



João Pedro Marçano Carvalho

**Aplicação do método de otimização
topológica no projeto estrutural do braço de
um drone**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio.

Orientador: Anderson Pereira

Rio de Janeiro
Julho de 2021

Agradecimentos

Gostaria inicialmente de agradecer aos meus pais, Glauco e Francilene, por terem proporcionado meu estudo em uma das maiores universidades do país, além de sempre estarem ao meu lado e me apoiarem em todas as minhas escolhas e decisões, assim como meus avós, minha irmã Nathália e minha namorada Luciana.

Agradeço ao professor Anderson Pereira por ter aceitado ser meu orientador nesta última etapa da faculdade e pelo apoio na execução do projeto.

Também gostaria de agradecer a todos meus amigos da Engenharia Mecânica: Letícia, Giovanna, Pedros, Pablo, Rodrigo e Fred, que estiveram comigo do início ao fim, sempre ajudando uns aos outros. Sei que poderei contar com todos daqui para frente.

Um agradecimento a Equipe AeroRio, a qual tive a honra de fazer parte por 2 anos, que me agregou enorme conhecimento e histórias que irei carregar comigo por toda vida, além de despertar ainda mais o meu interesse pela engenharia mecânica. Agradeço ao Renan, Paula, Vidi, Lari, Paulete, Thiago, Marketty, Vivi, Lili, Pablo, Lucas, Petrus, Matheus, Lopes e todos os outros membros que se dedicaram e se dedicam a esta equipe incrível.

Aos meus amigos Hugo, Manu, Gustavo, Jonga, Bina e Malta, que estiveram comigo ao longo de todos os anos e que sempre vão estar ao meu lado, meu agradecimento especial. Por fim, um agradecimento ao meu amigo Erik Strauss, Stro, que esteve comigo desde a alfabetização até a formatura e que foi essencial na conclusão deste trabalho.

Resumo

Aplicação do método de otimização topológica no projeto estrutural do braço de um drone

Com o avanço da tecnologia e popularização dos drones, estes veículos vem sendo aplicados em diversas áreas da indústria. Além do avanço dos drones, a manufatura aditiva também tem sido utilizada cada vez mais no mercado. Atrelada a ela, está a otimização topológica que possibilita a construção de estruturas complexas que não são possíveis de serem fabricadas por meio de metodologias convencionais. Neste trabalho será estudada a aplicação da otimização topológica, por meio do *software Altair Inspire*, no braço de um drone, com o objetivo de aumentar a rigidez. Após a otimização, de modo a comprovar a eficiência desta metodologia, será feita uma análise estrutural comparando um modelo comercial com o modelo otimizado.

Palavras-chave

Otimização Topológica; Drones; Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT); Manufatura aditiva;

Abstract

Topology optimization method application at drone arm structural project

With the advancement of technology and the popularization of drones, these vehicles are being applied in various areas of industry. In addition to the advancement of drones, additive manufacturing has also been increasingly used in the market. Linked to it is the topological optimization that enables the construction of complex structures that are not possible to be manufactured through conventional methodologies. In this paper the application of topological optimization, through *software Altair Inspire*, will be studied on the arm of a drone, with the aim of increasing the stiffness. After the optimization, in order to prove the efficiency of this methodology, a structural analysis will be done comparing a commercial model with the optimized model.

Keywords

Topology optimization; Drones; Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Additive Manufacture;

Sumário

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Introdução | 8 |
| 2 | Metodologia | 10 |
| 2.1 | Otimização Topológica (OT) | 10 |
| 2.2 | Manufatura aditiva (MA) | 12 |
| 3 | Drone e seus principais componentes | 15 |
| 3.1 | Hélices | 15 |
| 3.2 | Motor | 17 |
| 3.3 | Controlador Eletrônico de Velocidade | 19 |
| 3.4 | Controlador de voo | 19 |
| 3.5 | GPS | 20 |
| 3.6 | Bateria | 21 |
| 3.7 | Transmissor e Receptor | 22 |
| 3.8 | Quadro | 22 |
| 4 | Otimização Topológica no braço de um drone | 23 |
| 4.1 | Objeto de estudo | 23 |
| 4.2 | <i>Software</i> utilizado | 24 |
| 4.3 | Domínio inicial | 24 |
| 4.4 | Condições de contorno | 25 |
| 4.5 | Escolha de material | 30 |
| 5 | Resultados | 31 |
| 5.1 | Otimização topológica | 31 |
| 5.2 | Polynurbs | 33 |
| 5.3 | Análise estrutural do modelo otimizado | 34 |
| 6 | Conclusão | 41 |
| 6.1 | Sugestão para trabalhos futuros | 41 |

Lista de figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Tipos de drones | 8 |
| 2.1 | Tipos de otimizações estruturais [1] | 10 |
| 2.2 | Aplicação da penalidade no modelo SIMP [2] | 11 |
| 2.3 | Esquemático de uma manufatura aditiva - Modelagem de deposição fundida (Fonte: Adaptado de [3]) | 13 |
| 2.4 | Problemáticas de uma estrutura inclinada - Sinterização seletiva a laser [4] | 13 |
| 2.5 | Suportes para estruturas 3D [5] | 14 |
| 3.1 | Exemplos de diâmetros de hélices. [6] | 16 |
| 3.2 | Passo de uma hélice na prática. [7] | 16 |
| 3.3 | Número de pás. [6] | 17 |
| 3.4 | Rotação das hélices de um quadricóptero (Fonte: Adaptado de [8]) | 17 |
| 3.5 | Tipos de motores DC | 18 |
| 3.6 | Controlador Eletrônico de Velocidade. [9] | 19 |
| 3.7 | Funcionamento de um GPS (Fonte: Adaptado de [10]). | 20 |
| 3.8 | Principais características de uma bateria (Fonte: Adaptado de [11]). | 21 |
| 4.1 | DJI F450. [12] | 23 |
| 4.2 | Domínio inicial do projeto. | 24 |
| 4.3 | Vista superior do domínio inicial do projeto. | 25 |
| 4.4 | Fixação do modelo. | 26 |
| 4.5 | Caso de cargas 1. | 27 |
| 4.6 | Caso de cargas 2. | 28 |
| 4.7 | Caso de cargas 3. | 28 |
| 4.8 | Caso de cargas 4. | 29 |
| 4.9 | Caso de cargas 5. | 29 |
| 5.1 | Configurações da otimização topológica. | 31 |
| 5.2 | Estrutura otimizada | 32 |
| 5.2 | Estrutura pós processada | 34 |
| 5.3 | Configurações da análise estrutural. | 35 |
| 5.4 | von Mises para estrutura otimizada | 36 |
| 5.5 | Deslocamentos para estrutura otimizada | 37 |
| 5.6 | Binário de forças no suporte do motor. | 37 |
| 5.7 | Von Misses para estrutura otimizada | 38 |
| 5.8 | Deslocamentos para estrutura otimizada | 39 |
| 5.9 | Modelo de um drone com os braços otimizados. | 40 |

Lista de tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Dados do motor KDE2315XF-2050 [13] | 26 |
| 4.2 | Massa dos componentes | 27 |
| 4.3 | Propriedades mecânicas dos materiais[14]. | 30 |
| 5.1 | Comparação de materiais. | 35 |
| 5.2 | Análise dos resultados. | 40 |

1

Introdução

Para a aviação, um drone é classificado como uma aeronave sem a presença de um piloto, ou também conhecido com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). O uso desse tipo de aeronave está em constante crescimento, onde é esperado um crescimento de 2020 para 2027 de aproximadamente 14,1%[15]. Cada vez mais novos mercados estão aderindo a utilização deste instrumento para a execução de tarefas que anteriormente necessitavam de um ou mais humanos, ou até mesmo não eram possíveis de serem realizadas.

Estas aeronaves foram inicialmente implementadas no setor de defesa, quando os mesmos eram enviados para guerras, porém com o avanço da tecnologia e a maior acessibilidade do equipamento, mais setores começaram a aplicar os drones em seu dia a dia. Além do setor da defesa, outros meios como entregas, saúde, construção civil, energia, corridas e muitos outros setores [16], já estão implementando esta tecnologia.



1.1(a): Drone para entregas [17]



1.1(b): Drone para corrida [18]

Figura 1.1: Tipos de drones

Uma das principais restrições destes aeromodelos é o tempo de voo, uma vez que eles possuem um limite de peso para decolagem e as baterias utilizadas possuem pesos consideráveis. Por conta disto, este trabalho visa a aplicação da otimização topológica na estrutura de um drone, com o objetivo de aumentar a sua rigidez estrutural.

Com a redução da massa da aeronave é possível conseguir mais tempo de voo [19]. Neste trabalho, a análise levará em consideração que o modelo irá transportar encomendas; sendo assim, com a redução de massa da estrutura, uma carga maior pode vir a ser transportada. Grandes marcas como *iFood*, *Amazon*, *Dominos*, entre outras, já estão realizando testes para a entrega por

meio de VANT's. Atrelando essas duas tecnologias, essas empresas podem ampliar a quantidade de produtos a serem entregues por meio desses veículos.

Um dos principais desafios da otimização topológica é a construção de seus modelos, porém, graças aos avanços da tecnologia, a manufatura aditiva permite que essas estruturas venham a ser construídas, conforme será descrito na seção 2.2.

Por meio da manufatura aditiva, é possível viabilizar a fabricação do drone em diversos materiais, uma vez que é possível trabalhar com metais, cerâmicas, polímeros e outros. Além disto, é possível realizar um projeto integrado, fazendo com que o número de peças seja reduzido, o que pode vir a beneficiar o tempo de construção do modelo, conforme apresentado no artigo "*Development of 3D-printed floating Quadrotor for collection of algae in remote water bodies*"[19], onde o modelo fabricado por manufatura aditiva levou a metade do tempo que um modelo já existente. Além disso, por meio desta metodologia, a substituição de componentes é facilitada.

2

Metodologia

Nesta seção, serão descritas as principais metodologias que foram empregadas e consideradas durante o desenvolvimento deste trabalho.

2.1

Otimização Topológica (OT)

A otimização estrutural pode ser dividida em três tipos: otimização paramétrica, otimização de forma e otimização topológica. As três irão diferir de acordo com o foco nos aspectos estruturais, respeitando a função objetivo e restrições iniciais e variáveis do projeto. A otimização paramétrica irá focar na distribuição de espessura ideal em um componente já existente ou as áreas ótimas em uma estrutura treliçada. Para a otimização de forma, o principal objetivo é encontrar um formato ótimo do domínio inicial sem alterar as suas características principais. Por fim, a otimização topológica, irá distribuir o material da forma mais adequada, dentro de domínio inicial [20]. Na Figura 2.1, é possível observar as otimizações estruturais mencionadas.

