

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**PROJETO DE DRONE QUADRICÓPTERO COM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PARA
A PRÁTICA DE SURF DURANTE O PERÍODO NOTURNO**

por

Pedro Villa Gallina

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, Agosto de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

PROJETO DE DRONE QUADRICÓPTERO COM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PARA A
PRÁTICA DE SURF DURANTE O PERÍODO NOTURNO

por

Pedro Villa Gallina

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Profa. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Roberto Chouhy Leborgne

Coorientador: Prof. Edison Pignaton de Freitas

Banca examinadora:

Prof. Flávio Becon Lemos – DELAE / UFRGS

Prof. Igor Pasa Wiltuschnig – DELET / UFRGS

Porto Alegre, 25 de Agosto de 2023.

VILLA GALLINA, P. **Projeto de Drone Quadricóptero com Sistema de Iluminação para a Prática de Surf Durante o Período Noturno**. 2023. 42p. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver o projeto de um drone com sistema de iluminação para viabilizar a prática do surfe durante a noite. Inicialmente, foi realizada uma pesquisa sobre o funcionamento e a montagem de drones, identificando as variáveis e parâmetros necessários em cada componente da aeronave. Além disso, foi feito um resumo das principais variáveis relacionadas à iluminação. Definiu-se os valores que cada variável deve assumir para garantir o desempenho necessário. Em seguida, realizou-se uma pesquisa no mercado para identificar as peças que melhor se adequam aos valores pré-definidos, visando a montagem e integração de um drone funcional. Foram feitas 3 propostas de drones com diferentes tamanho e peso: um drone leve, um drone intermediário e um mais pesado. Calculou-se os seguintes parâmetros de voo de cada aeronave: autonomia de voo, fator de carga máximo e a carga útil máxima. Foi dimensionado um sistema de iluminação de acordo com a carga útil máxima calculada de cada aeronave. Realizou-se um estudo luminotécnico de cada sistema no Software DIALux, que utiliza como base para cálculos o método ponto a ponto. As aeronaves mais pesadas, por possuírem uma carga útil maior, apresentaram uma melhor iluminação, obtendo valores maiores que 100 lux. Porém, para todas as aeronaves, foi calculada uma autonomia de voo de aproximadamente 20 minutos, com exceção de uma versão em que se aumentou o número de baterias, ampliando o tempo de voo para 35 minutos.

PALAVRAS-CHAVE: Iluminação para Prática de Surf, Sistema de Iluminação por Drones, Surf Noturno.

VILLA GALLINA, P. **Project of a Quadcopter Drone with Lighting System for Surfing During Night Period.** 2023. 42p. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a drone with a lighting system to enable surfing at night. Initially, research was carried out on the operation and assembly of drones, identifying the variables and parameters needed in each component of the aircraft. In addition, a summary of the main variables related to lighting was made. The values that each variable must assume were defined to guarantee the necessary performance. Next, market research was carried out to identify the parts that best fit the pre-defined values, aiming for the assembly and integration of a functional drone. Three drone proposals were made with different sizes and weights: a light drone, an intermediate drone and a heavier drone. The following flight parameters were calculated for each aircraft: flight range, maximum load factor and maximum payload. A lighting system was designed according to the calculated maximum payload of each aircraft. A lighting technical study was carried out on each system using the DIALux Software, which uses the point-by-point method as a basis for calculations. Heavier aircraft, as they have a larger payload, presented better lighting, obtaining values greater than 100 lux. However, for all aircraft, a flight autonomy of approximately 20 minutes was calculated, with the exception of one version in which the number of batteries was increased, increasing flight time to 35 minutes.

KEYWORDS: Drones Lighting System, Lighting for Surf Practice, Night Surf.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. MOTIVAÇÃO	2
3. OBJETIVOS	2
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
5.1 Estrutura	6
5.2 Motores.....	6
5.3 Iluminação	7
5.4 Hélices.....	9
5.5 Bateria	11
5.6 Controlador Eletrônico de Velocidade (ESC)	12
5.7 Controladora de Voo	13
5.8 Regulamentação	14
6. METODOLOGIA	16
7. ESTUDO DE CASO.....	19
7.1 Estruturas.....	20
7.2 Grupo Motopropulsor.....	20
7.3 Iluminação.....	22
7.4 Bateria	24
8. RESULTADOS.....	25
9. CONCLUSÕES	31
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. INTRODUÇÃO

Em 1906 na França, o primeiro voo tripulado foi executado pelo brasileiro Santos Dummont no avião 14-Bis. Apesar de realizar um voo curto e não ser muito seguro, o voo do 14-Bis representa um marco histórico da humanidade e o início da aviação. Anos após esse evento, com a evolução da tecnologia e muito esforço de engenheiros ao redor do mundo, tornou-se possível construir uma máquina capaz de voar mais de 15 mil quilômetros de distância, transportando mais de 500 passageiros a uma velocidade de 900 km/h.

Atualmente, com o auxílio de toda a tecnologia e engenharia empregada nos estudos para levar as pessoas ao céu, tem-se percorrido um caminho inverso, construindo máquinas voadoras que não necessitem de tripulação, e podem ser controladas remotamente por um piloto, ou controladas por sistemas automatizados. Popularmente chamadas de drones, ou veículos aéreos não tripulados (VANT), estas aeronaves foram inicialmente muito utilizadas pelos serviços militares para monitorar e espionar territórios sem colocar em risco a vida do piloto e a integridade de uma aeronave militar de grande valor financeiro. A vantagem de não se preocupar com a segurança e conforto de seus tripulantes, bem como a facilidade de controle, fez com que os drones assumissem um papel importante em diversas outras atividades como por exemplo: fertilização no processo de agricultura, captação de imagens e vídeos, monitoramento e entrega de objetos leves (BRAGA, 2018).

Além das atividades citadas, outros nichos tem sido criados e se mostrado interessante para o uso de drones. Nesse contexto introduz-se um estudo de inserção de mais uma atividade para essa nova tecnologia de voo não tripulado. Popularizado no Brasil a partir da década de 70, o surfe é um esporte mundialmente praticado nos dias atuais. Nos últimos anos, com a vitória do título mundial dos surfistas Gabriel Medina, Adriano de Souza e Ítalo Ferreira, bem como a inserção do esporte no quadro olímpico fez com que o esporte atingisse uma nova proporção no Brasil e no mundo.

Como todo esporte, sua evolução é diretamente proporcional ao tempo em que o atleta dedica à atividade. Uma das grandes inovações que fez com que o esporte conseguisse atingir novos níveis em termos de performance foi a criação de roupas térmicas de neoprene, que possibilitaram a prática do esporte em condições de baixas temperaturas assim como aumentaram o tempo que o surfista conseguia suportar dentro

da água. Além de roupas térmicas, o uso de jet skis também facilitou o aprimoramento das técnicas do esporte, como também trouxe mais segurança para seus praticantes. Apesar de todo avanço que o esporte já teve, ainda é impraticável explorar as horas em que a luz solar não se faz presente, salvo raras exceções onde as ondas na praia tem iluminação artificial.

