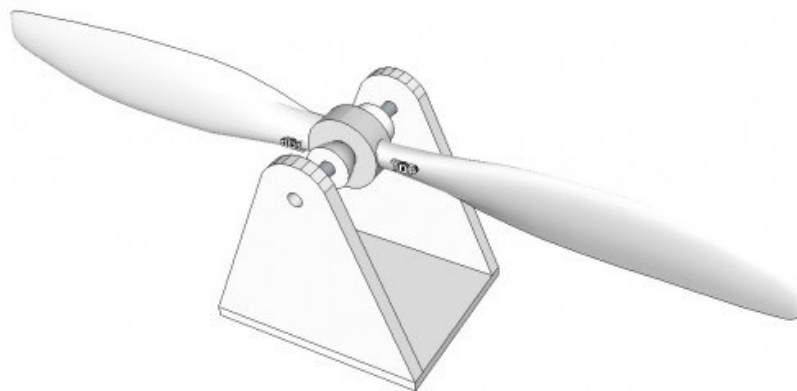


Figura 13 - Ilustração de um balanceador de hélices [13]

3.6 Controlador eletrônico de velocidade

O controlador eletrônico de velocidade, em Inglês, “*Electronic Speed Controller*”, popularmente chamado por sua abreviação, ESC, é o equipamento responsável pelo controle da velocidade e direção do giro do motor. O ESC precisa aguentar a maior corrente que o motor poderá consumir, além de fornecê-la na voltagem certa.

3.7 Controlador de voo

3.7.1 Conceito

As placas controladoras de voo podem ser consideradas como a “inteligência central” dos VANTS. Elas podem ser definidas como um circuito integrado composto por um microprocessador, sensores e pinos.

A função principal de uma placa controladora de voo é processar os sinais de entrada e, a partir deles, gerar saídas adequadas ao controle do voo de um VANT.

3.7.2 Sensores

Como já foi mencionado, as placas controladoras de voo são compostas por diversos sensores que, juntos, permitem um voo mais estável. Os principais sensores presentes em uma placa são: acelerômetro, giroscópio, Unidade de Medição de Inércia, bússola, barômetro e GPS. A seguir, estes componentes serão detalhados.

3.7.2.1 *Acelerômetro*

O acelerômetro é responsável por medir a aceleração linear nos três eixos (X, Y e Z)

3.7.2.2 *Giroscópio*

O giroscópio é um dispositivo que fornece uma referência de direção do VANT.

3.7.2.3 *Unidade de Medição de Inércia*

A unidade de medição de inércia é muito importante para a estabilidade do voo de um VANT. Ela permite determinar a velocidade do aparelho e estabilizar o quadricóptero, mesmo quando o vento está presente.

3.7.2.4 *Bússola*

Uma bússola eletrônica será responsável por medir o campo magnético terrestre e determinar a direção do VANT em relação ao norte magnético.

3.7.2.5 *Barômetro*

Uma vez que a pressão muda à medida que um VANT se afasta do nível do mar, um sensor de pressão (barômetro) poderá avaliar a altura do veículo.

3.7.2.6 GPS

Um *Global Positioning System* (GPS) utiliza sinais enviados por satélites que se encontram em órbita ao redor da Terra para determinar a posição geográfica específica do VANT.

3.8 Bateria

3.8.1 Composição Química

Apesar de algumas variações da composição química de baterias existentes, como a de Lítio Manganês ou outras variações de Lítio, a maioria das baterias utilizadas em VANTs são feitas de polímero de Lítio (LiPo). Este tipo de bateria consegue oferecer uma alta capacidade de energia, com um peso consideravelmente baixo. Apesar das vantagens, essa bateria costuma custar mais caro e ser mais perigosa.

3.8.2 Capacidade

A capacidade de uma bateria é medida em mili ampere hora (mAh). Pequenas baterias podem ter 100 mAh, enquanto que baterias com uma capacidade maior, destinada a VANTs de tamanho médio podem ter entre 2000 e 3000 mAh. Quanto maior for a sua capacidade, maior o tempo de voo, no entanto, mais pesada será a bateria. Normalmente, essas baterias conseguem suprir um tempo de voo da ordem de 10 a 20 minutos.

3.8.3 Taxa de descarga

A taxa de descarga de uma bateria de lítio é medida em C, onde 1C é a capacidade da bateria (normalmente medida em Ah). As taxas de descarga mais comuns são pelo menos 5C, ou

seja, 5 vezes a capacidade da bateria. Uma vez que grande parte dos motores utilizados em multirotores consome correntes altas, as baterias precisam estar aptas a descarregar em correntes elevadas, na ordem de 30V ou mais.

Dessa maneira uma bateria de 1200mAh e de taxa de descarga 2C pode fornecer 2400mA (2,4A) por 30 minutos. No entanto, deve-se tomar cuidado ao calcular esse tempo, pois uma taxa de descarga elevada pode acarretar em um aumento de temperatura da bateria, podendo levar a um incêndio.

3.8.4 Montagem

A bateria é o componente mais pesado de um VANT e precisa estar localizada no centro do veículo para que os motores estejam sujeitos à mesma carga. A montagem da bateria costuma envolver velcros, borrachas, etc. Abaixo pode-se visualizar a imagem de uma bateria:

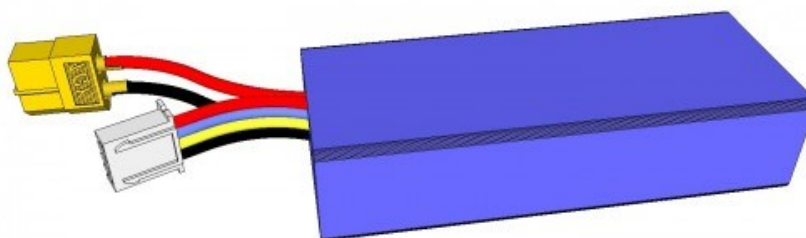


Figura 14 - Bateria [14]

4. Projeto

4.1 Critérios do projeto

Todo projeto de engenharia deve seguir uma lista de parâmetros pré-estabelecidos que caracterizem a construção do produto final. Portanto, a elaboração e montagem do protótipo abordado neste trabalho dependerão de alguns parâmetros essenciais para o voo do VANT.

A Tabela 1 a seguir, revela os principais critérios selecionados para projetar o VANT e suas respectivas definições.

Critérios	Definição
Peso	É a massa de toda a estrutura do protótipo multiplicada pela aceleração local.
Autonomia	Consiste no período em que o VANT consegue sobrevoar, sem necessitar de uma recarga elétrica.
Capacidade	O protótipo precisa ser capaz de sustentar o peso da estrutura e de uma câmera NIR.
Resistência	É necessário resistir ao momento fletor ocasionado pela força de sustentação na extremidade oposta do braço.

Tabela 1 - Critérios utilizados na elaboração do protótipo

Para levar em consideração todos os critérios citados acima, será necessário escolher componentes que os satisfaçam. O próximo tópico explicitará quais foram as peças escolhidas.