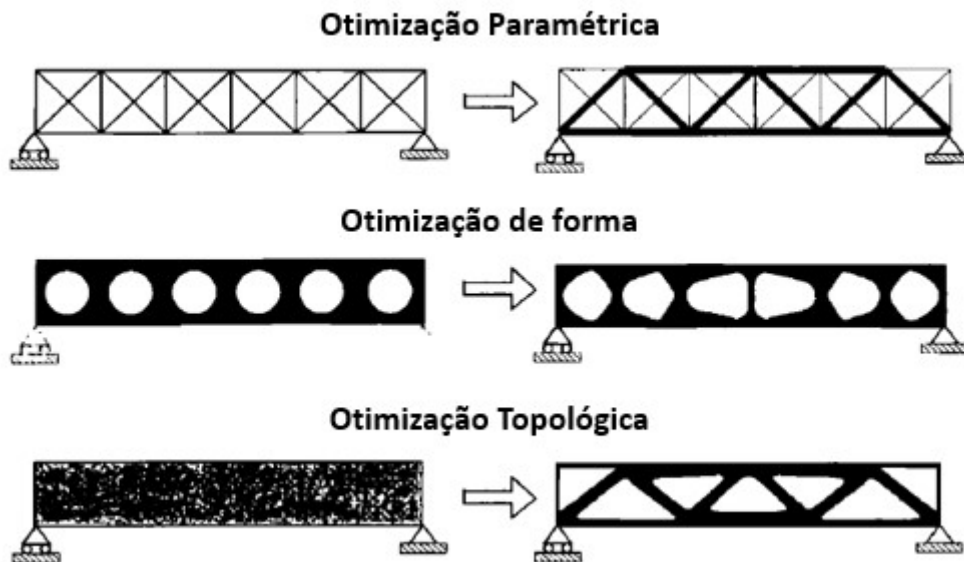


Figura 2.1: Tipos de otimizações estruturais [1]

Visando garantir a performance e redução de peso, a otimização paramétrica e otimização de forma já são duas técnicas tradicionais aplicadas no mercado aeronáutico, espacial e automotivo [21]. Já a otimização topológica é uma metodologia que começou a ser estudada a partir da publicação do ar-

tigo "An investigation concerning optimal design of solid elastic plates"[20] em 1981 e por meio deste, novos estudos foram realizados para o avanço desta técnica, como o publicado por Bendsøe e Kikuchi [1], que foi um grande marco para o início da pesquisa desta metodologia.

Conforme mencionado anteriormente, no projeto de uma OT o interesse é determinar o posicionamento ótimo de um determinado material isotrópico no espaço. Para melhor entendimento, a estrutura otimizada irá possuir regiões com e sem material, podendo ser representado por uma matriz com valores 1 e 0 respectivamente, que a grosso modo representam a densidade do material. Existe a possibilidade de valores intermediários serem definidos para essa densidade, porém estes serão penalizados de acordo com o modelo *solid isotropic material with penalty* (SIMP), fazendo com que os valores das densidades se aproximem de 1 ou 0, para que, assim, seja definida a presença ou não de material (Figura 2.2)[22].

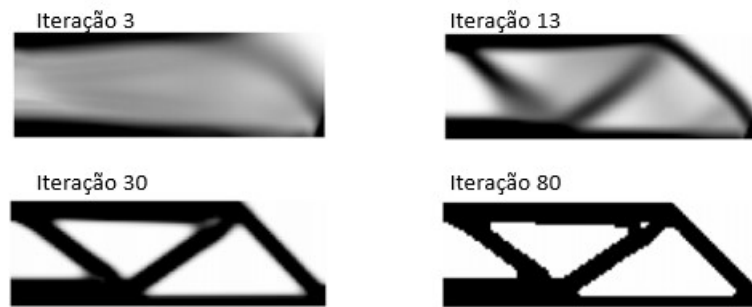


Figura 2.2: Aplicação da penalidade no modelo SIMP [2]

Como é possível observar na Fig. 2.2, as regiões em branco são as que não possuem material, representadas pela densidade 0, e em preto áreas com material, representadas pela densidade 1. Além destas duas áreas, há também a região em cinza, que representa a região onde há densidade entre 0 e 1; estas, que serão penalizadas para determinar se haverá ou não a presença de material.

Para que ocorra então a otimização da estrutura desejada, é necessário definir um domínio inicial, onde deverão ser aplicadas as condições de contorno (ex: forças, torques, fixação e outros) e também as partes que não deverão ser otimizadas, além de se definir a função objetivo, que geralmente é minimizar a massa ou maximizar a rigidez. A partir dessas informações, o modelo deverá ser subdividido em elementos finitos, que irão construir uma malha, onde cada um possuirá variáveis locais, que juntas irão corresponder às variáveis globais do sistema. Durante o processo de otimização, é realizado o cálculo dos deslocamentos que irão prover as deformações e consequentemente as tensões, até chegar em um modelo ideal. Sendo assim, quanto maior o número de elementos, mais dados serão obtidos, gerando resultados mais precisos, porém

com um custo computacional elevado que pode vir a necessitar de mais tempo para se obter o resultado final.

2.2

Manufatura aditiva (MA)

Dentro da manufatura aditiva existem diversos processos utilizados, como a Esteriolitografia (SLA), que utiliza um laser e fotopolimerização para solidificar o material, geralmente resina ou epoxy. Além desta, há também a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), que consiste no pó de um polímero que é sintetizado e solidificado por meio de um raio laser. Há também outras metodologias, como Modelagem de Deposição Fundida (FDM), ilustrada na Figura 2.3, em que um filamento é aquecido dentro de uma câmara, tornando-se maleável e passível de ser depositado sobre camadas até criar o material final [23]. Além dessas metodologias, existem outras diversas que podem ser utilizadas. Contudo, no presente trabalho, foram abordadas as mais usuais.

Uma das principais vantagens da otimização topológica é o aumento da rigidez estrutural e devido a uma melhor distribuição do material, há também redução da massa dos componentes, como será observado nas seções futuras deste trabalho. Porém, um dos grandes desafios para colocar a otimização em prática é a fabricação dos componentes, uma vez que são geradas estruturas complexas e os métodos convencionais de fabricação não são capazes de produzir tais peças [24].

Devido a isso, um grande aliado da OT é a manufatura aditiva, um processo que consiste na superposição de camadas (Figura 2.3) até que um objeto físico seja formado. Nesse processo, podem ser utilizados diversos tipos de materiais, como cerâmicas, metais, polímeros e outros[25].

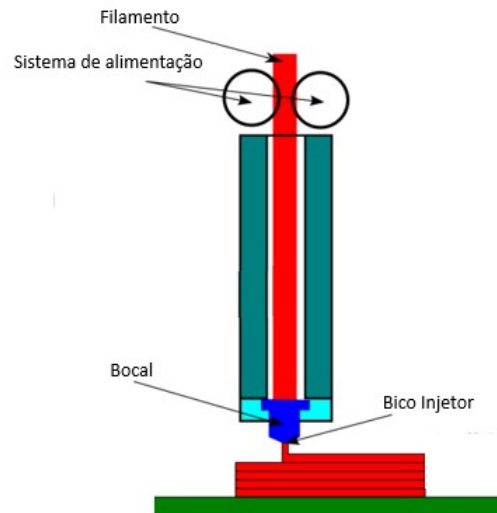


Figura 2.3: Esquemático de uma manufatura aditiva - Modelagem de deposição fundida (Fonte: Adaptado de [3])

Um dos desafios desta metodologia é a construção de superfícies com inclinações superiores a 45° (Figura 2.4). Quando este tipo de estrutura é exigida, se faz necessária a construção de um suporte para o objeto final, visando evitar que este tipo de defeito venha a ocorrer (Figura 2.5). Vale ressaltar que, ao final, estes suportes serão cortados e descartados, servindo apenas durante o processo de fabricação.

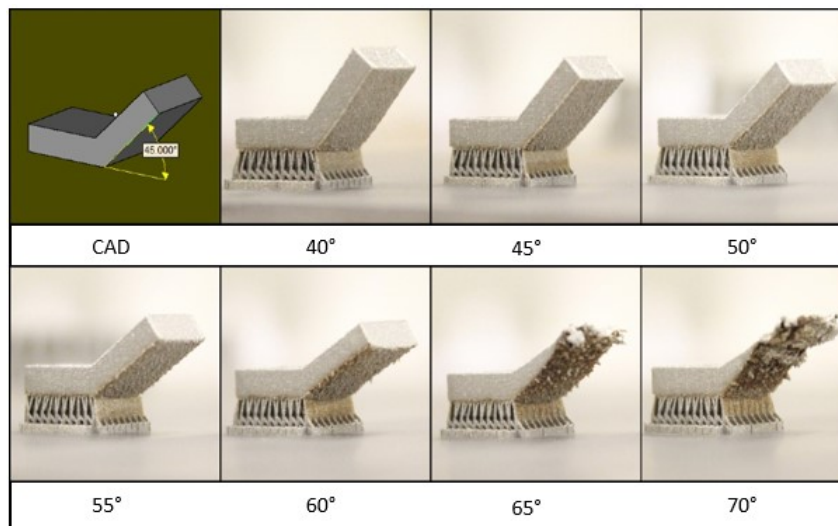


Figura 2.4: Problemáticas de uma estrutura inclinada - Sinterização seletiva a laser [4]



Figura 2.5: Suportes para estruturas 3D [5]

Este tipo de fabricação tem algumas vantagens quando comparada às metodologias tradicionais, como a economia de energia, que pode chegar a 50%, e de material, em até 90%. Além da minimização do desperdício de material, não é necessária a troca constante de ferramentas, a produção de objetos complexos, entre outros. Contudo, há também algumas desvantagens, como: maior tempo de produção, acuracidade dimensional, construção de superfícies brutas e alguns outros pontos, conforme mencionado no artigo *"Preliminary topology optimization of small unmanned aircraft wings for additive manufacturing"*[25], de Cátia Alexandra Louro Miguel.

3

Drone e seus principais componentes

Visando um maior entendimento acerca do funcionamento de um drone, nesta seção serão descritos seus principais componentes e aplicações. Por meio deste detalhamento, será possível entender o princípio de funcionamento deste tipo de aeronave e como elas são capazes de voar.