Como uma forma de possibilitar a realização desse esporte no período em que não se faz presente a iluminação solar, de uma maneira individual e que não necessite de grande mobilização, propõe-se adaptar um sistema de iluminação a um veículo aéreo não tripulado (VANT). A ideia é que a aeronave ilumine uma área suficientemente grande ao redor do surfista para que seja possível identificar as ondulações favoráveis para efetuar o correto posicionamento em relação a onda e, posteriormente, a ação de remar e subir na prancha (drop), além de iluminar o trajeto que o surfista irá percorrer ao estar em pé na prancha com maior velocidade, efetivamente surfando. Este trabalho aborda o projeto conceitual dessa aeronave contendo a descrição de peças utilizadas, cálculo dos parâmetros de voo e análise das configurações de iluminação de cada aeronave. Uma parte importante desse projeto é o sistema de acompanhamento automático ao surfista, porém, esse sistema não está incluído no presente estudo.

2. MOTIVAÇÃO

A motivação para a escrita deste trabalho surge com a finalidade de melhor aproveitar as horas em que as condições do mar estão favoráveis para a prática do surf, independente da presença da luz solar, integrando habilidades e conhecimentos desenvolvidos em diversas disciplinas do curso para resolver um problema de engenharia.

3. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é projetar conceitualmente um drone funcional que cumpra a tarefa de possibilitar a prática de um esporte diurno durante o período noturno. Esse objetivo é alcançado através da conclusão de uma série de objetivos específicos citados abaixo.

Objetivos Específicos:

- Aprofundar os conceitos de drones, motores, controladores e sensores;
- Projetar conceitualmente um protótipo funcional para a atividade especificada no presente trabalho, garantindo os seguintes parâmetros:
 - peso máximo de decolagem inferior a 25 kg;
 - voo abaixo de 122 metros (400 pés) de altura;
 - autonomia de voo mínima de 30 minutos;
 - fator de carga máximo maior ou igual a 2;
- Analisar os resultados e aperfeiçoar o protótipo.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como primeiro passo na execução desse projeto, é importante descrever o processo de montagem e funcionamento de um drone. Segundo Demolinari (2016) para se construir um drone existem 6 componentes principais que devem ser detalhados e selecionados para se integrar uma aeronave funcional: estrutura, motores, hélices, controladores de velocidade, controlador de voo e baterias. Inicialmente deve-se estimar o peso total da aeronave com a finalidade de se obter a propulsão necessária para fazer a escolha da quantidade e características dos motores e da estrutura. Posteriormente, na fase de integração das componentes, são feitos os devidos ajustes para que o conjunto opere de maneira satisfatória.

Hughes e Drury, citados por Demolinari (2016, p. 25) destacam a preferência no uso de motores elétricos sem escovas (brushless) para o uso em drones. Segundo os autores, “o constante atrito das escovas sobre os polos do comutador geram uma constante perda de energia e, conseqüentemente, reduz a eficiência total desse tipo de motor.” Para Dias (2017), é necessário estimar o peso total da aeronave na seleção dos motores, pois é o componente em conjunto com as hélices que fornece a força de empuxo necessária para manter a aeronave no ar. Eugenio e Zago (2019) sugerem um dimensionamento dos motores com um empuxo máximo igual a pelo menos 2 vezes o peso máximo de decolagem da aeronave. Segundo os autores, caso essa inequação sugerida não for respeitada, a aeronave pode não possuir uma resposta efetiva aos comandos, existindo dificuldades para decolar e não ter estabilidade.

Após a seleção dos motores, deve-se selecionar a estrutura em que as demais componentes serão acopladas. Esta é formada por uma região central onde se acoplam os braços, sensores, controladora de voo e baterias e braços com os motores acoplados em suas extremidades. Segundo Eugenio e Zago (2019), a escolha da estrutura (comumente chamada de “frame”) deve levar em conta o peso máximo de decolagem, o tamanho dos motores e o diâmetro das hélices.

A hélice é responsável pela movimentação da aeronave. Sem ela, apenas com os motores e as baterias não fariam o drone “sair do lugar”. Segundo Eugenio e Zago (2019), hélice é um conjunto de pás conectadas ao cubo central. As pás são em formato de asa, ou seja, possuem perfil aerodinâmico capaz de gerar uma diferença de pressão entre o intradorso e o extradorso desse perfil. Essa diferença de pressão é que produz a força de sustentação, que tem sentido contrário a força gravitacional e faz a aeronave voar. Balakrishnan (2016) destaca a importância da escolha das hélices, pois estas “são responsáveis diretas pela propulsão do drone. Uma escolha errada acarreta baixa eficiência do sistema ou até falha na reposta do drone.”

De acordo com a corrente máxima requerida pelo motor, pode-se dimensionar os controladores eletrônicos de velocidade ou *eletronic speed controller* (ESC). Para que o eixo conectado ao motor brushless rotacione é necessário que ele receba alternadamente corrente em seus enrolamentos. Sendo assim existe uma variação de campo magnético em seu interior provocando o movimento de rotação do eixo. Portanto é necessário um dispositivo que consiga chavear a alimentação que irá para o motor. Isto é possível através do circuito presente no ESC (MEYER, 2019). Existem motores brushless com ou sem sensor de posição. Através desse sensoriamento é possível que o ESC saiba a posição do eixo, permitindo assim uma sincronização precisa. A sua desvantagem é que em um ambiente hostil, como por exemplo um local com poeira de algum metal, a informação enviada ao controlador pode vir errada e afetar a sua performance (ZIKODRIVE, 2019).

Um grande problema na construção de um drone é a baixa autonomia de voo, determinada pelas baterias instaladas no protótipo. Segundo Dos Anjos (2016) bastaria aumentar a quantidade de energia que a aeronave carrega para aumentar a autonomia de voo, colocando mais baterias a bordo. Porém, isso aumentaria a massa total do drone, aumentando a potência necessária dos motores, e conseqüentemente, o gasto energético para mantê-lo no ar. Dessa forma, deve-se buscar um ponto máximo de autonomia em função da quantidade de baterias que o VANT pode carregar.

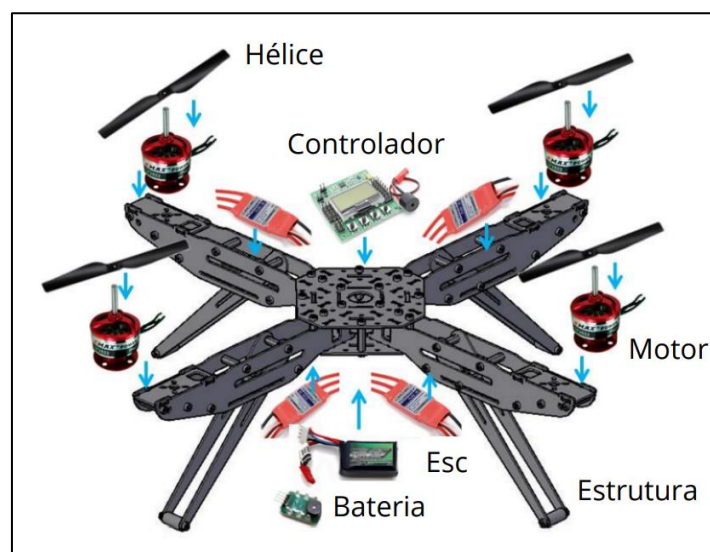
Um dos principais desafios desse projeto é elaborar um método de controle automatizado que faça o drone seguir o surfista. Pliev (2021) identifica uma possível melhoria no sistema “follow me” utilizando o método de “Reinforcement Learning” (“aprendizado por reforço” traduzido livremente para o português) para aprimorar e ajudar a prever comportamentos específicos que serão requisitados para a atividade em que o drone será enquadrado. Esse método é baseado no controle por detecção de imagens.