4.2 Componentes

4.2.1 Bateria

Antes de descrever a bateria contemplada no projeto, é necessário fazer um esclarecimento. Devido às limitações financeiras, não houve liberdade no processo de escolha deste componente. Logo, apesar de a bateria utilizada no protótipo ser consideravelmente eficaz, ela não representa o melhor modelo do mercado em termos de autonomia.

O seguinte modelo de bateria foi utilizado para compor o protótipo: ZIPPY Flightmax 4000mAh 3S1P 40C. Esse produto pode ser observado na figura 15:



Figura 15 - Bateria utilizada na construção do protótipo [15]

De acordo com o fornecedor⁵, essa bateria tem as seguintes especificações técnicas:

- Capacidade: 4000 mAh
- Voltagem: 3S1P / 3 células/ 11.1 V
- Descarga: 40 C constante
- Massa: 351 g

4.2.2 Motor

O motor DYS D2830-14 750 KV sem escova foi utilizado para movimentar as hélices do protótipo. Infelizmente não houve liberdade de escolha deste equipamento, pois este modelo era o único funcional que o fornecedor possuía para ofertar. A seguir, é possível visualizar uma imagem deste motor:

⁵ A empresa Hobbyking foi a fornecedora da bateria e a responsável por fornecer as informações técnicas do produto. Fonte:

<http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/index.asp>



Figura 16 - Motor DYS D2830-14 utilizado no protótipo [16]

De acordo com o fabricante deste motor, suas especificações técnicas são as seguintes:

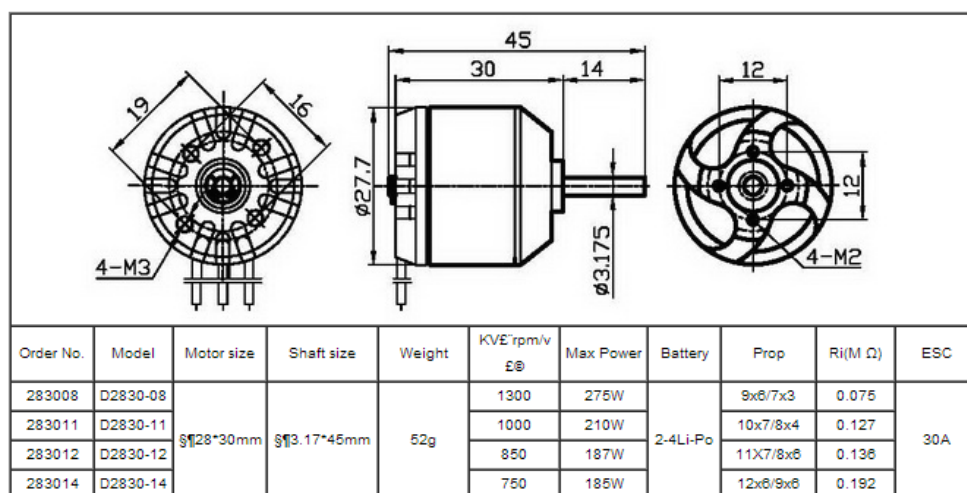


Figura 17 - Informações técnicas do motor utilizado [17]

4.2.3 Hélice

4.2.3.1 Modelos de hélices disponíveis

O movimento das hélices será responsável por gerar a força de sustentação do VANT. Para a construção do protótipo, as seguintes hélices estavam disponíveis:



Figura 18 - Modelos de hélices disponíveis

Para facilitar a identificação de cada uma das hélices, elas serão referenciadas como Modelo I (à esquerda), II (central) e III (à direita). As características desses modelos podem ser observadas abaixo:

- Modelo I – hélice dupla 10 x 4,5 (Diâmetro 10'' e Passo 4,5)
- Modelo II – hélice dupla 11 x 4,7 (Diâmetro 11'' e Passo 4,7)
- Modelo III – hélice tripla

4.2.3.2 *Experimento para escolha da melhor hélice*

A hélice utilizada no protótipo foi escolhida de acordo com a força de sustentação gerada pelo conjunto bateria-motor-hélice. Uma vez que o motor e a bateria já foram previamente selecionados, faz sentido escolher a hélice que consiga proporcionar a maior força de sustentação para o VANT.

Antes de construir um experimento que permita a escolha da hélice mais adequada, deve-se ressaltar que, uma vez que esses objetos não costumam vir devidamente balanceados do fabricante, será necessário construir um mecanismo que auxilie a realizar esse procedimento. Esse mecanismo pode ser observado na figura a seguir:

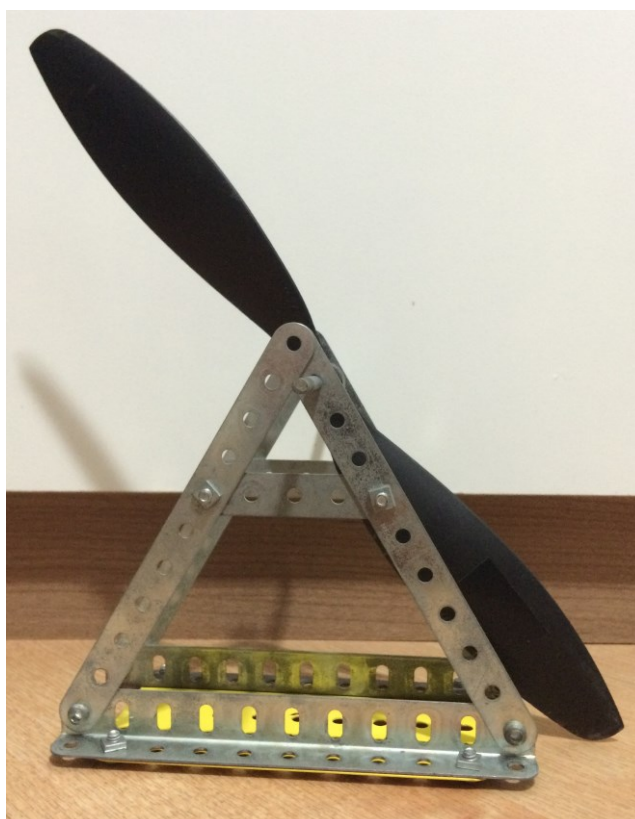


Figura 19 - Experimento para balancear as hélices

Para balancear as hélices, utilizou-se uma técnica que, apesar de rudimentar, é bastante difundida no aeromodelismo. Essa técnica consiste no uso de fita isolante para proporcionar equilíbrio a hélice.

Uma vez balanceadas, pode-se elaborar um experimento com maior grau de confiabilidade visto que todas as hélices estarão igualmente equilibradas.