3.1

Hélices

A hélice de um drone é um dos principais componentes do veículo, pois por meio de sua rotação é provocado o empuxo do ar. Este é gerado devido a uma diferença de pressão entre o lado superior e inferior do componente, que irá provocar uma movimentação de ar, em uma direção contrária à gravidade, que será o necessário para fazer com que o drone levante voo e permaneça no ar [7]. Existem três parâmetros que irão caracterizar a hélice de um drone: o seu diâmetro, o passo e número de pás.

3.1.1

Diâmetro

O diâmetro da hélice (Figura 3.1) irá influenciar diretamente no tamanho do braço da aeronave e também na escolha do motor a ser utilizado. Hélices menores exigem menos energia para alcançar uma dada velocidade de rotação. Devido a uma inércia reduzida, tais hélices são de mais fácil controle e variação de velocidade. Já as de maior diâmetro, vão gerar um empuxo maior em RPM's menores, além de oferecerem uma maior estabilidade ao veículo enquanto estiver pairando pelo ar. Em contrapartida, exigem motores mais potentes [7].

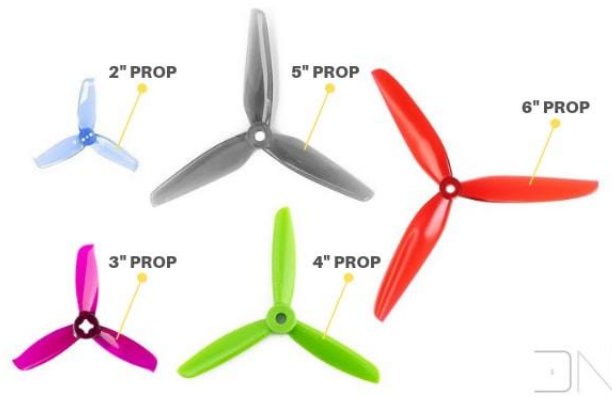


Figura 3.1: Exemplos de diâmetros de hélices. [6]

3.1.2

Passo

O passo de uma hélice se assemelha ao passo de um parafuso Fig. 3.2, estando diretamente relacionado com o quanto a aeronave irá se mover em uma rotação completa da hélice sob condições ideais [8]. Para que seja gerado maior empuxo pela aeronave, são necessárias hélices com um passo maior. Um fator de cuidado, nesse caso, merece registro, pois o gasto de energia pelo motor será maior [7; 8].

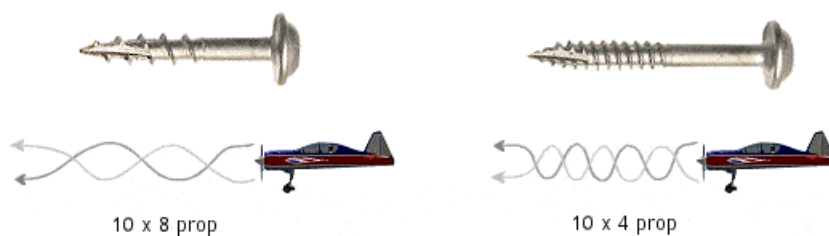


Figura 3.2: Passo de uma hélice na prática. [7]

3.1.3

Número de pás

Outro fator que pode melhorar o empuxo gerado pelas hélices é a quantidade de pás que ela possui Fig. 3.3. Quanto maior o número de pás, maior será a força gerada por elas, porém aumentará a ineficiência da aeronave, uma vez que o arrasto gerado também irá aumentar [7; 8].

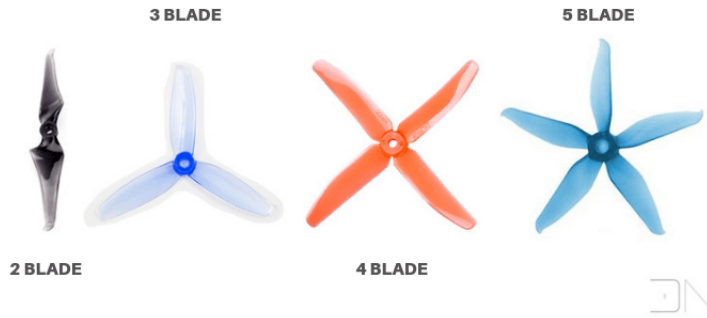


Figura 3.3: Número de pás. [6]

Além dos parâmetros mencionados acima, também é importante considerar que para um conjunto de hélices de um drone convencional com quatro motores, são necessárias duas hélices que rodem no sentido horário e duas no anti-horário. Esta configuração deve ser respeitada para que os torques dos motores se anulem quando o veículo estiver em movimento de subida, descida ou pairando. Para melhor entendimento, a Figura 3.4 abaixo demonstra o drone com os sentidos de rotação das hélices, em que os motores 1 e 4 possuem o mesmo sentido de rotação e os 2 e 3 o sentido oposto.



Figura 3.4: Rotação das hélices de um quadricóptero (Fonte: Adaptado de [8])

3.2 Motor

Os motores dos drones, junto com as hélices, são responsáveis por gerar o empuxo necessário para que a aeronave levante voo. Este componente pode operar em corrente contínua (DC) ou alternada (AC). Porém, neste segmento, os motores DC são os mais escolhidos, podendo eles serem divididos em duas categorias, com e sem escovas (*"brushless"* ou BLDC) - Figuras 3.5(a) e 3.5(b). A grande diferença entre os dois modelos se dá na presença ou não das escovas de carbono em sua composição.



3.5(a): Motor DC com escova [26]



3.5(b): Motor DC sem escova [27]

Figura 3.5: Tipos de motores DC

Os motores *brushless* se destacam por não possuírem as escovas de carbono, que são componentes que comprometem a vida útil dos motores, já que elas se desgastam com o decorrer do tempo, inviabilizando a sua utilização. Além da vida útil, os motores BLDC são mais eficientes, ou seja, maior quantidade da potência do motor está sendo utilizada para gerar força rotacional, ao invés de perda de calor. Os motores BLDC possuem uma eficiência que varia entre 85 e 90%, enquanto que os propulsores com escovas variam de 75 a 80%[28].

3.2.1

Relação Empuxo x Peso

A regra de ouro para a escolha dos motores se baseia na proporção de empuxo gerado com o peso total da aeronave. O mais habitual é a relação de dois para um, onde o empuxo total gerado é duas vezes maior que o peso da aeronave. Porém não é uma regra que esta relação seja atingida, existem casos de seis para um ou até mesmo oito para um, quando há uma variação da massa da aeronave, como por exemplo na troca de câmeras em drones voltados para a fotografia [28].

3.2.2

kV

O índice kV de um motor irá indicar a quantidade de rotações que este componente irá realizar para cada volt fornecido ao motor. Vale ressaltar que quanto maior o kV, implica em uma menor resistência do ar, menor eficiência e um consumo maior de corrente, enquanto menor o kV o oposto é aplicado [28].

3.3

Controlador Eletrônico de Velocidade

Popularmente conhecidos como ESC (*Electronic speed controller*), estes componentes são responsáveis por controlar a voltagem que será entregue ao motor (Figura 3.6). Consequentemente, esta variação de voltagem irá proporcionar um aumento ou redução da RPM, causando, então, um aumento ou redução do empuxo gerado [29]. Essa variação é controlada por meio do comando do operador da aeronave, seja ele físico (controle remoto) ou computacional.

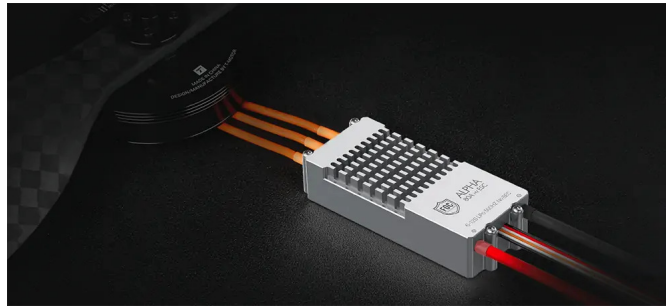


Figura 3.6: Controlador Eletrônico de Velocidade. [9]

3.4

Controlador de voo

Para que um VANT possa realizar um voo, este componente se torna essencial. Um controlador de voo é um circuito impresso, do inglês *Printed Circuit Board* (PCB), onde são processados diversos sinais de entrada que irão gerar sinais de saída que sejam adequados para a continuidade do voo, sendo considerado por muitos o cérebro da aeronave [29].

Os sinais de entrada são obtidos por meio de diversos sensores que estão instalados nesse controlador. São eles:

3.4.1

Unidade de medida inercial

Também conhecida como IMU (*Inertial Measurement Unit*), a sua principal função consiste em determinar a orientação e movimentação da aeronave. Para que isso possa ser feito, a IMU conta com dois sensores.

Acelerômetro

Acelerômetros são responsáveis por medir a aceleração do drone nos eixos X, Y e Z, sendo possível determinar qual o sentido para baixo, uma vez que a gravidade é estabelecida como parâmetro para este sensor.

Giroscópio

Já o giroscópio irá determinar a variação da velocidade angular também nos eixos X, Y e Z[30].

3.4.2

Barômetro

O Barômetro será utilizado para determinar a altitude em que a aeronave se encontra, uma vez que a pressão atmosférica varia de acordo com a distância para o nível do mar.

3.4.3

Magnetômetro

Este sensor irá funcionar como uma bússula. Nesse caso, uma bússula eletrônica irá detectar o campo magnético da terra, respeitando o norte magnético.

3.5

GPS

Global Positioning System, também conhecido como GPS, é um sistema de navegação por satélite, operado por meio de um receptor de sinais de rádio que, com base nas ondas emitidas, determina a posição, velocidade e tempo.

Todas essas características provêm do sinal de três ou quatro satélites. Suas ondas de rádio se cruzam (Figura 3.7), fazendo uma interseção de sinais capaz de prover as informações mencionadas.

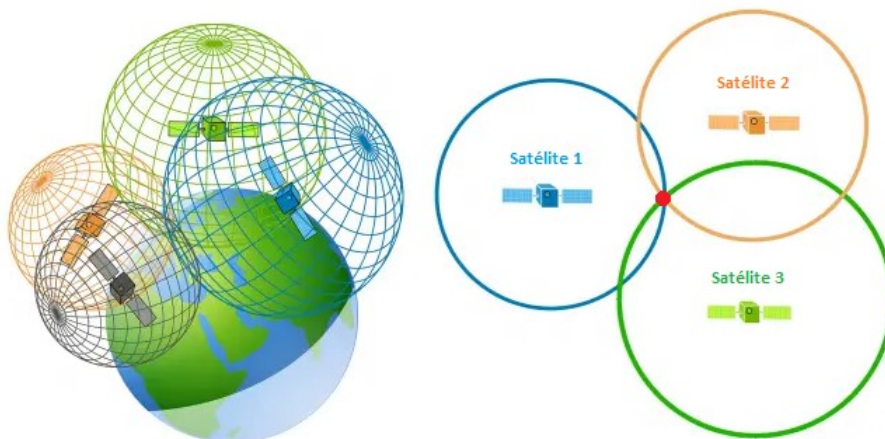


Figura 3.7: Funcionamento de um GPS (Fonte: Adaptado de [10]).