Um método interessante para efetuar o controle autônomo do drone para o surf noturno é utilizando tecnologia semelhante ao Hexo+. Segundo IEEE Spectrum (2015), o controle é feito através de uma pulseira à prova de água conectada diretamente ao drone por sinais eletromagnéticos. Através da pulseira é possível predefinir uma altura e distância que o drone manterá do usuário.

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como descrito anteriormente, um drone é formado por 6 partes fundamentais: estrutura, motores, hélices, bateria, controladores de velocidade (ESC's) e placa controladora. No caso do projeto deste trabalho, adiciona-se mais uma parte: o sistema de iluminação. Neste capítulo fez-se uma descrição do funcionamento de cada uma dessas partes. A figura 1 exemplifica a disposição dessas estruturas na aeronave.

Figura 1: vista explodida de um drone quadricóptero.



Fonte: DIAS, 2017

5.1 Estrutura

A estrutura de um drone depende diretamente do número de motores que serão instalados, podendo ser 4, 6 ou até 8 motores. Em geral, os frames são construídos em plástico, fibra de vidro, fibra de carbono, alumínio ou madeira. A fibra de carbono é o material mais rígido e capaz de absorver melhor as vibrações, no entanto, é o material mais caro (UFOP, Decom). Segundo Demolinari (2016), um drone é formado por uma região central, onde ficam fixados os sensores, a bateria e os controladores de voo, e braços acoplados a essa região central com os motores conectados na ponta desses braços.

A escolha de estrutura para a aplicação deste projeto, deve-se levar em conta três características essenciais: material, as dimensões e o peso. A fibra de carbono, por ser mais resistente e mais leve é tida como o material preferencialmente escolhido para o projeto do drone. Deve-se analisar a distância entre os eixos dos motores da estrutura para que seja conhecido o diâmetro máximo das hélices que serão utilizadas na aeronave, e o seu peso para o cálculo dos parâmetros de voo e escolha dos motores. Além disso, será dada preferência para estruturas simétricas para facilitar o controle da aeronave.

5.2 Motores

Geralmente, os motores utilizados em drones são máquinas síncronas de imãs permanentes trifásicos, popularmente chamados de motores elétricos sem escovas ou motores *brushless*. Esses motores são avaliados pelos seguintes aspectos: rotação máxima por volt (representado em rpm/V), peso, potência e força de propulsão (DEMOLINARI,2016). O conjunto do motor conectado ao controlador eletrônico de velocidade atua como um motor de corrente contínua sem escovas.

Um motor *brushless* é um tipo de motor elétrico que não utiliza escovas para a comutação da corrente elétrica nas bobinas do rotor. Esses motores oferecem vantagens significativas em termos de eficiência, confiabilidade e desempenho em comparação com os motores com escovas tradicionais.

Os motores *brushless* consistem em três principais componentes:

1. Estator: Esta é a parte fixa do motor que contém bobinas de fio enroladas em torno de núcleos de ferro. Essas bobinas criam um campo magnético fixo;

2. Rotor: O rotor é a parte móvel do motor e contém ímãs permanentes ou enrolamentos de campo. Quando a corrente elétrica passa pelas bobinas do rotor, elas geram um campo magnético que interage com o campo magnético do estator, causando o movimento rotativo do rotor;
3. Controlador Eletrônico de Velocidade ou *Electronic Speed Controller* (ESC): O ESC é um componente eletrônico que controla a sequência de corrente fornecida às bobinas do estator. Ele determina quando a alimentação do enrolamento do estator deve ser aplicada para manter o movimento rotativo contínuo e controlado.

O funcionamento de um motor *brushless* é controlado por meio da comutação eletrônica, onde o ESC monitora a posição do rotor e ajusta a sequência de acionamento das fases do estator para manter o movimento de rotação. Isso elimina a necessidade de escovas e comutadores mecânicos usados em motores com escovas.

Portanto, a cada motor está conectado uma hélice e um controlador eletrônico de velocidade (ESC), que passa as informações do controlador de voo variando a velocidade e controlando a potência de saída a partir do sequenciamento de corrente nas bobinas do rotor.

5.3 Iluminação

O sistema de iluminação é alimentado diretamente pela bateria do drone. Portanto, a potência da lâmpada define o quanto de energia será consumido para manter o usuário iluminado durante a sessão da atividade. A ideia é que se otimize o tempo de voo, fazendo com que a aeronave possua o menor peso e a maior iluminação possível. Para isso, alguns parâmetros de iluminação são considerados nessa análise. Abaixo, são definidas algumas variáveis importantes na escolha de uma lâmpada para o trabalho proposto.

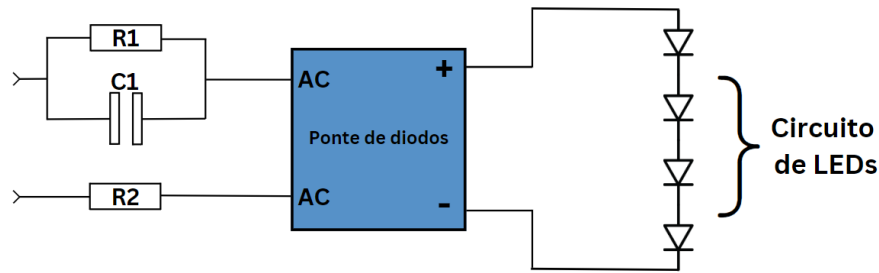
- Intensidade Luminosa: É definida como a intensidade luminosa, na direção perpendicular, de uma superfície plana de área igual a $1/600.000 \text{ m}^2$, de um corpo negro à temperatura de fusão da platina, e sob a pressão de 101.325 N/m^2 (1 atmosfera). Sua unidade é o candela (cd);

- Fluxo Luminoso: É definido como o fluxo luminoso emitido no interior de um ângulo sólido de 1 esferorradiano por uma fonte puntiforme de intensidade invariável e igual a 1 candela, em todas as direções. Sua unidade é o lúmen (lm);
- Eficiência luminosa: definida como o quociente entre o fluxo luminoso pela potência da lâmpada. Sua unidade é expressa em lúmens/Watt (lm/W). Quanto maior a eficiência luminosa de uma determinada lâmpada, maior será a quantidade de luz produzida com o mesmo consumo energético;
- Iluminância: representa a relação entre o fluxo luminoso, em lúmens, que incide na direção perpendicular sobre uma superfície plana, pela área dessa superfície em m². É expressa pela unidade lux ou lm/m² e indica o grau que uma superfície é iluminada;
- Curva de Distribuição Luminosa: É a maneira pela qual os fabricantes de luminárias representam a distribuição da intensidade luminosa nas diferentes direções. Trata-se de um diagrama polar, em que a luminária é reduzida a um ponto no centro do diagrama, no qual as intensidades luminosas, em função do ângulo formado com a vertical, são medidas e registradas.

O peso da lâmpada entra no cálculo da força de propulsão necessária para manter o drone voando, definida na escolha dos motores. Dividindo-se a eficiência luminosa pela massa de cada lâmpada, pode-se visualizar numericamente qual a lâmpada possui a maior quantidade de luz emitida, com o menor consumo e o menor peso, otimizando o tempo de voo e iluminação da aeronave projetada.

Para o projeto em questão utiliza-se refletores com a tecnologia de diodos emissores de luz, ou do inglês, *light emitting diode* (LED). O LED é um componente eletrônico semicondutor que tem a propriedade de transformar energia elétrica em luz. A figura 3 apresenta um circuito comum presente nas lâmpadas LED do mercado.

Figura 3: Circuito de uma lâmpada LED genérica encontrada no mercado.



Fonte: Nolasco, 2018.