O experimento construído se baseou na medição da massa de ar deslocada pelo movimento da hélice. Dessa forma, o conjunto bateria-esc-motor-hélice foi montado para cada uma das três hélices e, por intermédio de uma balança digital, foi possível determinar qual conjunto proporcionava a maior força de sustentação ao VANT. Esse experimento pode ser observado na figura 20:

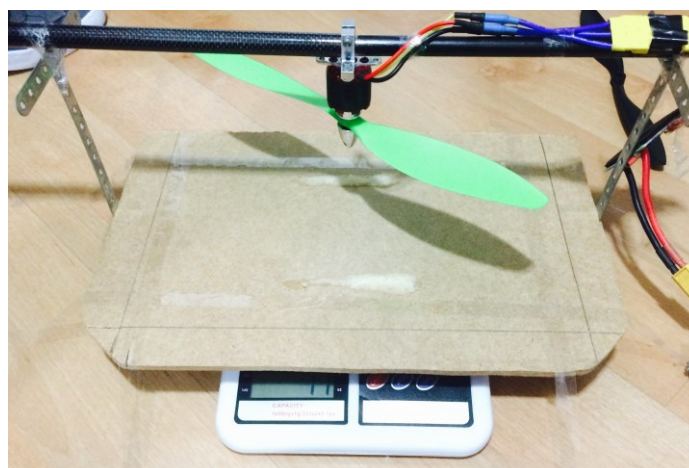


Figura 20 - Experimento para estimar a força de sustentação proporcionada pelo movimento rotativo da hélice

Os resultados do experimento podem ser observados na tabela a seguir:

Modelo	Sustentação (g)
I	300
II	400
III	220

Tabela 2 - Resultado do experimento para escolha da melhor hélice

Assim, adotou-se o modelo II para ser utilizado no protótipo.

4.2.4 Câmera

Infelizmente, devido à limitação dos recursos financeiros destinados a suportar este projeto, não foi possível comprar a câmera NIR necessária para realizar o mapeamento da saúde de uma vegetação.

Uma vez que câmeras GOPRO possuem tamanhos e pesos similares às máquinas NIR, para efeitos de projeto, uma GOPRO, modelo HERO3, será utilizada na construção do protótipo. A seguir, este produto é ilustrado:



Figura 21 - Câmera utilizada na construção do protótipo [18]

4.2.5 Micro controlador

A placa escolhida para ser utilizada como controle do VANT foi a Arduino Pilot Mega 2.6 (APM). Essa controladora de voo possui o seu código aberto, o que permite que além dos desenvolvedores originais da placa, uma comunidade de mais de 10 mil membros aplique melhorias em seu sistema – os benefícios da famosa economia colaborativa⁶. A APM 2.6 pode ser observada na figura a seguir:



Figura 22 – APM 2.6 [19]

Através de um recurso denominado *Mission Planner*, essa placa permite que uma missão autônoma seja programada. O *dashboard* deste recurso está ilustrado na figura a seguir:

⁶ Uma das principais tendências do século XXI, a economia colaborativa reúne indivíduos que não se conhecem, porém com interesses comuns para o compartilhamento de serviços.



Figura 23 - APM Mission Planner [20]

4.2.6 Controlador Eletrônico de Velocidade – ESC

O ESC tem a função de controlar a velocidade do motor elétrico de acordo com o sinal recebido pela bateria. Utilizou-se um ESC de 30 A, fabricado pela empresa Turnigy. A seguir, pode-se visualizar o modelo:

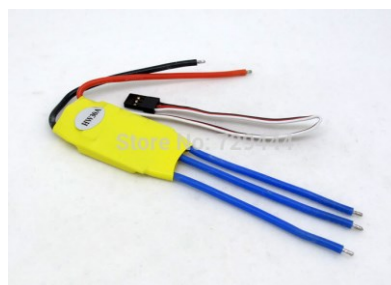


Figura 24 - ESC utilizado no protótipo [21]

4.2.7 Estrutura

4.2.7.1 Impressora

Alguns componentes (como o *frame* central por exemplo) utilizados no projeto foram obtidos mediante compra com fornecedor. No entanto, visto que existia a possibilidade de utilizar uma impressora 3D para construir peças, resolveu-se adotá-la como ferramenta de manufatura.

A impressora utilizada foi produzida pela empresa brasileira Sethi 3D e o seu modelo pode ser observado na figura a seguir:



Figura 25 - Impressora 3D utilizada para construção da estrutura [22]

A impressora 3D desenvolvida pela Sethi3D, assim como a maioria dos modelos presentes no mercado é compatível apenas com os materiais ABS e PLA.

Com a experiência, concluiu-se que a qualidade de peças impressas a partir do plástico ABS era superior às feitas com PLA. Assim, esse foi o material escolhido para construir a estrutura do quadricóptero.

4.2.7.2 Braço

A impressora 3D auxiliou no processo de desenvolvimento do primeiro braço do quadricóptero. Resolveu-se utilizar um modelo que estava se popularizando no mercado de aeromodelismo. Ele pode ser encontrado em um site denominado *Thing Inverse*⁷. Na figura a seguir, pode-se observar o processo de construção dessa peça:

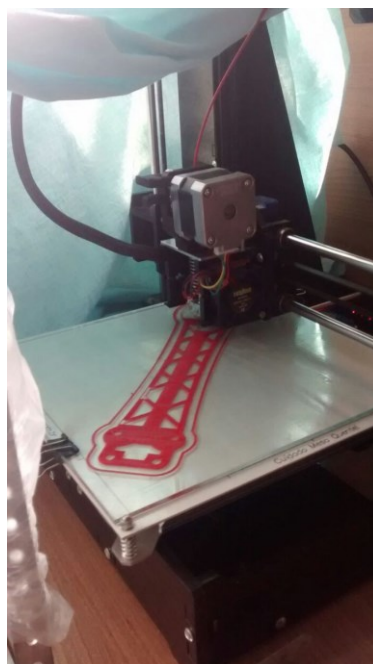


Figura 26 - Braço sendo construído na impressora 3D

Finalmente, após 16 horas de espera, os quatro braços que compõem parte da estrutura do VANT foram devidamente impressos. Eles podem ser observados na figura a seguir:

⁷ Esse site possui uma série de modelos tridimensionais abertos desenhados em *Solid Works* pela comunidade. Fonte: <https://www.thingiverse.com/>



Figura 27 - Braços do VANT

4.3 Autonomia prevista

Uma vez definidos os principais componentes do protótipo, pode-se realizar, a título de exercício, uma previsão sobre a autonomia do VANT.