3.6

Bateria

A bateria é o componente responsável por fornecer a energia que irá permitir o funcionamento dos outros componentes da aeronave, fazendo com que a mesma levante voo. Dentro do mercado de drones, as baterias de Lítio Polímero (LiPo) são as mais escolhidas, visto que são mais leves, possuem alta capacidade de armazenar energia e coeficiente de descarga maior, possibilitando assim uma transferência de energia mais acelerada.



Figura 3.8: Principais características de uma bateria (Fonte: Adaptado de [11]).

Existem algumas características das baterias que devem ser levadas em consideração na hora de se escolher qual utilizar:

3.6.1

Tensão

O valor nominal utilizado pela indústria para a bateria de LiPo é de 3,7V por célula, representado pela letra S. Logo, para determinar a tensão da bateria é necessário multiplicar a quantidade de células em série por 3,7.

A tensão está diretamente relacionada à velocidade de rotação das hélices, uma vez que o índice kV dos motores indica a relação de RPM com a tensão, onde quanto maior for esta, maior será o RPM.

3.6.2

Capacidade

A capacidade de uma bateria é medida em *mAh* e está diretamente relacionada com o tempo de voo da aeronave; quanto maior a capacidade, mais tempo de voo. Porém, deve-se atentar, pois quanto maior a sua capacidade, também será maior o seu peso, podendo reduzir o tempo de voo e dimensões.

Além disso, merece destaque o risco de superaquecimento do drone, causando danos a outros componentes[31].

3.7

Transmissor e Receptor

O conjunto transmissor receptor será responsável pela comunicação entre o operador e a aeronave. O transmissor será responsável por emitir os comandos desejados pelo operador, seja ele humano ou computacional, e o receptor irá captar estes comandos quase que em tempo real. A partir daí, ele irá reproduzir os dados para o controlador de voo, para que a aeronave possa responder de acordo com o que foi solicitado [32].

3.8

Quadro

O quadro de um drone é o corpo do mesmo e o que irá caracterizar a quantidade de motores que serão utilizados. A configuração mais comum encontrada nos dias de hoje é a configuração em X com 4 braços (quadricóptero), logo 4 motores. Porém, também é possível encontrar com 6 ou 8 braços, além da opção de 4 braços com motores na parte superior e inferior[30].

Vale ressaltar que o tamanho do quadro será fundamental para a escolha das hélices que poderão ser instaladas, o que irá influenciar também no empuxo máximo que pode ser realizado, afetando diretamente o peso máximo que a aeronave pode transportar [7].

4

Otimização Topológica no braço de um drone

Neste capítulo, será descrito o objeto de estudo, *software* utilizado, condições de contorno e escolha de material que foram considerados para a realização deste projeto.

4.1

Objeto de estudo

Com a finalidade de comprovar a eficiência da aplicação da otimização topológica, tomou-se como base um modelo já existente no mercado de braço de um drone. Para este projeto, foi considerado como base para comparação o modelo F450 (Figura 4.1) da marca DJI, uma das maiores fabricantes de drones para entretenimento do mundo.



Figura 4.1: DJI F450. [12]

Por existirem diversos meios de atuação em que os drones podem ser aplicados, conforme descrito na seção 1, para este estudo será considerado uma aeronave que tem como objetivo a aplicação no meio de entrega de encomendas, sendo assim, neste caso é necessário considerar que a aeronave em partes do voo irá carregar uma caixa, o que influencia na rigidez da estrutura. Caso não houvesse essa necessidade, o drone sofreria menos esforços estruturais, o que poderia influenciar no resultado final da otimização.

4.2

Software utilizado

Para a realização da otimização e também para a análise dos componentes, será utilizado o *software Inspire* da empresa *Altair*, programa desenvolvido para acelerar a criação, otimização e estudo de partes e montagens inovadoras e eficientes estruturalmente [14].

Para dar início à otimização, se faz necessário definir qual será o domínio inicial, ou seja, qual será a região em que haverá a otimização topológica. Em paralelo, devem ser definidos os casos de carga e fixação da estrutura, sendo essas as condições de contorno. Também se faz necessário definir qual será o material do componente.

Após a definição dos pontos mencionados acima, será definido o tipo de otimização que será realizada, com base na função objetivo, que podem ser: maximizar a rigidez, maximizar a frequência ou minimizar a massa. Para este estudo, será considerada a maximização da rigidez.

4.3

Domínio inicial

Antes de realizar a otimização, é necessário definir as áreas que serão otimizadas e as áreas que serão desconsideradas nesse processo.

As áreas otimizáveis são definidas como domínio inicial. Vale ressaltar que para este volume inicial se faz necessário considerar uma região maior que a original, para que o resultado não seja afetado pelo algoritmo do programa que irá realizar a otimização. Sendo assim, com base nestas informações, foi definido o seguinte domínio inicial:

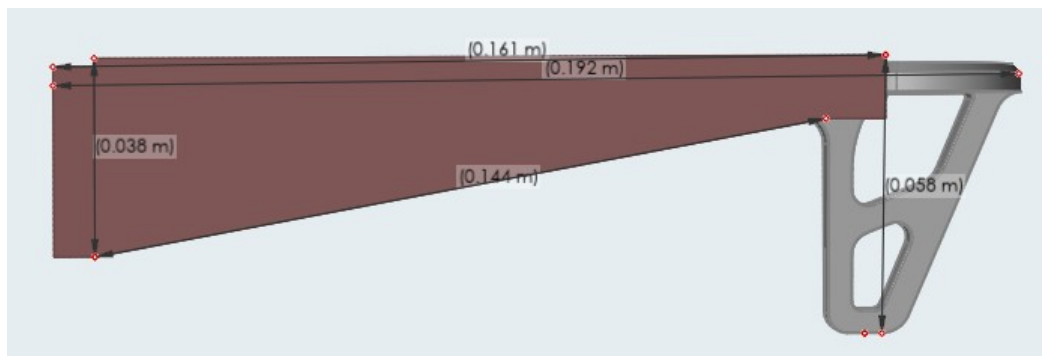


Figura 4.2: Domínio inicial do projeto.



Figura 4.3: Vista superioro do domínio inicial do projeto.

Com base nas figuras acima, a área em marrom representa o domínio inicial, já a área cinza representa as áreas que não serão otimizadas e permanecerão da mesma forma ao final do processo. Foi escolhido que essas áreas permaneçam com sua forma inicial, pois se tratam da região de suporte do motor do braço, um componente de extrema importância que deve ser acomodado da melhor forma possível em sua estrutura.

4.4

Condições de contorno

Uma das principais etapas para a obtenção do melhor resultado da otimização topológica é a definição das condições de contorno. A partir dela, será definida a metodologia de fixação da estrutura, assim como as principais cargas a serem aplicadas e seus respectivos casos de carga. Tal método justifica-se para que o algoritmo do *software* leve em consideração as condições mais críticas do sistema e obtenha a melhor solução possível.

4.4.1

Fixação da estrutura

Como o braço do drone deve ser mantido fixo durante todo o voo, se faz necessário fixar o mesmo a uma estrutura. Com esse pensamento, foram projetados quatro pequenos blocos (Figura 4.4) nos locais em que o braço seria aparafusado, sendo então este o ponto de fixação do modelo (o corpo do modelo foi ocultado para melhor visualização).

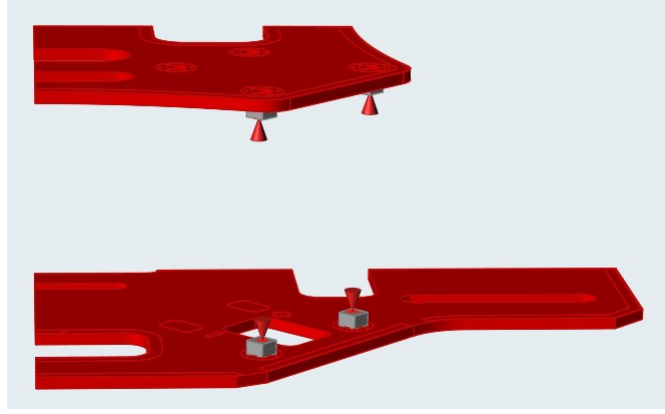


Figura 4.4: Fixação do modelo.

Para manter a estrutura fixada, em todos os casos de carga estudados os suportes foram considerados.

4.4.2

Cargas

Antes de descrever cada caso de cargas a serem aplicados, será descrito o que foi considerado e quais valores devem ser aplicados para cada força.

Para este modelo, foi considerado o motor KDE2315XF-2050 com uma hélice 6"x4.5 para determinação do empuxo e torque a serem aplicados na estrutura, por meio do datasheet do motor, obtido no site do fabricante [13]. Para que o pior caso fosse considerado e a otimização apresentasse um resultado correto, foram utilizados os valores para o motor em sua potência máxima, como na Tabela 4.1.

| Empuxo | RPM | Potência |
|---------|-----------|----------|
| [N] | [rev/min] | [kW] |
| 16.4808 | 27540 | 0,710 |

Tabela 4.1: Dados do motor KDE2315XF-2050 [13]

Com base nos dados acima é possível calcular o torque, conforme equacionamento abaixo:

$$P[kN] = T[Nm] * \omega[\frac{rad}{s}] \quad (4-1)$$

Que pode ser desenvolvida para obter:

$$P[kW] = T[Nm] * V[\frac{rev}{min}] * \frac{1}{60}[\frac{min}{s}] * 2\pi * 10^{-3}[\frac{kW}{W}] \quad (4-2)$$

$$T[Nm] = \frac{(60 * \frac{1000}{2\pi}) * P[kW]}{V[\frac{rev}{min}]} \quad (4-3)$$

Substituindo os valores da 4.1 em 4-4 encontramos:

$$T = 0,246[Nm] \quad (4-4)$$

Além do torque e empuxo do motor, também foram considerados os pesos estimados do motor, da caixa de delivery, peso de bateria e peso total do drone. Todos eles podem ser visualizados na tabela abaixo:

| Componente | Massa [kg] | Peso [N] |
|-------------------------|------------|----------|
| Motor | 0,075 | 0,73575 |
| Bateria | 0,500 | 4,9050 |
| Componentes eletrônicos | 0,500 | 4,9050 |
| Caixa de delivery | 0,500 | 4,9050 |
| Drone | 2,200 | 21,582 |

Tabela 4.2: Massa dos componentes

Com base no valor obtido na equação 4-4, no cálculo do empuxo e na Tabela 4.2, foi possível organizar os casos de cargas a serem aplicados no modelo a fim de obter a otimização da estrutura.