Na Figura 3 pode-se ver que ao capacitor C1 é colocado um resistor R1 que tem a finalidade de descarregar o capacitor no momento que a rede não está fornecendo corrente. Um resistor de potência R2 limita a corrente de pico máxima para proteger os LEDs. Após esses dispositivos tem-se uma ponte retificadora, para transformar a corrente de alimentação de corrente alternada para corrente contínua. Como a alimentação do drone é feito por baterias, essa parte do circuito pode ser removida, interessando apenas a tensão de funcionamento do circuito de LEDs.

5.4 Hélices

A hélice é a estrutura que concentra todos os esforços que fazem com que a aeronave se movimente e voe. Com o controle da rotação, que repercute em uma variação da velocidade relativa da hélice com o ar, pode-se controlar exatamente a força de propulsão que cada conjunto motor-hélice produz. Essa força de propulsão é resultante da soma das forças de sustentação de cada pá da hélice, que depende especificamente do perfil aerodinâmico, da massa específica do ar, da área da asa e da velocidade relativa entre a asa e o ar, determinada pela equação 1.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A V^2 \quad (1)$$

Onde:

F_L = Força de Sustentação [N]

ρ = Massa específica do ar [kg/m³]

C_L = Coeficiente de sustentação

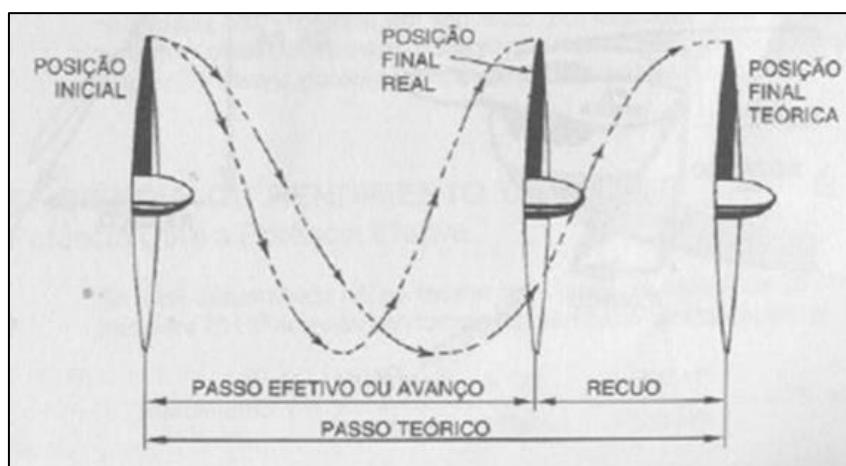
A = Área da asa [m²]

V = Velocidade relativa entre a asa e o ar [m/s]

Como cada hélice possui um perfil aerodinâmico, uma área específica e a rotação da hélice é controlada pelo motor, cada conjunto hélice-motor produzirá uma força de propulsão diferente. As hélices encontradas no mercado, frequentemente são de plástico (ou nylon) e vêm com diferentes tamanhos (ou diâmetros) e diferentes passos (*pitch*), também podem ser de fibra de vidro, fibra de carbono com resina ou de um composto de nylon e carbono em pó ou até madeira (LABORATÓRIO IMOBILIS, 2016).

As variáveis envolvidas na escolha de uma hélice são o diâmetro e o passo geométrico, também chamado de pitch. O diâmetro da hélice é intuitivo, e seu valor é igual a distância entre as suas extremidades. O passo geométrico de uma hélice é a distância que a hélice avançaria com uma rotação completa em um meio viscoso o suficiente de modo que a hélice se comportasse como um parafuso (AeroProjecto, Jornal300). Como o ar não é um meio sólido, a hélice sofre um escorregamento, avançando uma distância menor, que recebe o nome de passo efetivo ou avanço. A distância que a hélice deixou de avançar chama-se recuo (MENDONÇA, 2017). Na Figura 4 pode-se observar as diferenças entre o passo geométrico e o passo efetivo.

Figura 4: Passo geométrico, passo efetivo e recuo de uma hélice.



Fonte: Hangar33, 2015.

O tamanho das hélices terá um efeito direto sobre o ruído emitido pelo drone, seu tempo de voo e seu desempenho de voo. Grandes hélices são mais indicadas para

quadricópteros de estrutura Utility (simétricos), porque fazem menos ruído e dão maior tempo de voo. As hélices pequenas são mais indicadas para quadricópteros de estrutura Racing (assimétricos), porque darão ao drone maior versatilidade nas manobras (LABORATÓRIO IMOBILIS, 2016).

5.5 Bateria

As baterias utilizadas em drones são baterias inteligentes, possuem proteção contra sobrecarga, informação de temperatura e histórico de ciclos de carga (FLYPRO, 2022). É essencial ter essas informações para que se garanta que o drone execute um voo seguro e não caia. Geralmente são usadas baterias de polímero de lítio (LiPO) para esse tipo de utilização, porém existem também baterias de chumbo e de lítio iônico no mercado.

Essas baterias possuem um sistema de gerenciamento de bateria (BMS, sigla em inglês para *battery management system*). A maioria desses sistemas funcionam de acordo com esses quatro tópicos abaixo:

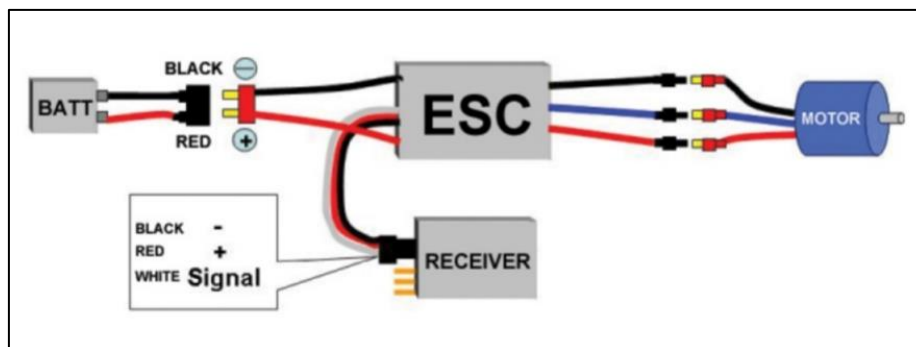
1. Monitoramento de Células: o BMS monitora individualmente cada célula da bateria para garantir que todas estejam operando dentro dos limites seguros de tensão e temperatura;
2. Monitoramento da tensão e corrente: as baterias utilizadas em drones possuem curvas características de tensão e corrente. Nessa curva é possível identificar os limites de tensão e corrente em que a operação da bateria pode ser feita de maneira segura e confiável. De acordo com a medição instantânea dessas variáveis é possível fazer um gerenciamento do tempo de voo da aeronave pelo controlador;
3. Proteção contra Sobreaquecimento: o BMS também monitora a temperatura da bateria. Caso a temperatura aumenta acima de um limite seguro, o BMS pode interromper o uso ou o carregamento para evitar danos;
4. Registro de Dados: muitos sistemas de gerenciamento possuem a capacidade de registrar dados de desempenho da bateria, como ciclos de carga, dados de temperatura e tensão, o que pode ser útil para manutenção preventiva e diagnóstico de problemas.