A energia destes veículos elétricos, como sabemos, é armazenada em baterias. Conforme já foi mencionado, a bateria utilizada na montagem do protótipo tem as seguintes especificações técnicas:

Parâmetros	Valor
Massa	351 g
Voltagem de Saída	11.1 V
Capacidade	4000 mAh

Tabela 3 – Especificações técnicas da bateria

Uma das características mais importantes das baterias para veículos elétricos é a chamada densidade de energia. Este parâmetro pode ser definido como a energia máxima que a bateria pode armazenar dividida pela sua massa. Expressa em watts hora por quilograma, a densidade de energia pode ser calculada do seguinte modo:

$$D = \frac{E}{M} \quad (1)$$

O valor da energia fornecida pela bateria durante uma hora (E), por sua vez, pode ser encontrado através da multiplicação entre potência e tempo:

$$E = P \times T \quad (2)$$

A potência pode ser escrita relacionando a voltagem com a corrente:

$$P = V \times I \quad (3)$$

Finalmente, encontramos a seguinte expressão para o valor da energia fornecida pela bateria:

$$E = P \times V \times I \quad (4)$$

Substituindo os valores, encontramos que:

$$E = 11.1 \times 4 \times 1 = 44.4 \text{ Wh}$$

Dividindo este valor pela massa da bateria, encontramos a densidade de energia:

$$D = \frac{44.4}{0.351} = 126.5 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$$

Uma vez definida a densidade de energia da bateria, é necessário considerar a massa total do protótipo:

$$m_{total} = m_e + m_b + m_c \quad (6)$$

Onde:

m_{total} é o peso total do VANT

m_e é o peso da estrutura do VANT (suportes, placas eletrônicas, fios, motores, ESCs,)

m_b é o peso da bateria

m_c é o peso da carga útil

Medindo a massa do VANT através do auxílio de uma balança, chega-se ao seguinte valor:

$$m_{total} = 1 \text{ kg}$$

Sabe-se que o empuxo proporcionado pela rotação máxima da hélice vale 400g^8 .

⁸ Valor encontrado através do experimento realizado para escolha da melhor hélice.

De acordo com o fabricante do motor utilizado no protótipo, a potência máxima requerida por este equipamento, ou seja, quando ele proporciona o maior empuxo para a hélice, vale 185W. Dessa maneira, podemos calcular o empuxo específico (E_e), da seguinte maneira:

$$E_e = \frac{E}{P} \quad (7)$$

Substituindo os valores em (7), encontramos que:

$$E_e = \frac{400}{185} = 2.16 \text{ g/W}$$

Quando o VANT estiver ganhando altura ele estará consumindo mais potência. Quando estiver reduzindo a altura a potência consumida será menor. Assim vamos adotar a potência do VANT parado no ar como o valor médio de consumo. Vamos também prever uma sobra de 10% para compensar as aproximações destes cálculos e permitir que o veículo faça algumas manobras.

Pelas considerações anteriores, o Empuxo Total Médio (E_{tm}) deverá ser:

$$E_{tm} = m_{total} = 1kg$$

Como o VANT tem 4 conjuntos de motor-hélice, o empuxo máximo que conseguiremos é de:

$$E_{max} = 400 \times 4 \times 0,9 = 1440 \text{ g}$$

A energia gasta em 1 hora de funcionamento do VANT é dada por:

$$E = \frac{E_{max}}{E_e} \times 1h = \frac{1440}{2.16} = 666 Wh$$

Sabendo que a bateria consegue fornecer o equivalente a:

$$E_f = D \times m_{total} \quad (8)$$

Substituindo os valores da densidade de energia e da massa total do VANT, encontramos a energia fornecida pela bateria em 1 hora:

$$E_f = 126.5 \times 1 = 126.5 Wh$$

Finalmente, conseguimos obter a previsão de autonomia através da seguinte expressão:

$$A = \frac{E_f}{E} \quad (9)$$

Substituindo os valores, obtemos:

$$A = 0,19 h = 11,4 \text{ minuto}$$

5. Teste de campo

Reunindo os componentes e encaixando as devidas partes, obtem-se o corpo do protótipo. O modelo final pode ser observado na figura a seguir:



Figura 28 - Protótipo montado

Uma vez pronto, resolveu-se colocar o protótipo para voar. Em uma viagem para uma fazenda em Mar de Espanha, Minas Gerais, o primeiro teste de campo foi realizado. Com a presença de uma câmera (GOPRO) embarcada no sistema, foi possível gravar esse momento. Nas imagens a seguir, pode-se observar como foi o evento.



Figura 29 – Fotografias realizadas pelo protótipo durante o voo



Figura 30 - Teste de campo

De um modo geral, o experimento foi positivo. O protótipo conseguiu decolar e se manter estável por alguns minutos. No entanto, deve-se ressaltar alguns problemas ocorridos durante o teste de campo:

- Por algum motivo, talvez por interferência de sinal ou mau funcionamento do sistema de transmissão, quando o VANT atingiu o seu ponto mais alto no ar, ele perdeu comunicação e despencou.
- Controlar o VANT no ar não foi nada fácil, pois nem eu nem o meu colega (Luis Fernando) tínhamos experiência com aeromodelismo.

- Para tornar o VANT mais estável ao voar, existem uma série de parâmetros de programação que precisam ser iterados de modo a encontrar uma estabilidade ótima. Visto que o maior esforço foi direcionado a otimização estrutural do VANT, sabe-se que o protótipo tem um potencial de melhorar, e muito, a qualidade do seu voo.

Outro ponto que deve ser ressaltado é que a bateria conseguiu suprir energia para o VANT por, aproximadamente, 12 minutos. Logo, esse fato demonstra que o cálculo da autonomia do protótipo forneceu uma estimativa válida (11,4 minutos).

6. Otimização estrutural

Apesar de o protótipo já ter sido montado e, inclusive, voado, sabe-se que muitas melhorias poderiam ser aplicadas. Uma vez que a estrutura do VANT não era otimizada, optou-se por melhorá-la, tentando reduzir o seu volume e, conseqüentemente, o seu peso.

6.1 Informações mecânicas sobre o filamento utilizado

De modo a construir peças mais otimizadas e que resistam às cargas impostas durante o voo do quadricóptero, é necessário levar em consideração as características mecânicas do plástico ABS no projeto.

Entrou-se em contato com o fornecedor desse plástico, no entanto, ele não soube informar as características mecânicas do material. A segunda alternativa foi buscar na literatura as informações genéricas desse tipo de plástico, porém, percebeu-se que esses dados variam significativamente de acordo com o fabricante.

Dessa forma, chegou-se à conclusão de que a melhor maneira de obter as características para o plástico ABS utilizado na impressora seria realizar um ensaio de tração para determinar as informações mecânicas do material.

6.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina Instron⁹ presente no laboratório de ensaios mecânicos do Instituto Tecnológico da PUC-Rio. Para realizar o ensaio, foi necessário imprimir em 3D um corpo de prova que atendesse a norma ISO527¹⁰. A máquina e o corpo de prova podem ser visualizados na figura a seguir:

⁹ Máquinas Instron são utilizadas para testes eletromecânicos ou universais. Elas também são usufruídas para testes estáticos no modo de tração ou compressão em uma única estrutura

¹⁰ Norma que define as dimensões de um corpo de prova de plástico ABS.