4.4.3

Caso de cargas 1: Decolagem com motor desligado

Para o primeiro caso foi considerado o drone apoiado no chão, com a caixa em sua base, logo nenhum braço encostaria no chão nessa condição, sendo então considerado o peso do motor, em cinza. Além disto, foi considerado o peso dos componentes eletrônicos em rosa, e bateria, em laranja.

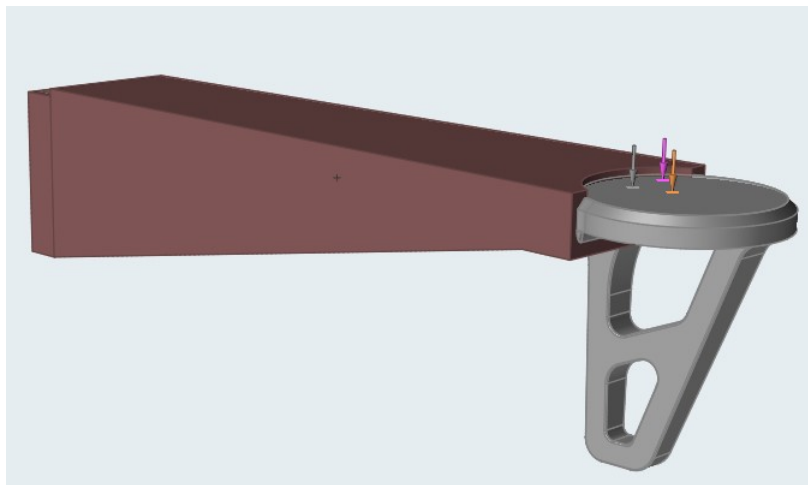


Figura 4.5: Caso de cargas 1.

4.4.4

Caso de cargas 2: Decolagem com motor na potência máxima

Neste caso está sendo considerada a aeronave na iminência de voar, sendo assim, deve ser aplicada a força de empuxo máxima do motor, em roxo, além do torque máximo (Equação 4-4), em preto, e os pesos dos componentes eletrônicos e bateria.

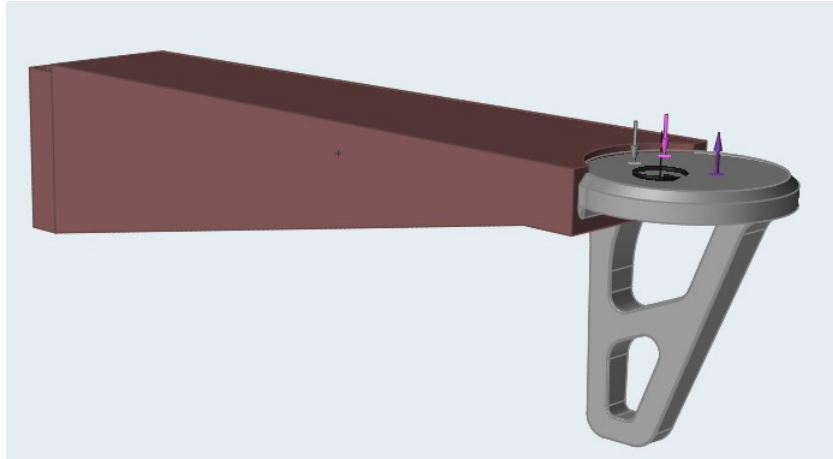


Figura 4.6: Caso de cargas 2.

4.4.5

Caso de cargas 3: Em voo

Uma vez em voo, com os motores em potência máxima, deve ser considerado o empuxo e torque máximo, além do peso dos componentes eletrônicos, bateria e caixa de delivery, em verde.

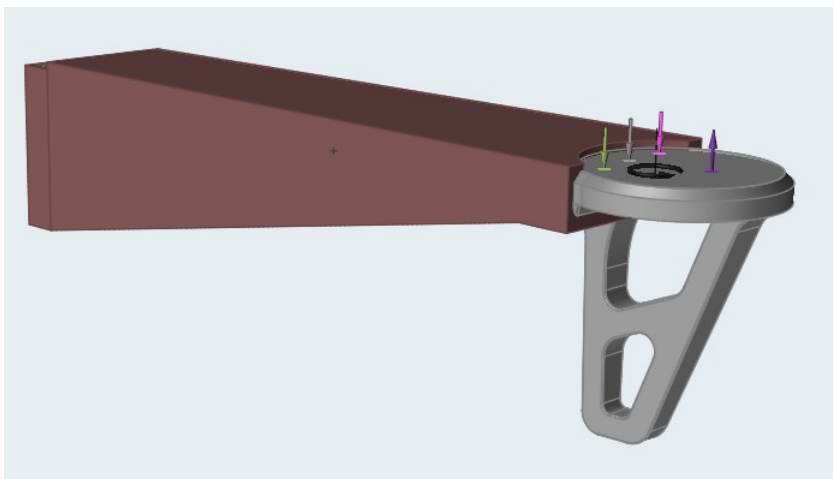


Figura 4.7: Caso de cargas 3.

4.4.6

Caso de cargas 4: Aterrisagem

No pouso do drone, já com os motores desligados, será considerado o peso da bateria e componentes eletrônicos. Neste caso, o peso dos motores foi desconsiderado, uma vez que o suporte irá tocar o chão.

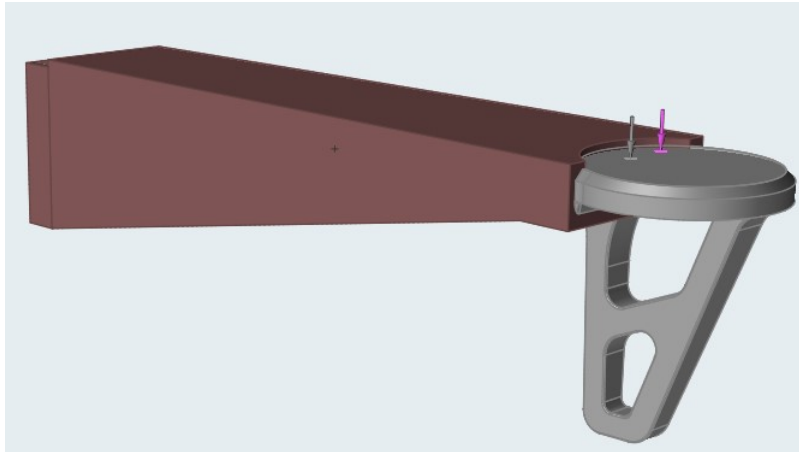


Figura 4.8: Caso de cargas 4.

4.4.7

Caso de cargas 5: Queda da aeronave

Sendo o caso mais crítico que a estrutura deve suportar, esse estado corresponde à queda da aeronave em um único braço, sendo considerado então o peso de toda a aeronave. Para este caso, foi considerada a aplicação da força para cima e para baixo, aplicados em casos separados, uma vez que a aeronave pode cair aplicando a força nos dois sentidos.

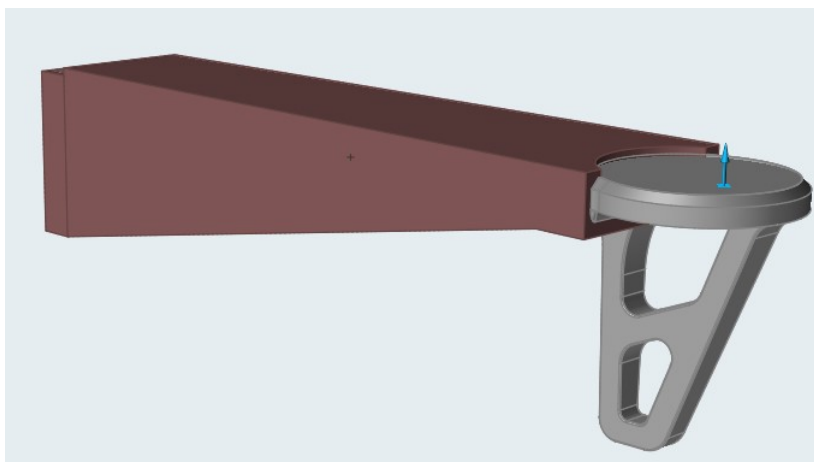


Figura 4.9: Caso de cargas 5.

4.5

Escolha de material

Conforme descrito na seção 2.2, a otimização topológica gera estruturas complexas que não são possíveis de serem fabricadas com as metodologias convencionais de fabricação.

Sendo assim, para a escolha do material, foram considerados 3 materiais amplamente utilizados na manufatura aditiva, tornando o modelo mais acessível, por abranger uma maior quantidade de impressoras que podem fabricar a estrutura[33]. Na Tabela 4.3 é possível observar as principais propriedades mecânicas destes materiais. A escolha final será baseada nos resultados encontrados, que serão expostos na próxima seção.

| Material | Módulo de Elasticidade E [Pa] | Poisson ν | Densidade [kg/m ³] | Tensão de ruptura [Pa] |
|----------|----------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------------|
| ABS | $2,00 \times 10^9$ | 0,350 | $1,06 \times 10^3$ | $45,00 \times 10^6$ |
| Nylon | $2,91 \times 10^9$ | 0,410 | $1,23 \times 10^3$ | $70,00 \times 10^6$ |
| PLA | $3,50 \times 10^9$ | 0,300 | $1,24 \times 10^3$ | $75,00 \times 10^6$ |

Tabela 4.3: Propriedades mecânicas dos materiais[14].

5 Resultados

Nesta seção, serão descritos os resultados encontrados após a aplicação do domínio inicial, casos de carga, fixação e materiais, conforme descrito na seção anterior.

5.1 Otimização topológica

Como descrito na seção 4.2, a otimização topológica do modelo inicial será considerando a maximização da rigidez da estrutura. Na Fig. 5.1, abaixo, estão destacadas as configurações consideradas para aplicar a metodologia.