Para a escolha da bateria, deve ser levado em consideração a capacidade, taxa de descarga, tensão nominal de operação e o peso. A capacidade da bateria de um drone é medida em mAh e pode indicar quanto tempo a aeronave poderá se sustentar no ar. Para se estimar esse tempo, deve-se saber de antemão a corrente elétrica que os motores e os componentes elétricos da aeronave vão necessitar. Por exemplo, uma bateria com a capacidade de 4000 mAh, cujo conjunto de motores e componentes elétricos drenem uma corrente de 4 A irá manter o VANT voando por aproximadamente 1 hora. A taxa de descarga é expressa por um número acompanhado pela letra C. Esse valor indica qual a corrente elétrica máxima que pode ser drenada da bateria. Para obter essa corrente elétrica máxima, multiplica-se o valor da taxa de descarga em função da capacidade nominal da bateria em Ah. Por exemplo, caso uma bateria genérica possuísse uma taxa de descarga de 2 C, a corrente máxima que poderia ser drenada seria 2 C multiplicado por 4000 mAh, resultando em 8 A.

5.6 Controlador Eletrônico de Velocidade (ESC)

O controlador eletrônico de velocidade, comumente chamado de ESC (*Electronic Speed Control*), é a componente que irá controlar a velocidade de rotação de cada motor gerenciando a energia da bateria em função das informações recebidas da controladora de voo. A cada motor deve ser conectado um ESC. Como pode ser visto na figura 5, um ESC possui uma entrada para a bateria, três saídas para as bobinas do motor e uma entrada para receber as informações da placa controladora. Segundo Yoon (2015), a maioria dos ESC's comerciais são controlados a partir da modulação de largura de pulso, ou *pulse width modulation* (PWM) em uma frequência fixa de 50 Hz que são enviadas pela controladora de voo. À medida que a largura do pulso aumenta, a rotação dos motores também aumenta.

Figura 5: Layout de conexões de um ESC.



Fonte: ELETRONICLINIC, 2021.

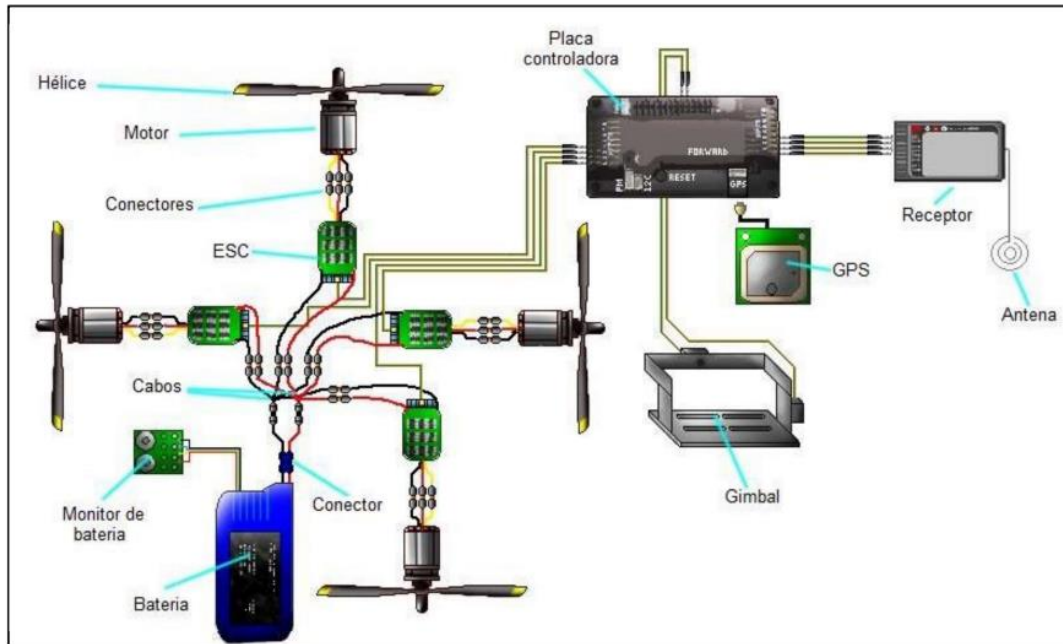
Para a escolha de um ESC deve-se atentar para sua capacidade máxima de corrente ser maior que a exigência de corrente máxima dos motores. Segundo EUGENIO e ZAGO (2019), é aconselhável escolher um ESC com no mínimo 30% a mais de corrente necessária para a demanda máxima dos motores.

5.7 Controladora de Voo

Segundo Dias (2017), os multicopteros são aerodinamicamente instáveis e necessitam de um computador para efetuar um voo estável. Esse computador lê informações de sensores instalados na aeronave, como os giroscópios e acelerômetros para saber o nível de inclinação em que o veículo se encontra. Com os dados obtidos dos sensores, o computador acelera ou desacelera cada motor individualmente para manter o multicoptero em voo nivelado.

A controladora de voo é um circuito integrado, normalmente constituído por um microprocessador, sensores e pinos de entrada/saída. Esse componente é responsável pelo mapeamento dos canais do controle de rádio para efetuar mudanças na velocidade, direção e altitude, podendo também, processar dados de componentes auxiliares ao voo, como por exemplo o GPS. A figura 6 exemplifica todas as partes de um drone e suas devidas conexões.

Figura 6: Layout básico de conexão de uma placa controladora de voo em um multirotor de 4 motores.



Fonte: EUGENIO e ZAGO, 2019.

5.8 Regulamentação

Existem algumas normas a serem seguidas para se operar drones no Brasil. Essas normas são regulamentadas por 3 instituições: Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). A seguir detalha-se como regulamentar a operação de um drone dentro de cada instituição.

- **DECEA:**

É necessário criar um cadastro contendo informações pessoais e informações do drone em um sistema criado pelo DECEA chamado SARPAS. Nesse sistema o usuário poderá solicitar a autorização para acessar um determinado espaço aéreo e operar o VANT por um intervalo de tempo.

- **ANAC:**

A ANAC divide os veículos aéreos não tripulados em três classes relacionando cada uma com o peso máximo de decolagem do drone, sendo:

Classe 1 – Peso de decolagem acima de 150 kg: equipamentos desse porte devem ser submetidos a processos de certificação similar a regulamentação existente para aeronaves tripuladas além de serem registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro. É também exigido ao piloto a obtenção do certificado médico aeronáutico (CMA).

Classe 2 – Peso de decolagem acima de 25 kg e menor que 150 kg: o projeto do veículo deverá ser previamente aprovado, além de necessitar o registro no Registro Aeronáutico Brasileiro. Essa classe exige também a obtenção do CMA.

Classe 3 – Peso de decolagem inferior a 25 kg: nessa categoria existe uma subdivisão entre aeronaves que voem acima de 400 pés e abaixo dessa altura. Para aeronaves com alcance acima de 400 pés deve-se obter uma autorização de seu projeto pela ANAC além de serem registradas no Registro Aéreo Brasileiro. Para projetos que operem abaixo de 400 pés de altura deve-se apenas obter o cadastro no sistema SISANT, apresentando dados pessoais e da aeronave.

Drones de até 250g não necessitam de cadastro ou registro.

- **ANATEL:**

Com o objetivo de evitar interferências dos drones em serviços como a comunicação via satélite, em detrimento do uso de radiocomunicação nos veículos, é necessária uma homologação da aeronave através do Sistema de Homologação e Certificação (SCH).

6. METODOLOGIA

Este trabalho teve como finalidade, primeiramente, a realização de um estudo acerca da montagem e funcionamento de um drone. Para isso, dividiu-se o drone em 6 partes essenciais: estrutura, motores, iluminação, hélices, controle e bateria. Essas partes foram devidamente estudadas e analisadas na parte intitulada “Referencial Teórico” do presente trabalho. Nessa análise são descritas as diferentes variáveis contidas nas especificações de cada peça do drone.