Figura 31 - Ensaio de tração na máquina Instron

Essa máquina permite que informações referentes as tensões aplicadas e ao deslocamento do corpo de prova sejam transferidos automaticamente para um computador. Dessa maneira, pode-se tratar os dados oriundos da máquina e elaborar a curva tensão x deformação do material. Essa curva pode ser observada na figura a seguir:

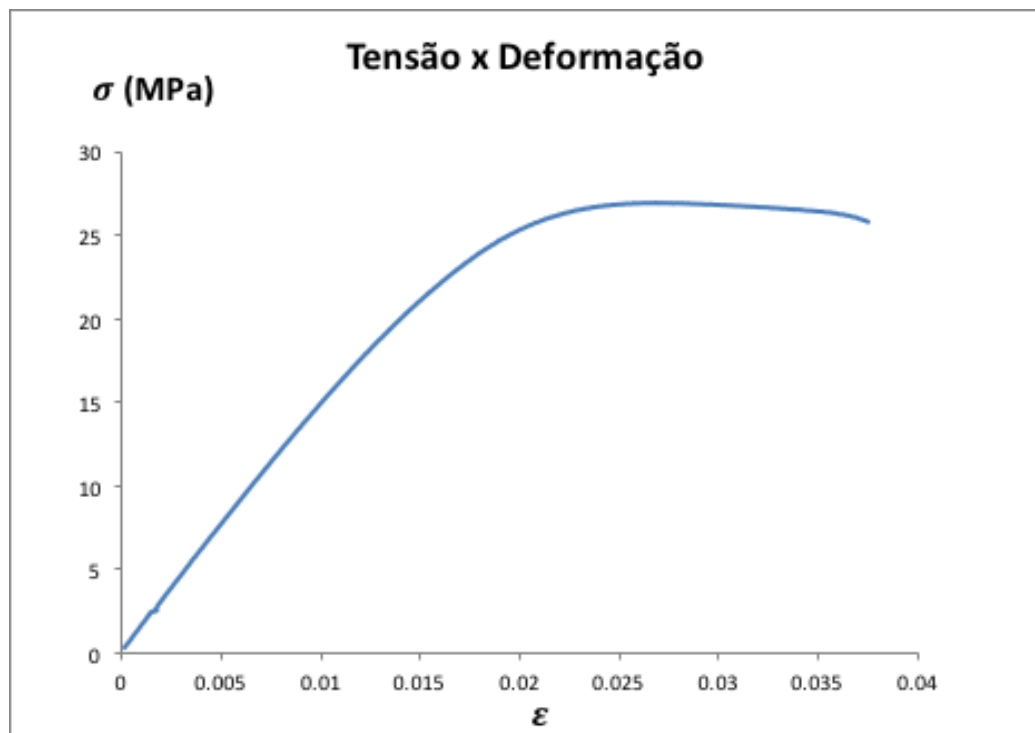


Figura 32 - Curva Tensão x Deformação do plástico ABS

A partir da curva tensão x deformação do material, é possível obter outras propriedades do plástico ABS como o Módulo de Elasticidade ou de Young (E), o limite de escoamento (S_e), o limite de ruptura (S_r) e a redução de área (RA).

Antes de atingir o limite de escoamento, a curva tensão x deformação do material tem um comportamento linear, descrito pela Lei de Hooke:

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (10)$$

Dessa forma, para obter o módulo de elasticidade, basta calcular o coeficiente angular da reta que representa o comportamento linear da curva tensão x deformação.

A seguir, pode-se visualizar a reta que representa o comportamento linear e sua equação:

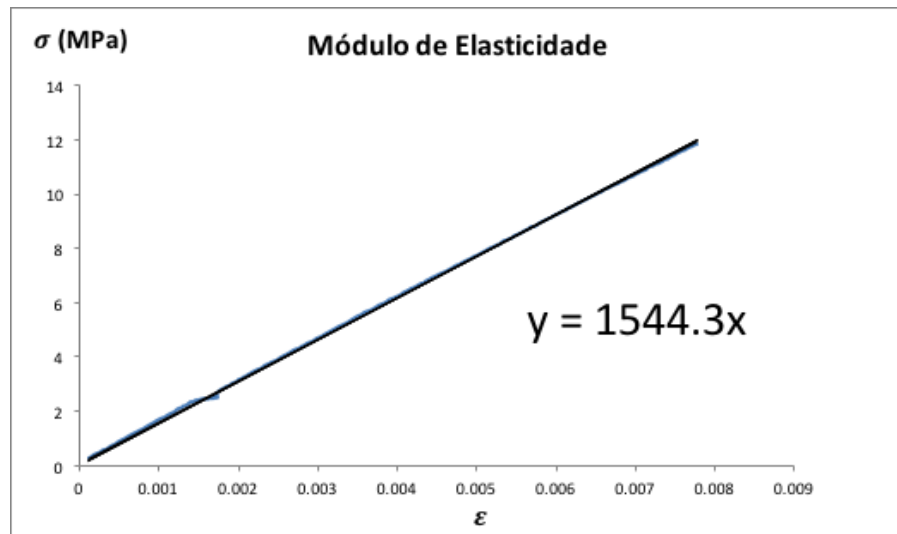


Figura 33 - Módulo de Elasticidade do plástico ABS

Logo, podemos concluir que o módulo de elasticidade do plástico ABS utilizado na construção da estrutura do protótipo é:

$$E = 1,5 \text{ GPa}$$

A partir da curva tensão x deformação, também é possível obter o limite de escoamento do plástico ABS. O escoamento de um material corresponde ao momento em que se inicia a sua deformação plástica. Este limite também pode ser definido como o ponto em que o material possui uma deformação equivalente a 0,2%. Levando em consideração essa característica, é possível descobrir qual o valor deste parâmetro característico do material.

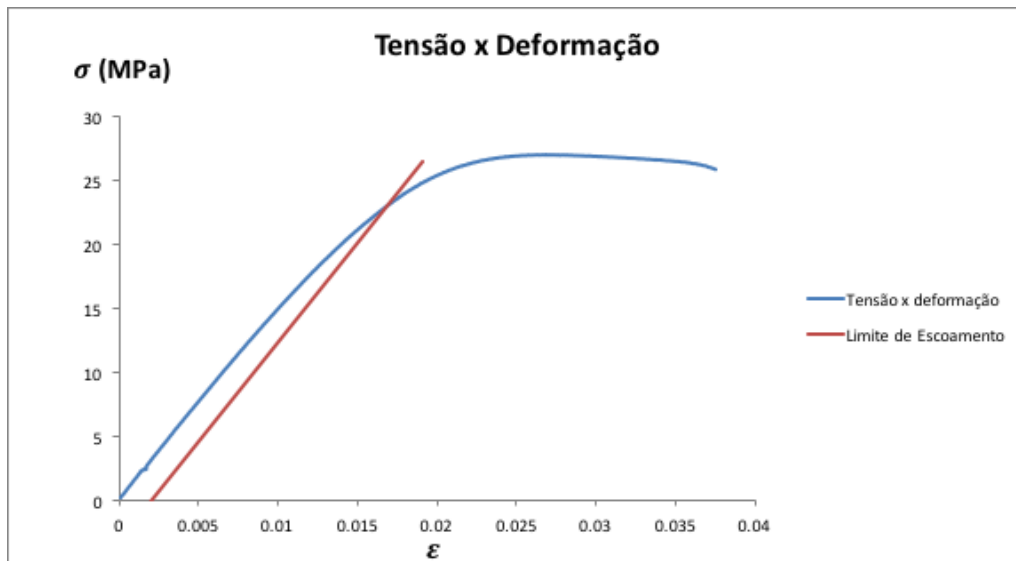


Figura 34 - Limite de escoamento do plástico ABS

O limite de escoamento pode ser visualizado no ponto em que a reta traçada a partir da coordenada localizada em 0,2% de deformação interceptar a curva tensão x deformação. A partir de manipulações no programa Excel, é possível obter:

$$S_e = 23 \text{ MPa}$$

O limite de ruptura (S_r) corresponde ao ponto de fratura do material. Ele está representado no último ponto da curva tensão x deformação do plástico ABS.