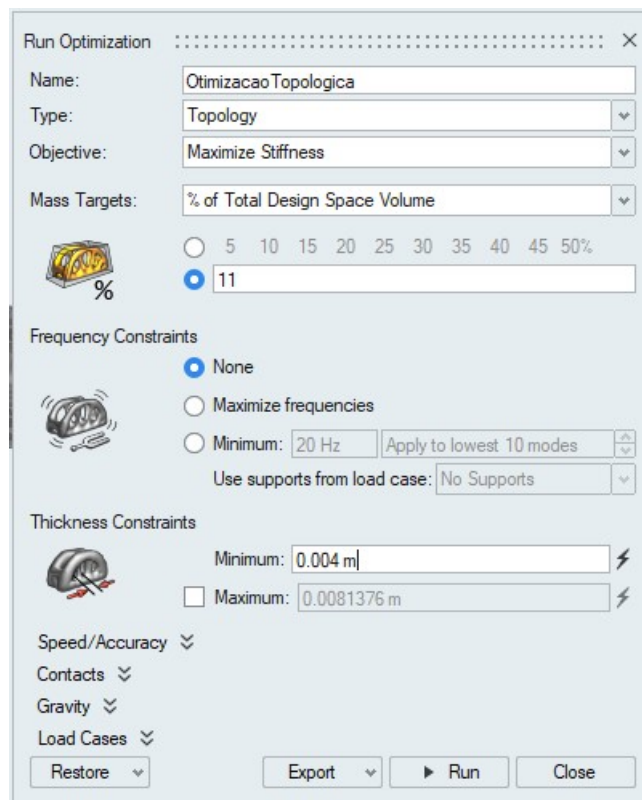


Figura 5.1: Configurações da otimização topológica.

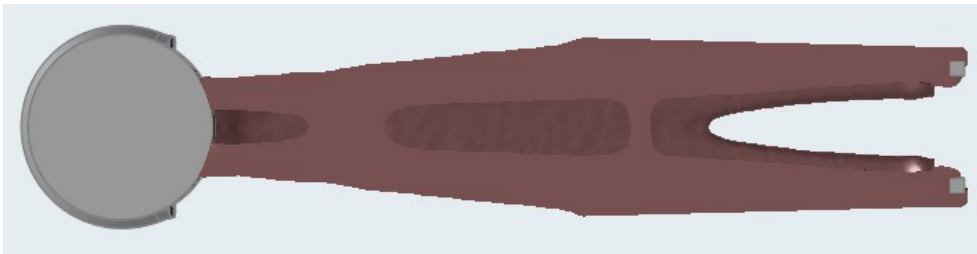
Como é possível observar, foi considerado um volume objetivo de 11% do volume original. Isso se deve ao fato de corresponder a 50% do modelo da DJI, F450 (Figura 4.1). Logo, a otimização teve como objetivo alcançar uma redução de volume do modelo de referência, para comprovar a sua eficiência mesmo com um volume e, consequentemente, com massa inferior. Além disto,

não foi considerada nenhuma condição de contorno quanto à frequência e houve uma restrição de espessura mínima de 4mm, para todos os casos de carga.

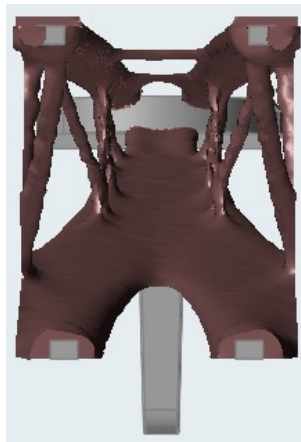
Após as definições acima descritas, se obteve o seguinte resultado para a otimização topológica do domínio inicial:



5.2(a): Vista lateral



5.2(b): Vista superior



5.2(c): Vista traseira

Figura 5.2: Estrutura otimizada

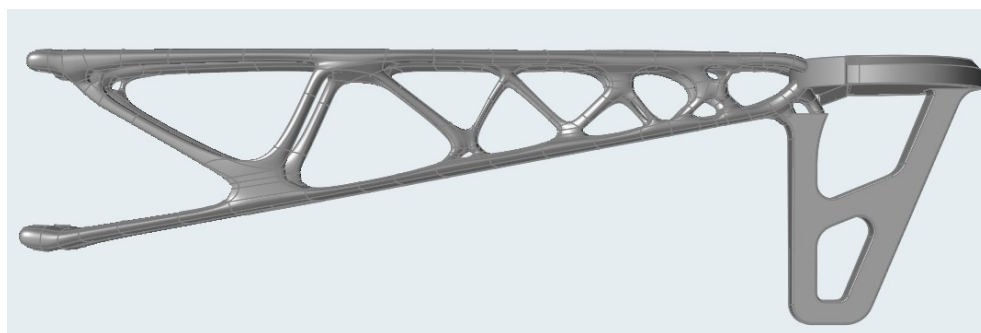
Ao observar as estruturas acima, podemos observar uma estrutura bem diferente do oferecido pelo modelo F450 da DJI. Isto se dá pela distribuição de material de acordo com a metodologia SIMP, descrita na seção 2.1, que é a metodologia utilizada pelo programa *Altair inspire*. Vale ressaltar que uma das condições aplicadas é a simetria no plano central do braço do drone, para garantir que não haja diferença entre os dois lados do componente. Devido ao torque do motor, essa discrepância poderia vir a acontecer. Contudo, como

ele é aplicado em sentido opostos e em braços diferentes, a simetria deve ser mantida.

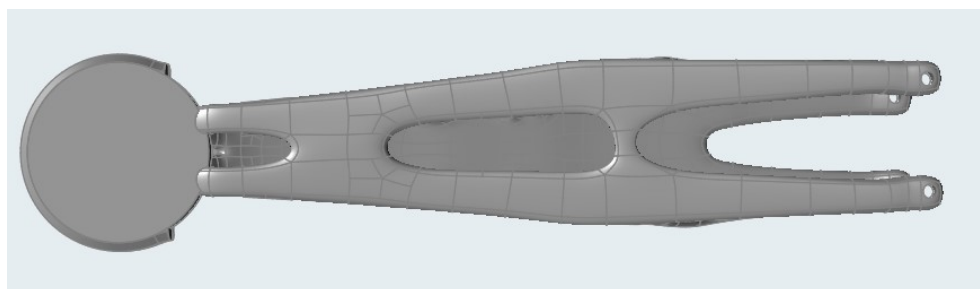
O modelo otimizado possui um volume de 48,96% do original. Após a otimização, foi utilizada a ferramenta *Polynurbs* do *software Inspire*, que permite realizar um pós processamento da peça otimizada, eliminando possíveis componentes mal definidos e cantos vivos que pudessem vir a ser formados.

5.2 Polynurbs

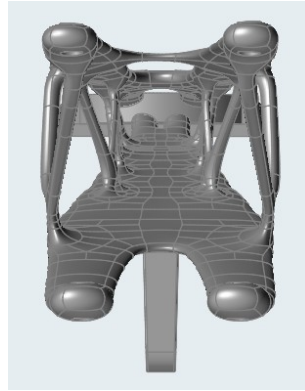
Como mencionado, por meio da ferramenta *Polynurbs*, foi possível realizar o pós processamento da estrutura otimizada, visando encontrar um modelo final para o braço do drone. Abaixo, o resultado final obtido, após o pós processamento da estrutura:



(5.3(a)) Vista lateral



(5.3(b)) Vista superior



(5.3(c)) Vista traseira

Figura 5.2: Estrutura pós processada

Logo, como é possível observar, a ferramenta nos permite construir uma estrutura mais bem acabada, sem a presença de cantos vivos, potenciais acumuladores de tensão. Além das estruturas que tiveram pouca deposição de material pela otimização, como pode ser observado na Figura 5.2(a), elas podem ser melhor estruturadas na ferramenta.

Durante o pós processamento, foi realizada uma alteração do sistema de fixação do modelo, como pode ser observado na Figura 5.3(b), pois o modelo será fixado no módulo central do drone por meio de parafusos, sendo então feito furos de $3mm$ para que a análise estrutural possa ser realizada de acordo com a realidade.

Após a aplicação do pós processamento do modelo, foi possível obter um volume e massa 31,51% inferior ao modelo F450, produzido pela empresa DJI.

5.3

Análise estrutural do modelo otimizado

Após a otimização ser realizada e o modelo ser pós processado, foi necessário realizar uma análise estrutural do modelo para validar que o mesmo possui uma eficiência estrutural suficiente para suportar os esforços aplicados, conforme mencionado na seção 4.4.

O *software Inspire* possui uma ferramenta própria para a análise estrutural dos componentes. Sendo assim, foi realizado a partir dele o estudo tanto do modelo otimizado quanto do modelo original, para que então pudesse ser feita uma comparação entre os dois e validar o estudo da otimização no braço do drone.

A análise realizada consiste em um modelo de elementos finitos, onde a estrutura a ser estudada é subdividida em pequenas partes, que juntas representam o domínio do problema. Esta subdivisão faz com que um problema

complexo se torne mais simples com essas micro estruturas, permitindo o computador realizar essas tarefas com excelência [34].

Da análise realizada pelo *software*, é possível realizar uma validação dos deslocamentos das estruturas, assim como do fator de segurança, tensões cisalhantes, tensões de Von Misses e alguns outros dados.

5.3.1

Estudo da estrutura otimizada

Para a análise estrutural do modelo, foram consideradas as mesmas cargas descritas em 4.4. Além disto, foi considerado um tamanho de elemento de $0,0009m$, gerando uma malha com aproximadamente 228.000 elementos. A Figura 5.3 representa o campo de análise do *software Altair Inspire*.

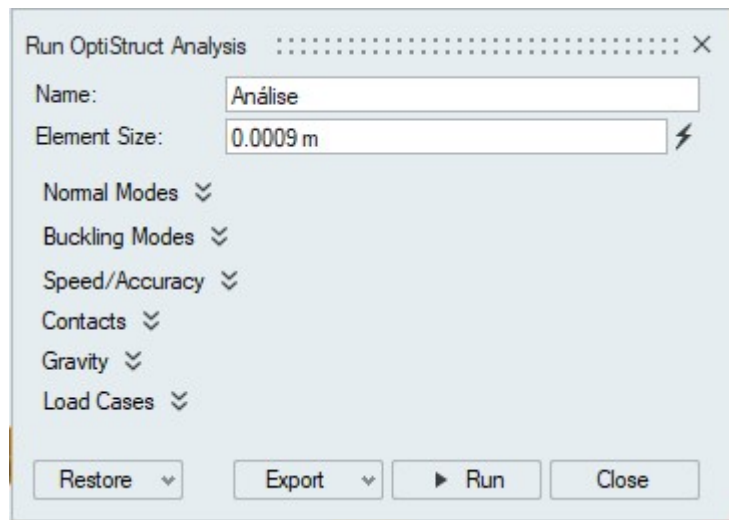


Figura 5.3: Configurações da análise estrutural.