Após o estudo e descrição do funcionamento e das peças contidas no projeto de um drone, foram mapeadas as principais variáveis e limitantes envolvidas no projeto para estudar a viabilidade de criação de um protótipo para a atividade especificada. Em seguida, fez-se uma pesquisa no mercado para buscar peças que estivessem em concordância com esses valores.

Com as peças devidamente escolhidas e mapeadas, efetuou-se três projetos de diferentes tamanhos para análise e comparação. Foram calculados os parâmetros operacionais de voo e outras variáveis das 3 aeronaves projetadas para que seja feita uma análise da melhor alternativa. Foram calculados: tempo máximo de voo, carga útil máxima, peso, tamanho e custo.

- **Autonomia de Voo Máxima:**

A autonomia de voo máxima foi calculada considerando que a aeronave estaria em uma situação de voo nivelado sem se movimentar lateralmente nem verticalmente. Para isso foi utilizada a própria definição de potência e energia aplicada as características da aeronave pela equação 2.

$$A_V = \frac{60 \cdot N_B E_B}{P_I + P_M} \quad (2)$$

Onde:

A_V = Autonomia de voo [min]

N_B = Número de Baterias

E_B = Energia da Bateria [Wh]

P_I = Potência de Iluminação [W]

P_M = Potência dos Motores [W]

- **Fator de Carga Máximo:**

O fator de carga é definido como a razão entre a força de sustentação e o peso de uma aeronave (HEINZMANN, 2020). No caso de uma aeronave multirotora, a força de sustentação é igual a tração exercida pelos motores. Portanto, para calcular o fator de carga máximo, basta dividir a soma das trações máximas dos motores pela massa da aeronave. Este cálculo é definido pelas equações 3 e 4.

$$FC_{m\acute{a}x} = \frac{T_{m\acute{a}x}}{\sum W} \quad (3)$$

Onde:

$FC_{m\acute{a}x}$ = Fator de Carga Máximo

$T_{m\acute{a}x}$ = Tração Máxima dos Motores [kg]

$\sum W$ = Somatório de Massa das Componentes do Drone [kg]

$$\sum W = W_E + N_B \cdot W_B + N_L \cdot W_L + W_C + 4 \cdot W_M + 4 \cdot W_H + 4 \cdot W_{ESC} \quad (4)$$

Onde:

W = Massa das Componentes do Drone [kg]

W_E = Massa da Estrutura [kg]

W_B = Massa da Bateria [kg]

N_L = Número de Lâmpadas

W_L = Massa da Lâmpada [kg]

W_C = Massa da Controladora de Voo [kg]

W_M = Massa do Motor [kg]

W_H = Massa da Hélice [kg]

W_{ESC} = Massa do Controlador de Velocidade [kg]

- **Carga Útil:**

A carga útil foi calculada com a premissa de que a massa total do drone não deve exceder mais de 50% da tração máxima. Esse cálculo é definido pela equação 5 abaixo.

$$C_{\text{útil}} = 0,5 \cdot T_{\text{máx}} - \sum W \quad (5)$$

Onde:

$C_{\text{útil}}$ = Carga Útil [kg]

$T_{\text{máx}}$ = Tração Máxima dos Motores [kg]

$\sum W$ = Somatório de Massa das Componentes do Drone [kg]

Após o cálculo de todos os parâmetros, fez-se uma primeira análise acerca das características de cada drone. Com isso, pode-se definir as configurações de iluminação de cada drone. A partir dessa definição, fez-se um estudo luminotécnico no software DIALux, que utiliza o método ponto a ponto para fazer as suas simulações.

- **Método Ponto a Ponto:**

O método ponto a ponto é baseado na lei de Lambert, que diz: a iluminância produzida em um ponto de uma superfície é proporcional à intensidade luminosa da fonte na direção da superfície, proporcional ao cosseno do ângulo de incidência que o raio luminoso faz com a normal ao plano e inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte à superfície (CREDER, 2016). Essa lei é definida numericamente pela equação 6 para o caso do cálculo da iluminância em um plano horizontal.

$$E_p = \frac{I(\theta)}{D^2} \cos(\theta) \quad (6)$$

Onde:

E_p = Iluminamento em um ponto P em lúmens por metro quadrado [lux]

$I(\theta)$ = Intensidade luminosa da fonte na direção de P [cd]

D = Distância do centro da fonte de luz ao ponto P [m]

θ = Ângulo entre a vertical à superfície receptora e D

Logo, para utilizar esse método deve-se conhecer as curvas de distribuição luminosa das luminárias analisadas.

Para a análise do sistema de iluminação, foi usado como base um valor mínimo de 0,3 lux nas bordas da área iluminada. Esse valor corresponde aproximadamente a iluminação obtida em um dia de lua cheia sem nebulosidade, de acordo com Silveira (2018).

7. ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso foram projetados 3 drones com diferentes pesos: leve, intermediário e pesado. Pensando no desenvolvimento do produto a longo prazo, limitou-se o peso da aeronave em 25 kg para facilitar futuras regulamentações e operação. Tentou-se também não extrapolar as dimensões da aeronave para facilitar seu transporte, de modo a caber dentro de um carro comum. Fez-se um mapeamento das diversas partes da aeronave divididas na seguinte ordem: estruturas, grupo motopropulsor, inversores e iluminação e baterias.

Fez-se a escolha da controladora de voo *Pixhawk* para o controle e estabilização dos drones devido à sua facilidade de configuração e confiabilidade. A controladora de voo escolhida é a mesma para todas as aeronaves projetadas.

7.1 Estruturas

Foram escolhidas 3 estruturas quadrimotoras com diferentes dimensões e pesos para estudar a dinâmica do tamanho da aeronave com a sua performance. De acordo com a distância entre a ponta dos braços da estrutura, obtêm-se o diâmetro máximo permitido das hélices para o dimensionamento do grupo motopropulsor. O diâmetro máximo permitido das hélices é igual a distância de lado do drones. As informações das estruturas mapeadas estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1: Informações das estruturas selecionadas.

Estrutura	Diagonal [mm]	Lado [mm]	Lado [pol]	Peso [g]	Custo
E1	1200	848,53	33,41	2500,0	R\$ 3.922,56
E2	750	530,33	20,88	651,0	R\$ 1.004,61
E3	400	282,84	11,14	343,3	R\$ 435,06

Fonte: Do autor, 2023.

7.2 Grupo Motopropulsor

O grupo motopropulsor compreende 3 partes principais do VANT: motores, hélices e controladores de velocidade. Para o presente trabalho, foram selecionados 3 motores de diferentes tensões e potências com a intenção de acoplar cada um a uma estrutura específica e uma bateria específica. As informações dos motores mapeados estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2: Informações dos motores selecionados.

Motor	Tensão Elétrica [V]	Corrente Elétrica Máxima [A]	Peso Incluindo Cabos [kg]	Custo
M1	48,0	57,3	0,772	R\$ 1.808,98
M2	24,0	35,0	0,317	R\$ 774,98
M3	14,8	25,0	0,128	R\$ 568,18

Fonte: Do autor, 2023.

As hélices foram escolhidas respeitando os valores medidos entre a ponta dos braços das estruturas. Para cada motor foi selecionada uma hélice e suas informações e parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Informações e parâmetros das hélices selecionadas.