$$S_r = 26 \text{ MPa}$$

Durante o ensaio de tração, o material sofre uma redução de sua área transversal, também chamada de estricção ou empescoçamento. Mensurar a RA do plástico ABS é importante pois essa característica fornece uma percepção da sua ductilidade. O valor encontrado para a RA foi:

$$RA = 5,5\%$$

De uma maneira geral, podemos concluir que o material utilizado – plástico ABS – não é muito dúctil e não apresenta uma resistência mecânica elevada. Uma vez que o VANT não é alvo de carregamentos significativos, essas características não tornam o material inadequado para a compor a estrutura do protótipo.

6.3 Análise estrutural

Uma vez obtidas as informações que descrevem o material mecanicamente, pode-se elaborar uma análise estrutural do esqueleto do VANT. Analisar todos os componentes do protótipo seria o ideal, no entanto, uma vez que o histórico de carregamento é mais relevante no braço do quadricóptero, acredita-se que uma avaliação estrutural dedicada a essa peça seja suficiente para um primeiro nível de otimização.

Apesar de funcional, a estrutura desse braço não é a mais adequada para o tipo de esforço ao qual esse objeto está submetido. Para analisar essa estrutura e desenvolver uma peça otimizada, esse braço será aproximado para um paralelepípedo de comprimento L equivalente a 240 mm, largura w de 15 mm e altura H de 40 mm. A figura a seguir ilustra essa aproximação:

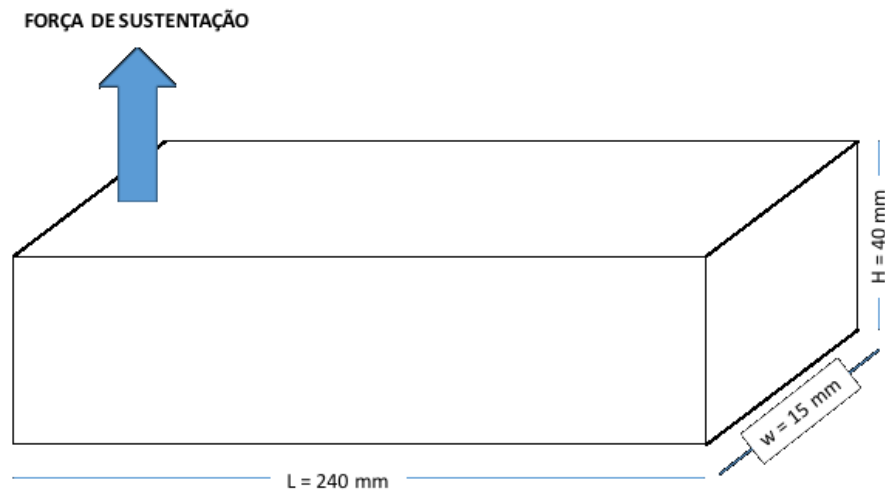


Figura 35 - Aproximação estrutural do braço do quadricóptero

O volume da estrutura pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$V = L \times w \times H \quad (11)$$

Substituindo os valores de L, w e H, encontramos que o volume total da peça é de:

$$V = 144000 \text{ mm}^3$$

Uma vez determinadas as dimensões do braço, pode-se iniciar o estudo das tensões presentes na estrutura.

A força de sustentação proporcionada pelo conjunto motor-hélice-bateria gera, na extremidade direita, um momento que pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$M = F \times L \quad (12)$$

Uma vez que esse é o maior momento encontrado em toda a estrutura do braço, pode-se concluir que a extremidade direita dessa peça estará sujeita a uma tensão máxima, diretamente relacionada ao momento fletor:

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (13)$$

O momento de inércia de área de um objeto de seção transversal retangular pode ser calculado da seguinte maneira:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (14)$$

Levando em consideração a força de sustentação medida anteriormente (500g) e substituindo os valores acima, encontra-se que o valor da tensão máxima na extremidade direita vale:

$$\sigma = 18.75 \text{ KPa}$$

Uma vez realizada a análise estrutural, pode-se passar para a otimização do esqueleto do protótipo. Esse processo será realizado mediante uma técnica que vem ganhando espaço no mercado concomitantemente com as novas tecnologias de manufatura aditiva: a **Otimização Topológica (OT)**.

6.4 Otimização topológica

6.4.1 Conceito

A técnica conhecida como Otimização Topológica tem sido desenvolvida de maneira progressiva e, devido ao seu enorme potencial, está sendo aplicada em diversas áreas da engenharia.

Baseada em abordagens computacionais e matemáticas que utilizam o Método de Elementos Finitos¹¹ como um dos principais alicerces, a OT é uma modalidade de otimização estrutural visando se adequar a uma série de parâmetros pré-estabelecidos. Basicamente, seu objetivo é encontrar uma distribuição material que gere um *layout* estrutural de modo a maximizar ou minimizar uma função objetivo. Dessa forma, a técnica de OT introduz ou elimina buracos da estrutura de modo a otimizar a peça segundo um objetivo. A figura a seguir mostra o resultado da OT de uma peça:



Figura 36 - Processo de Otimização Topológica de uma peça

¹¹ O Método dos Elementos Finitos é um procedimento numérico para a análise de estruturas e meios contínuos. Esse método é no conceito de discretização.

6.4.2 Aplicação da OT no braço do protótipo

Com as devidas condições de contorno impostas e informações mecânicas do material, simulou-se a atuação do braço em um programa de otimização topológica na peça e o resultado encontrado¹², após manipulações de suavização para tornar o processo de impressão possível, pode ser observado na figura a seguir:

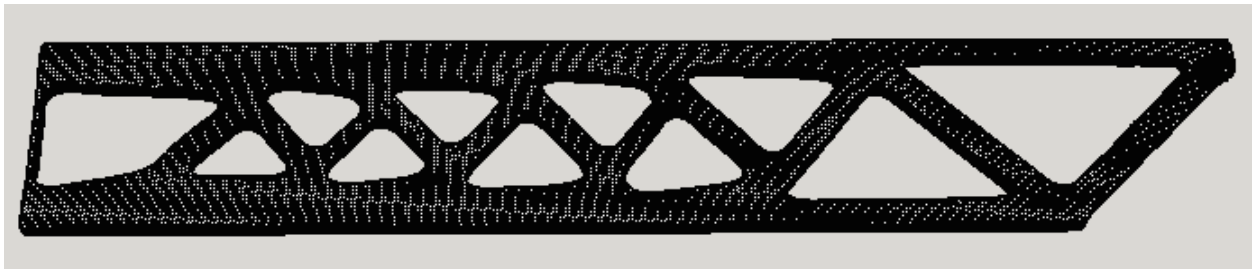


Figura 37 - Resultado da otimização topológica bidimensional

É importante ressaltar que o *software* de otimização topológica, apesar de ter fornecido um resultado em duas dimensões, é capaz de realizar análises tridimensionais. No entanto, o programa auxiliar de suavização não consegue surtir o efeito necessário em uma peça tridimensional otimizada e, conseqüentemente, o resultado não seria imprimível. Por isso, optou-se por utilizar uma otimização em apenas duas dimensões.