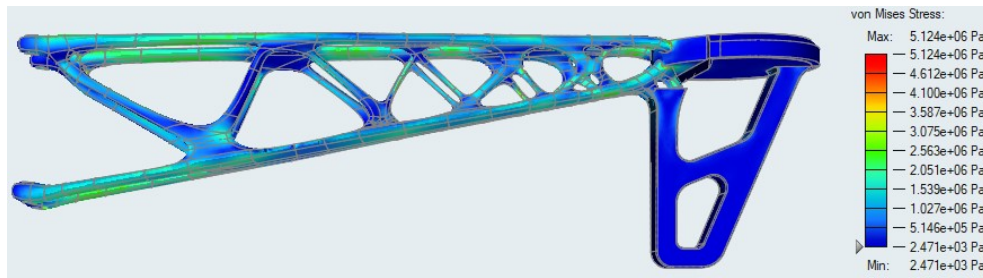
Como mencionado no item anterior, diversos resultados estruturais podem ser analisados por meio da metodologia de elementos finitos aplicada. Abaixo, é possível observar alguns dos resultados apresentados pelo modelo otimizado, comparando os materiais ABS, PLA e Nylon, para que fosse feita a escolha do material:

| Material | Massa [kg] | Deslocamento | Deslocamento |
|----------|---------------|------------------------|------------------------|
| | | Vertical [m] | Horizontal [m] |
| ABS | 0,030189 | $1,528 \times 10^{-3}$ | $2,264 \times 10^{-4}$ |
| Nylon | 0,035031 | $1,050 \times 10^{-3}$ | $1,556 \times 10^{-4}$ |
| PLA | 0,035316 | $8,740 \times 10^{-4}$ | $1,289 \times 10^{-4}$ |

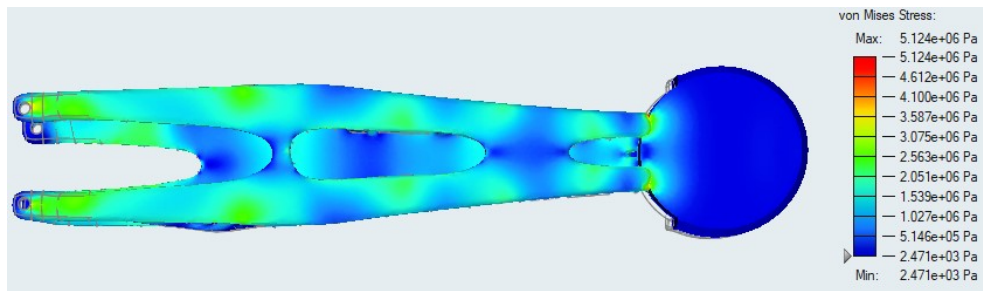
Tabela 5.1: Comparação de materiais.

Sendo assim, por mais que o PLA apresente uma massa minimamente superior a massa do Nylon, o seu deslocamento vertical e horizontal foram inferiores, uma vez que este possui um módulo de elasticidade superior aos demais, o que comprova uma maior rigidez da estrutura, que é o principal objetivo do projeto.

Com a definição do PLA como material do modelo final, foi então realizada a análise da estrutura, chegando aos resultados abaixo, considerando o caso mais crítico de forças, quando o drone cai apoiado em um de seus braços.



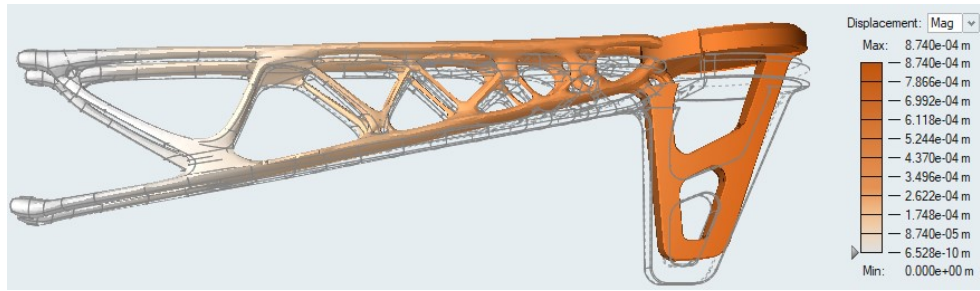
5.4(a): Vista lateral von Mises



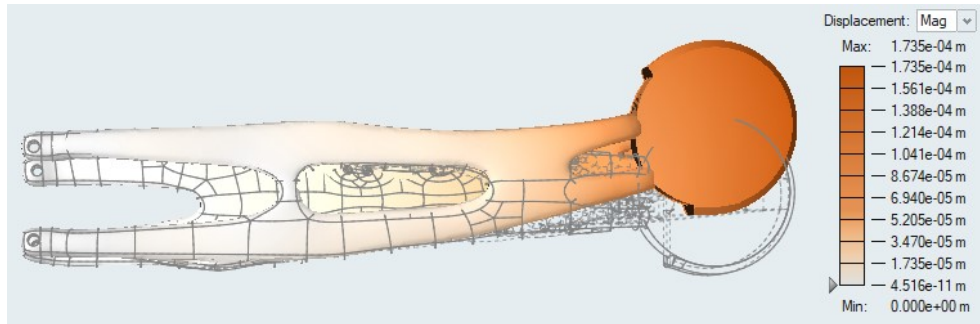
5.4(b): Vista superior von Mises

Figura 5.4: von Mises para estrutura otimizada

Nas tensões de von Mises, o ponto com maior tensão foi na junção do braço do modelo com o suporte do motor, com um valor de $5,124MPa$. Além disso, foi possível notar que há um acúmulo de tensões nas áreas próximas ao suporte da estrutura.



5.5(a): Deslocamento vertical máximo



5.5(b): Deslocamento horizontal máximo

Figura 5.5: Deslocamentos para estrutura otimizada

Nesta figura, podemos ver o deslocamento máximo, de acordo com o reportado na Tabela 5.1 de $8,740 \times 10^{-4} m$ na vertical e de $1,289 \times 10^{-4} m$ na horizontal, considerando o centro do suporte do motor.

Após os resultados acima, foi aplicado um binário de forças (Figura 5.6), para que pudesse ser realizada uma análise da rigidez à torção da estrutura, por meio das equações a seguir:

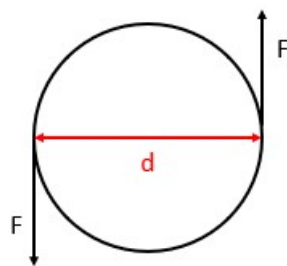


Figura 5.6: Binário de forças no suporte do motor.

$$M = F * d \quad (5-1)$$

Onde $M = 0,246 N * m$ e $d = 0,0037 m$, resultando em $F = 6,64865 N$.

$$tg(\theta) = \frac{2 * \delta_y}{d} \quad (5-2)$$

$$K_t = \frac{2 * F}{\theta} \quad (5-3)$$

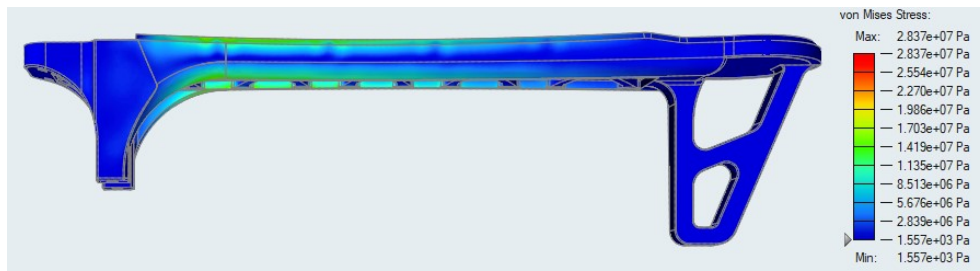
Sendo assim, como a estrutura apresentou um deslocamento horizontal de $1,289 \times 10^{-4}m$, vide Figura 5.5(b), ao substituir em 5-2 e 5-3 encontramos um valor de rigidez à torção de $33,31 \frac{Nm}{grau}$ para a estrutura otimizada, que será fundamental para comparar com a eficiência estrutural da estrutura original.

5.3.2

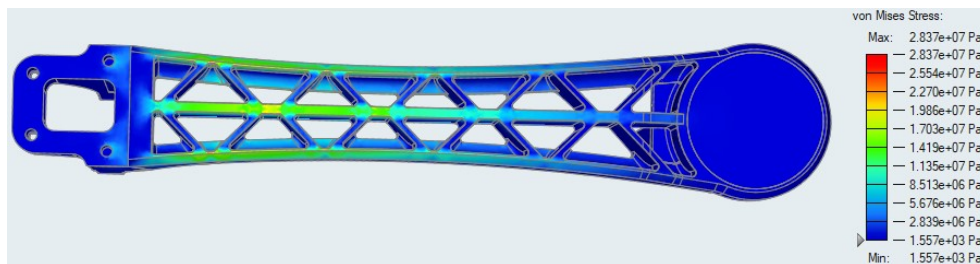
Estudo da estrutura original

Com a finalidade de comprovar a eficiência do modelo otimizado, foi necessário aplicar os mesmos esforços e também fixar da mesma forma o modelo original, para que então fosse realizada a devida comparação entre ambos.

Assim como no modelo otimizado, foi realizada uma análise de elementos finitos para o modelo original, com o mesmo tamanho de elemento de $0,0009m$, gerando uma malha com aproximadamente 279.000 elementos, apresentando os seguintes resultados:



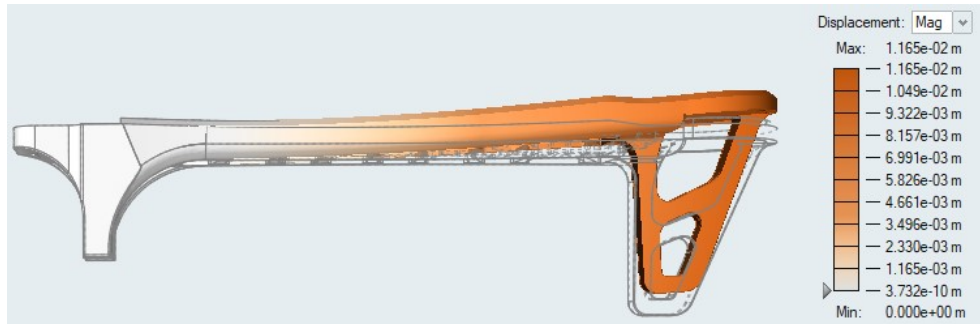
5.7(a): Vista lateral Von Misses



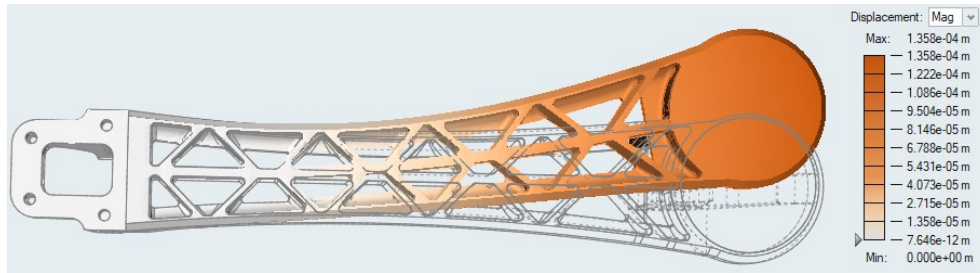
5.7(b): Vista superior Von Misses

Figura 5.7: Von Misses para estrutura otimizada

Como podemos observar, assim como no modelo otimizado, as tensões se concentram ao longo do braço do drone, e mais próximo aos suportes da estrutura, mostrando ser uma área mais exigida estruturalmente. Além disso, a tensão máxima obtida foi de $28,37MPa$.