Hélice	Material	Diâmetro [mm]	Pitch [mm]	Peso [g]	Custo
H1	Fibra de Carbono + Epoxy	711,20	233,70	0,085	R\$ 1.607,35
H2	Fibra de Carbono + Epoxy	508,40	157,48	0,023	R\$ 620,35
H3	Polímero + Fibra de Carbono	280,30	106,68	0,01	R\$ 72,33

Fonte: Do autor, 2023.

Para o dimensionamento dos controladores de velocidade é importante ressaltar o funcionamento do conjunto hélice-motor. Cada motor possui uma relação de potência e tração de acordo com a porcentagem aplicada no acelerador e de acordo com a hélice selecionada. A partir desse conjunto motor-hélice, são feitos testes com diferentes níveis de aceleração, obtendo parâmetros utilizados para o dimensionamento dos VANTs. Um exemplo dessa relação entre essas variáveis do Motor M1 podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4: Características do Motor M1.

Tipo	Tensão (V)	Hélice	Aceleração	Tração (g)	Torque (N*m)	Corrente (A)	RPM	Potência (W)	Eficiência (g/W)	Temperatura de Operação (°C)
U11 - II KV120	48	T-MOTOR 28*9.2" CF	40%	2950	0,93	5,19	1934	252	11,72	118 (Temperatura Ambiente: 19°C)
			42%	3217	1,03	5,87	2039	284	11,31	
			44%	3400	1,08	6,34	2099	307	11,05	
			46%	3875	1,22	7,66	2267	372	10,42	
			48%	4158	1,32	8,49	2357	411	10,1	
			50%	4463	1,39	9,39	2451	456	9,79	
			52%	4759	1,49	10,27	2532	498	9,55	
			54%	5071	1,58	11,33	2622	550	9,22	
			56%	5477	1,70	12,6	2723	612	8,95	
			58%	5835	1,81	13,85	2821	673	8,67	
			60%	6195	1,92	15,18	2910	737	8,4	
			62%	6614	2,04	16,61	3026	807	8,19	
			64%	6921	2,14	17,97	3119	872	7,93	
			66%	7317	2,27	19,8	3220	962	7,6	
			68%	7799	2,40	21,5	3317	1044	7,46	
			70%	8137	2,52	23,25	3400	1130	7,2	
75%	9124	2,80	27,63	3624	1342	6,79				
80%	10137	3,09	32,46	3819	1577	6,42				
90%	12007	3,68	43,47	4210	2113	5,68				
100%	14159	4,33	57,27	4583	2783	5,08				

Fonte: T-MOTOR, 2023.

Para a seleção dos ESC's, o principal parâmetro é a corrente elétrica máxima suportada. Utilizou-se uma corrente correspondente a 100% de aceleração do datasheet de cada conjunto hélice-motor selecionado com um fator de ajuste de 30% a mais de corrente. Na Tabela 5 são demonstrados os ESC's selecionados e suas características.

Tabela 5: Informações sobre os controladores de velocidades selecionados.

ESC	Corrente Contínua Máx. [A]	Corrente de Pico [A]	Peso [kg]	Custo
ESC 1	80	120	0,109	R\$ 620,35
ESC 2	40	60	0,026	R\$ 206,75
ESC 3	21	-	0,002	R\$ 69,95

Fonte: Do autor, 2023.

Por fim, utilizando cada motor e hélice selecionada pode-se montar 3 grupos motopropulsores que serão utilizados no estudo. Com os dados retirados do datasheet de cada conjunto hélice-motor plotou-se um gráfico de dispersão no software Excel para obter uma equação que relacione a tração necessária com a potência requerida dos motores. Essas equações serão utilizadas posteriormente com o peso total da aeronave para calcular parâmetros de voo como por exemplo o tempo máximo que a aeronave será capaz de voar. A equação, o peso e o custo de cada conjunto motopropulsor selecionado estão presentes na Tabela 6.

Tabela 6: Equação, peso e custo de cada conjunto motopropulsor.

Grupo Motopropulsor	Tração x Potência [T x P]	Peso [kg]	Custo
M1 + H1 + ESC1	$P = 0,00001 T^2 + 0,0597 T - 5,7116$	0,966	R\$ 4.036,68
M2 + H2 + ESC2	$P = 0,0026 \cdot T^{1,4947}$	0,366	R\$ 1.602,08
M3 + H3 + ESC3	$P = 0,0072 \cdot T^{1,4341}$	0,140	R\$ 710,46

Fonte: Do autor, 2023.

7.3 Iluminação

O sistema de iluminação será suprido energeticamente pela bateria. Foram selecionadas 4 opções de luminárias no mercado. As características das luminárias são apresentadas na Tabela 7.

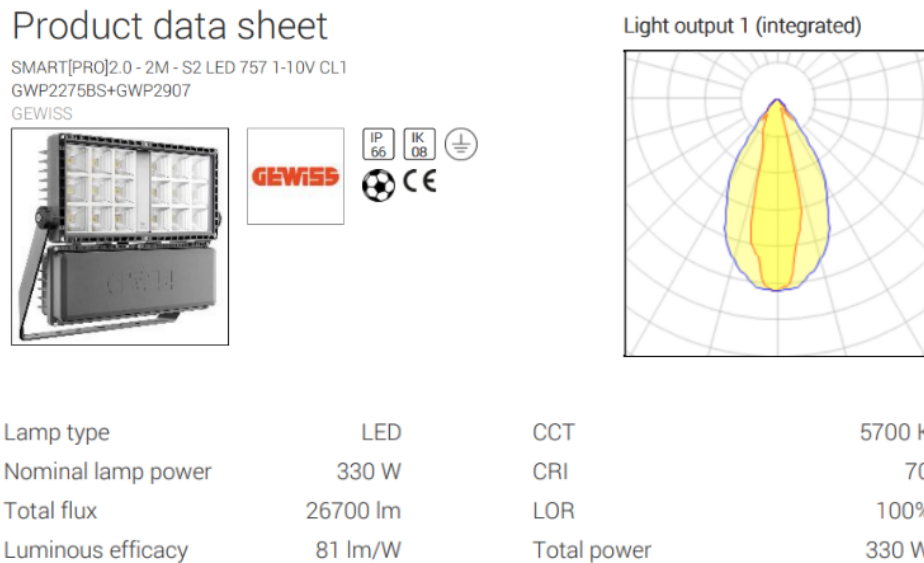
Tabela 7: Parâmetros das luminárias selecionadas.

Iluminação	Potência [W]	Fluxo Luminoso [lm]	Peso [kg]	Fluxo Luminoso Específico [lm/kg]	Custo
Refletor MicroLED	500	51.400	2,000	25.700	R\$ 161,40
Refletor LED	300	26.500	0,950	27.895	R\$ 99,11
Refletor LED	100	5.000	0,220	22.727	R\$ 27,37
Refletor Deformável	100	10.000	0,397	25.189	R\$ 284,00

Fonte: Do autor, 2023.

Como pode ser observado, o Refletor LED de 300 W apresenta o melhor fluxo luminoso por unidade de massa, com 27.895 lm/kg. Devido a essa característica, essa foi a luminária escolhida para compor o sistema dos Drones Intermediário e Pesado. Para efetuar as simulações, pesquisou-se uma luminária com parâmetros semelhantes ao Refletor de 300 W de potência na base de dados do software. Os parâmetros da luminária e a curva de distribuição de iluminação são detalhados na figura 7.