6.5 Resultado final

Após mais algumas suavizações geradas a partir do modelo resultante da otimização topológica, foi possível imprimir um novo braço do quadricóptero cujo volume sofreu reduções

¹² Créditos ao meu Coorientador, Ivan Menezes.

que, por sua vez, acarretaram na minimização do peso da estrutura necessária para suportar os esforços. A seguir, pode-se observar o novo braço do quadricóptero recém-impresso:

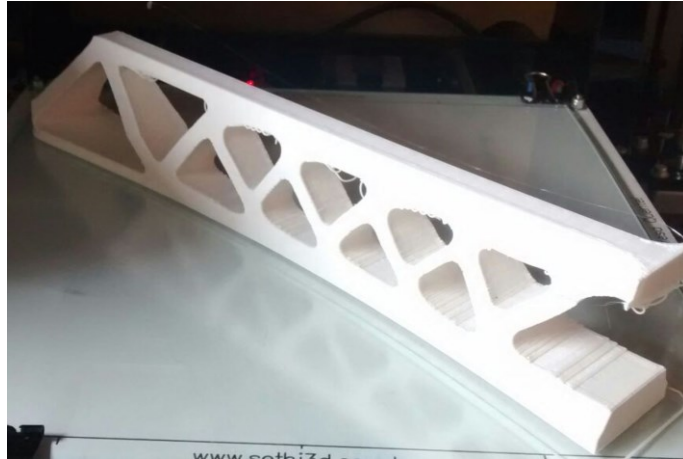


Figura 38 – Braço otimizado do quadricóptero

Vale ressaltar que o volume do braço otimizado foi de 87162 mm³. Sabendo que a otimização partiu de um modelo cujo volume era equivalente a 144000 mm³, a técnica proporcionou uma redução volumétrica de, aproximadamente, 35%.

Sabendo que, de acordo com o fabricante da impressora Sethi 3D, a densidade do plástico ABS utilizado é de $1,04 \times 10^{-3}$ g/mm³, cada braço conseguiu uma redução de 150 g para 90 g. Uma vez que são 4 braços, a otimização topológica promoveu a eliminação de 240 g para o veículo elétrico. Isso, em termos aerodinâmicos, demonstra um ganho extremamente relevante em autonomia e justifica o fato de a indústria de aviação investir tanto na tecnologia de otimização topológica.

7. Sugestão de melhorias

Como foi possível observar no teste de campo, existem uma série de parâmetros que precisam ser aprimorados de modo a proporcionar uma maior eficiência ao VANT no mapeamento da saúde de uma vegetação. Dessa forma, é importante sugerir algumas melhorias que poderão auxiliar em projetos futuros.

Devido à falta de liberdade e apoio financeiro no processo de escolha da bateria a ser utilizada, o modelo contemplado, apesar de razoavelmente eficaz, não era o produto de maior valor agregado no mercado. Portanto, para proporcionar uma autonomia maior ao veículo elétrico, sugere-se que outras baterias sejam utilizadas.

Similarmente à bateria, os motores elétricos utilizados não eram os modelos mais tecnológicos e eficientes do mercado. Logo, acredita-se que, dispendendo uma maior quantia financeira, seria possível adquirir modelos mais otimizados e, dessa forma, assegurar uma maior robustez ao protótipo final. Através de referências na internet, conversas com especialistas em aeromodelismo e desenvolvimento de VANTs imagina-se que um modelo da Tiger Motor seja o mais adequado em termos de custo-benefício.

É importante ressaltar que a tecnologia de impressão 3D está evoluindo bastante e existem avanços significativos tanto no processo de manufatura aditiva quanto no desenvolvimento de materiais que possam ser utilizados como insumo para impressão. Um filamento que tem ganhado bastante destaque em comunidades DIY é o T-Glase. Este filamento não-biodegradável com aparência próxima a de um vidro, possui características mecânicas superiores à do plástico ABS e PLA. Logo, ao utilizar esse filamento, é possível projetar

estruturas mais leves e mais resistentes. A seguir é possível observar uma ilustração de uma peça construída a partir deste filamento:



Figura 39 - Peça produzida a partir do filamento T-Glase [23]

No presente trabalho, a técnica de impressão 3D foi utilizada apenas para otimizar parte da estrutura do veículo elétrico. Sugere-se que, em trabalhos futuros, exista um esforço maior em desenvolver toda a estrutura do VANT de maneira otimizada e através de impressão 3D. Além disso, sugere-se que, em um trabalho futuro, tanto o braço otimizado quanto o resto da estrutura sejam levados a campo para realização do teste real.

Infelizmente, devido às limitações financeiras na construção do protótipo, não foi possível se beneficiar de uma câmera NIR. Logo, a aplicação do veículo elétrico desenvolvido no mapeamento da saúde da vegetação ficou limitada à teoria. Portanto, recomenda-se fortemente que, em trabalhos futuros, uma câmera deste tipo seja contemplada na construção do veículo.

Recomenda-se que esforços significativos sejam direcionados à programação do VANT. Dominando os parâmetros computacionais, acredita-se que esse veículo aéreo poderia atingir níveis relevantes de estabilidade, acarretando em uma experiência de voo mais eficaz.

8. Conclusão

De uma maneira geral, podemos concluir que existe uma grande gama de oportunidades dentro do segmento agrícola no Brasil. Dentro dessas diversas oportunidades, optou-se por tentar explorar aquela que mais teria sinergia com o uso de VANTs: o mapeamento da saúde de vegetações.

A técnica de otimização topológica tem um enorme potencial de auxiliar no processo de criação de estruturas que demandem menos material para uma mesma resistência. Como consequência, isso poderia proporcionar ganhos financeiros para aqueles que trabalham com o projeto de estruturas.

Deve-se ressaltar que existe uma grande sinergia, ainda pouco explorada, entre a otimização topológica e a técnica de manufatura aditiva. Neste trabalho, demonstramos como poderíamos aproveitar o potencial dessas duas tecnologias de modo a criar estruturas mais inteligentes.