5.8(a): Deslocamento vertical máximo



5.8(b): Deslocamento horizontal máximo

Figura 5.8: Deslocamentos para estrutura otimizada

Sendo assim, foi encontrado um valor para deslocamento máximo de $1,165 \times 10^{-2}m$ verticalmente e $1,119 \times 10^{-2}$ na horizontal, considerando o centro do suporte do motor.

Assim como a estrutura otimizada, foi calculado o valor da rigidez torcional do componente, levando em consideração as equações 5-2 e 5-3, encontrando um valor de $38,37 \frac{Nm}{grau}$ para o componente original.

5.3.3

Original x Otimizado

Com base nos resultados apresentados em 5.3.1 e 5.3.2, foi criada então uma tabela para que possa ser feita uma melhor comparação entre os modelos, comprovando assim a eficiência estrutural de um modelo otimizado, que além de tudo, apresenta uma massa inferior ao original.

| | Modelo Original | Modelo Otimizado | Variação |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|----------|
| Volume [cm ³] | 41,5817 | 28,48052 | -31,51% |
| Deslocamento Horizontal [m] | $1,119 \times 10^{-4}$ | $1,289 \times 10^{-4}$ | +15,19% |
| Deslocamento Vertical [m] | $1,165 \times 10^{-2}$ | $8,740 \times 10^{-4}$ | -92,50% |
| Rigidez à torção [Nm/°] | 38,37 | 33,31 | -13,19% |
| Rigidez à torção/massa [Nm/°/kg] | 744,17 | 943,20 | +26,74% |

Tabela 5.2: Análise dos resultados.

Como podemos ver na tabela acima, o modelo otimizado apresenta uma massa inferior ao original, como já descrito anteriormente, e ainda assim apresenta um deslocamento vertical máximo, quando ocorre a queda do drone em um dos braços, bem inferior ao modelo original, o que comprova a sua rigidez quando comparados os modelos. Além disso, pode-se observar que horizontalmente, quando há a aplicação do binário de forças, o original apresenta um deslocamento levemente inferior, o que leva a uma rigidez torcional numericamente superior. Porém, ao observar a última linha da Tabela 5.2, é possível notar que ao parametrizar a rigidez em função da massa, podemos ver que o modelo otimizado na verdade apresenta uma rigidez à torção superior ao modelo F450 da empresa DJI.

Na Fig. 5.9, é possível observar uma ilustração do modelo com a substituição dos modelos comerciais pelo modelo otimizado:



Figura 5.9: Modelo de um drone com os braços otimizados.

6

Conclusão

Para este trabalho foi considerado o braço de um drone onde o mesmo foi submetido a diversos esforços que seriam aplicados ao modelo real. Com a definição destes esforços e da sua fixação, foi obtido então um modelo otimizado a partir do *software Altair Inspire*, onde se teve como objetivo a maximização da rigidez do modelo, reduzindo a sua massa.

Com base nos resultados demonstrados na Seção 5.3.3, podemos concluir que o modelo de fato apresentou uma melhora na sua rigidez estrutural, apresentando menores deslocamentos verticais, bem consideráveis. Apesar de apresentar um deslocamento horizontal um pouco superior, o modelo otimizado demonstrou pela rigidez à torção parametrizada uma melhor rigidez. Além das faixas de tensões de Von Mises apresentadas nas Figuras 5.4(a), 5.4(b), 5.7(a) e 5.7(b), onde podemos ver que as tensões exigidas no modelo otimizado foram consideravelmente inferiores ao modelo original.

Sendo assim, o principal objetivo do projeto de redução de massa e aumento de rigidez foi obtido com sucesso, comprovando a eficiência da aplicação da otimização topológica em paralelo com a tecnologia de manufatura aditiva.

6.1

Sugestão para trabalhos futuros

Para completar o desenvolvimento da aeronave, seria de grande interesse que em projetos futuros fossem realizadas otimizações do quadro do drone, para que um modelo completo pudesse ser desenvolvido por meio dessa metodologia. Além disso, uma análise aerodinâmica seriam de grande interesse para fins de comparação entre os modelos.

Referências Bibliográficas

- [1] BENDSØE, M.P., KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in structural design using homogenization. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 71:197*224, 1988.
- [2] SOSNOVIK, I.;OSELEDETS, I. Neural networks for topology optimization. *De Gruyter*, 34:215–223, 2019.
- [3] GRADINARU, SEBASTIAN AND TABARAS, MARINA AND GHEORGHE, DAN AND GHEORGHIN, DANIELA AND ZAMFIR, RALUCA AND MARIUS, VASILESCU AND DOBRESCU, MIRCEA AND GRIGORESCU, GABRIEL AND CRISTESCU, IOAN. Analysis of the anisotropy for 3d printed pla parts usable in medicine. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 81, 2019.
- [4] LEVENTON, WILLIAM. Less support is a good thing—when 3d printing. , 2019. Acesso em: Março de 2021.
- [5] OOI, TIAN. 3d printing supports: 3 easy steps to success. All3DP, 2020. Acesso em: Março de 2021.
- [6] DRONE NODES. Quadcopter propeller basics for drone pilots. Drone Nodes, 2021. Acesso em: Março de 2021.
- [7] UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY. Uav drone propellers. Unmanned systems technology, 2021. Acesso em: Março de 2021.
- [8] DRONE OMEGA. Quadcopter propeller basics for drone pilots. Drone Omega, 2021. Acesso em: Março de 2021.
- [9] UNNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY. Electronic speed controllers (esc). Unnmanned Systems Technology. Acesso em: Fevereiro de 2021.
- [10] GISGEOGRAPHY. How gps receivers work – trilateration vs triangulation. , 2021. Acesso em: Abril de 2021.
- [11] TURNIGY. Turnigy high capacity 12000mah 4s 12c multi rotor lipo pack xt90. , 2021. Acesso em: Fevereiro de 2021.
- [12] DJI. Flame wheel arf kit. DJI, 2021. Acesso em: Maio de 2021.
- [13] KDEDIRECT. Kde2315xf-2050. KDEDirect, 2021. Acesso em: Maio de 2021.

- [14] ALTAIR. Altair inspire™. Altair, 2021. Acesso em: Maio de 2021.
- [15] KHUSHAL BOMBE. Unmanned aerial vehicle (uav) market worth \$21.8 billion by 2027- pre and post covid-19 market analysis report by meticulous research®. Instituto Brasileiro de Mineração, 2020. Acesso em: Novembro de 2020.
- [16] CBINSIGHTS. 38 ways drones will impact society: From fighting war to forecasting weather, uavs change everything. RESEARCHBRIEFS, 2020. Acesso em: Março de 2021.
- [17] AMAZON. Amazon prime air. Amazon, 2020. Acesso em: Outubro de 2020.
- [18] GETFPV. Lumenier qav-s johnnyfpv special edition 5"fpv freestyle drone rtf w/ dji digital hd fpv system. GetFPV, 2020. Acesso em: Outubro de 2020.
- [19] BALASUBRAMANIAN ESAKKI AND SILAMBARASAN MATHIYAZHAGAN AND MANOVA MOSES AND K. JAGAJJANANI RAO AND SURENDAR GANESAN. Development of 3d-printed floating quadrotor for collection of algae in remote water bodies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164:104891, 2019.
- [20] CHENG, K.; OLHOFF, N. An investigation concerning optimal design of solid elastic plates. *International Journal of Solids and Structures*, 17:305–323, 1981.
- [21] ZHU, JH., ZHANG, WH. XIA, L. Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. *Arch Computat Methods Eng*, 23:595–622, 2016.
- [22] BENDSØE, M.P.; SIGMUND, O. *Topology Optimization Theory, Methods, and Applications*. Springer, Dinamarca, 2 edition, 2004.
- [23] ENGIPRINTERS. Os tipos de tecnologia de impressão 3d. EngiPrinters, 2021. Acesso em: Maio de 2021.
- [24] GARDEN, N.; SCHNEIDER A. Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 37:417–425, 2015.
- [25] MIGUEL, C. A. L. Preliminary topology optimization of small unmanned aircraft wings for additive manufacturing. Dissertação de mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2019.
- [26] PIC MICROCONTROLLER. Dc motor control with pic16f84a and l293d. Pic Microcontroller, 2018. Acesso em: Fevereiro de 2021.

- [27] EMAX. Emax multicopter motor mt1806. EMAX, 2020. Acesso em: Fevereiro de 2021.
- [28] DRONE NODES. Drone motor fundamentals – how brushless motor works. Drone Nodes, 2015. Acesso em: Fevereiro de 2021.
- [29] USTEK, M.;ŮřEDNÍČEK, Z. The basics of quadcopter anatomy. *MATEC Web of Conferences*, 210:01001, 2018.
- [30] DAVIES, B. *Build a Drone. A step-by-step guide to designing, constructing, and flying your very own drone*. Skyhorse Publishing, New York (USA), 2016.
- [31] DRONE OMEGA. The advanced quadcopter battery guide. Drone Omega. Acesso em: Março de 2021.
- [32] DRONE NODES. Drone transmitter and receiver – radio control system guide. Drone Nodes. Acesso em: Março de 2021.
- [33] MAKERBOT. What are 3d printed materials and how are they used? MakerBot, 2021. Acesso em: Maio de 2021.
- [34] MIRLISSENA, G. Método dos elementos finitos: o que é? ESSS, 2016. Acesso em: Maio de 2021.