Infelizmente, apesar de um dos critérios de projeto ter sido a maximização da autonomia do veículo elétrico, o resultado obtido foi algo em torno de 12 minutos. Sabe-se que, dificilmente, uma fazenda conseguiria ser mapeada nesse intervalo de tempo. Além da barreira financeira que impossibilitou a compra de uma bateria mais potente, deve-se ressaltar que o

mercado pouco progrediu quanto a sistemas de fornecimento de energia. Logo, independentemente da bateria, seria difícil conseguir autonomias superiores a 30 minutos sem utilizar outros tipos de tecnologia de fornecimento de energia (célula de hidrogênio, combustão, etc).

Por fim, deve-se salientar que a montagem de um quadricóptero e sua respectiva programação requerem conhecimentos em diferentes áreas o que torna o projeto um tanto complexo. Apesar de todo o esforço envolvido na construção do veículo, sabe-se que o protótipo ainda tem muito o que desenvolver.

9. Bibliografia

[1] Acesso em 11 de Agosto de 2015, disponível em

<http://www.pepemodelismo.com.br/prod,idloja,749,idproduto,3921572,helicoptero-rc-trax-6208-quadricoptero-qr-1-high-performance-rtf-c--motor-e-radio>

[2] Acesso em 10 de Agosto de 2015, disponível em

<http://www.tudoimpressora3d.com.br/impressao-em-3d/>

[3] Acesso em 5 de Outubro de 2015, disponível em

<http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2014/10/test-drive-carro-feito-por-impressora-3d-circula-pelas-ruas-de-nova-york.html>

[4] Acesso em 02 de Outubro de 2015, disponível em

http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-709321601-filamento-abs-3mm-ou-175mm-impressora-3d-alta-performance-_JM

[5] Acesso em 22 de Agosto de 2015, disponível em <http://www.vision->

[systems.com/articles/2012/01/teledyne-dalsa-piranha-hs-nir-8k-camera.html](http://www.vision-systems.com/articles/2012/01/teledyne-dalsa-piranha-hs-nir-8k-camera.html)

[6] Acesso em 20 de Agosto de 2015, disponível em

<http://parquedaciencia.blogspot.com.br/2013/07/como-funciona-e-para-que-serve-o.html>

[7] Acesso em 15 de Outubro de 2015, disponível em

<http://agribotix.com/blog/2014/6/10/misconceptions-about-uav-collected-ndvi-imagery-and-the-agribotix-experience-in-ground-truthing-these-images-for-agriculture>

[8] Acesso em 14 de Outubro de 2015, disponível em <http://droneng.com.br/ndvi-com-drones-saude-da-vegetacao-atraves-de-imagens/>

[9] Acesso em 20 de Outubro de 2015, disponível em

<http://lista.mercadolivre.com.br/aeromodelismo/frame-quadricoptero-tbs-discovery>

[10] Acesso em 22 de Setembro de 2015, disponível em

<http://www.robotshop.com/blog/en/make-uav-lesson-3-propulsion-14785>

[11] Acesso em 13 de Outubro de 2015, disponível em

<http://blog.opovo.com.br/asaseflaps/quadricopteros-aprenda-um-pouco-mais-sobre-esta-maravilhosa-maquina/>

[12] Acesso em 30 de Agosto de 2015, disponível em

<http://www.robotshop.com/blog/en/make-uav-lesson-3-propulsion-14785>

[13] Acesso em 20 de Agosto de 2015, disponível em

<http://www.robotshop.com/blog/en/make-uav-lesson-3-propulsion-14785>

[14] Acesso em 20 de Agosto de 2015, disponível em

<http://www.robotshop.com/blog/en/make-uav-lesson-3-propulsion-14785>

[15] Acesso em 10 de Outubro de 2015, disponível em

http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__9364__ZIPPY_Flightmax_4000mAh_4S1P_20C.html

[16] Acesso em 22 de Agosto de 2015, disponível em

http://pt.aliexpress.com/store/product/Wholesale-DYS-D2830-750KV-Brushless-Outrunner-Motor-For-Mini-Multicopters-RC-Plane-Helicopter-Free-Shipping/626217_32337453542.html?storeId=626217

[17] Acesso em 24 de Agosto de 2015, disponível em

<http://www.rchopez.com/products/DYS-D2830-14-750KV-Brushless-Motor/1347>

[18] Acesso em 20 de Novembro de 2015, disponível em <https://gopro.com/update/hero3>

[19] Acesso em 15 de Novembro de 2015, disponível em <http://doctordrone.com.br/o-que-e-apm/>

[20] Acesso em 15 de Novembro de 2015, disponível em <http://doctordrone.com.br/o-que-e-apm/>

[21] Acesso em 22 de Novembro de 2015, disponível em

<http://pt.aliexpress.com/item/NEW-HobbyKing-Turnigy-Plush-2X30A-30AMP-Brushless-ESC-w-5V-2A-BEC-speed-control/1079980967.html>

[22] Acesso em 01 de Setembro de 2015, disponível em <http://www.sethi3d.com.br/>

[23] Acesso em 15 de Novembro de 2015, disponível em

<http://hello3dprintingworld.pt/product/estados-unidos-nylon-t-glase-preto-1-75mm-453g/>

(s.d.). Acesso em 05 de Setembro de 2015, disponível em <https://www.embrapa.br/>

(s.d.). Acesso em 15 de Agosto de 2015, disponível em

http://www.ehow.com.br/diferenca-entre-motores-escovas-info_48456/

(s.d.). Acesso em 10 de Agosto de 2015, disponível em

<http://www.visaoagro.com/#!Brasil-ser%C3%A1-maior-exportador-agr%C3%ADcola-mundial-em-2024-dizem-OCDE-e-FAO/c1nni/559566910cf28e6871292bb2>

(s.d.). Acesso em 30 de Julho de 2015, disponível em <http://droneng.com.br/drones-e-agricultura-exemplo-de-aplicacao-em-rotacoes-de-cultura/>

(s.d.). Acesso em 10 de Agosto de 2015, disponível em

<http://www.abcdosaber.com.br/v1/index.php/videos/eletronica/165-tutorial-quadricoptero>

(s.d.). Acesso em 30 de Novembro de 2015, disponível em

<http://printerhaus.com.br/entenda-os-diferentes-filamentos-para-impressao-3d/>

(s.d.). Acesso em 25 de Agosto de 2015, disponível em

<https://sites.google.com/site/quadcopterdesignfabrication/team-contributions-and-appendix>

(s.d.). Acesso em 11 de Outubro de 2015, disponível em
http://www.eletronpi.com.br/projeto_de_drone_autonomia.aspx

(s.d.). Acesso em 13 de Setembro de 2015, disponível em <http://doctordrone.com.br/>

Castro, J., & Meggiolaro, M. *FADIGA - Iniciação de Trincas* (Vol. I).

Castro, J., & Meggiolaro, M. *FADIGA - Propagação de Trincas, Efeitos Térmicos e Estocásticos* (Vol. II).

Gere, J., & Goodno, B. *Mecânica dos Materiais*. (C. Learning, Ed.)

Meggiolaro, M. (2009). *RioBotz Combot Tutorial*.

Norris, D. (2014) *Build Your Own Quadcopter*.

Thedin, R. S. (Julho de 2014). Topology Optimization using Polyhedral Meshes.