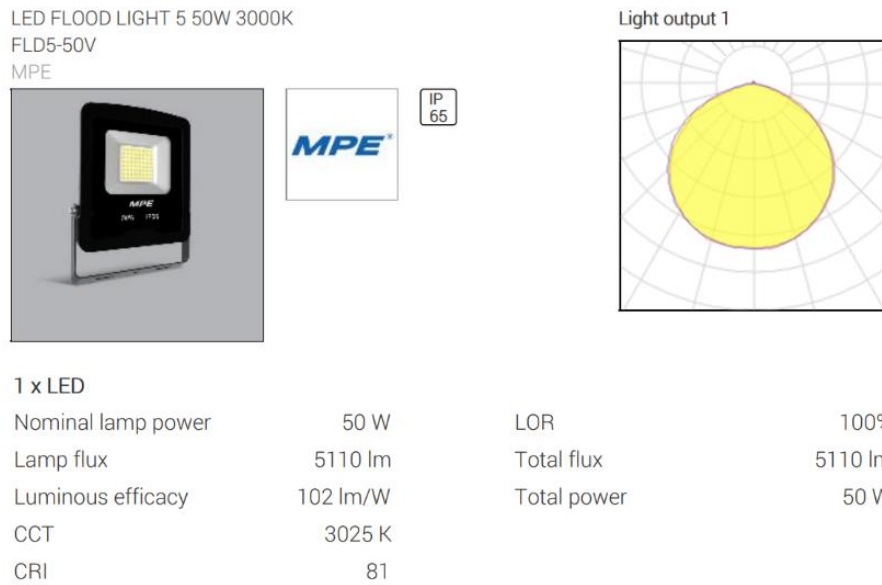
Figura 7: Parâmetros da luminária correspondente ao Refletor LED de 300 W.



Fonte: DIALux.

Para o Drone Leve, foi utilizado o Refletor LED de 100 W de potência para compor o seu sistema. Assim sendo, pesquisou-se na base de dados do software uma luminária com parâmetros parecidos. Na figura 8 são detalhados os valores e a curva fotométrica referentes a luminária encontrada nessa base de dados.

Figura 8: Parâmetros da luminária correspondente ao Refletor LED de 100 W.



Fonte: DIALux.

7.4 Bateria

Foram mapeadas 7 baterias no mercado para o projeto do protótipo especificado nesse trabalho. Responsável por fornecer energia para todos os sistemas da aeronave, a bateria deve ser robusta o suficiente para permitir um bom tempo de voo ao drone e leve para não sobrecarregar os motores. Essa característica pode ser analisada quando se olha para a variável de energia específica da bateria em Wh/g. Uma energia específica alta significa que a bateria possui muita energia e pouco peso. Na Tabela 9 são listadas as baterias encontradas no mercado para as tensões dos motores.

Tabela 9: Lista de baterias selecionadas no mercado para o estudo.

Bateria	Tensão Elétrica [V]	Capacidade [mAh]	Taxa de Descarga	Energia [Wh]	Peso [kg]	Energia específica [Wh/g]	Custo
B1	22,8	25.000	10 C	570,00	2,577	221,19	R\$ 2.610,80
B2	22,8	17.000	15 C	387,60	1,874	206,83	R\$ 1.845,64
B3	22,8	11.000	25 C	250,80	1,296	193,52	R\$ 1.121,84
B4	22,8	6.800	100 C	155,04	0,955	162,35	R\$ 827,15
B5	14,8	11.000	100 C	162,80	0,963	169,06	R\$ 723,75
B6	14,8	8.500	60 C	125,80	0,659	190,90	R\$ 708,24
B7	14,8	3.700	45 C	54,76	0,361	151,69	R\$ 310,15

Fonte: Do autor, 2023.

A bateria B1 tem a maior energia específica, porém tem a menor taxa de descarga entre as baterias mapeadas no mercado. Multiplicando a taxa de descarga da bateria B1 pela sua capacidade em mAh, obtêm-se um total de 250 A de corrente elétrica máxima que poderá ser drenada da bateria. Os motores dimensionados para o Drone Pesado possuem uma corrente máxima de operação de 57,3 A cada. Portanto, considerando todos os motores operando na sua capacidade máxima, exige-se uma corrente elétrica de 229,2 A. Nessa situação, a bateria B1 estaria operando abaixo de seu limite máximo, sobrando 20,8 A de corrente elétrica para o sistema de iluminação e para a controladora de voo.

Foi escolhida a bateria B1 para o projeto do Drone Médio e Pesado. No caso do Drone Pesado utilizou-se 2 baterias em série para suprir a demanda de tensão dos motores. Para o Drone Leve utilizou-se a bateria B6.

8. RESULTADOS

A seguir, nas Tabelas 10, 11 e 12 são apresentados os equipamentos e características de cada drone projetado. Com os equipamentos selecionados, o Drone Pesado ficou com uma massa de 11,538 kg e um custo total de R\$ 26.770,75. Foram utilizadas duas baterias em série para suprir a demanda do grupo motopropulsor de 48 V.

Tabela 10: Equipamentos e características do Drone Pesado.

DRONE PESADO						
Equipamento	Peso [kg]	Custo unitário	Quantidade	Peso Total [kg]	Custo Total	
E1	2,500	R\$ 3.922,56	1	2,500	R\$ 3.922,56	
M1 + H1 + ESC1	0,966	R\$ 4.036,68	4	3,864	R\$ 16.146,74	
B1	2,577	R\$ 2.610,80	2	5,154	R\$ 5.221,60	
Controladora Pixhawh	0,020	R\$ 1.479,86	1	0,020	R\$ 1.479,86	
TOTAL				11,538	R\$ 26.770,75	

O drone intermediário foi projetado com uma massa de 4,712 kg e um custo total de R\$ 11.503,59.

Tabela 11: Equipamentos e características do Drone Intermediário.

DRONE INTERMEDIÁRIO						
Equipamento	Peso [kg]	Custo unitário	Quantidade	Peso Total [kg]	Custo Total	
E2	0,651	R\$ 1.004,61	1	0,651	R\$ 1.004,61	
M2 + H2 + ESC2	0,366	R\$ 1.602,08	4	1,464	R\$ 6.408,32	
B1	2,577	R\$ 2.610,80	1	2,577	R\$ 2.610,80	
Controladora Pixhawh	0,020	R\$ 1.479,86	1	0,020	R\$ 1.479,86	
TOTAL				4,712	R\$ 11.503,59	

Por último, o projeto do drone leve ficou com uma massa de 1,582 kg e um custo total de R\$ 5.480,51.

Tabela 12: Equipamentos e características do Drone Leve.

DRONE LEVE						
Equipamento	Peso [kg]	Custo unitário	Quantidade	Peso Total [kg]	Custo Total	
E3	0,343	R\$ 435,06	1	0,343	R\$ 435,06	
M3 + H3 + ESC3	0,140	R\$ 710,46	4	0,560	R\$ 2.841,85	
B6	0,659	R\$ 723,75	1	0,659	R\$ 723,75	
Controladora Pixhawh	0,020	R\$ 1.479,86	1	0,020	R\$ 1.479,86	
TOTAL				1,582	R\$ 5.480,51	

Com os equipamentos e partes dos drones selecionados, fez-se o cálculo dos parâmetros operacionais de voo de cada aeronave. Foram calculados a autonomia máxima de voo, o fator de carga máximo, o peso, a carga útil máxima que poderá ser transportada, o tamanho das aeronaves sem as hélices e o custo total. Os resultados calculados podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13: autonomia de voo, carga útil máxima, peso, tamanho e custo de cada drone projetado.

	DRONE LEVE	DRONE INTERMEDIÁRIO	DRONE PESADO
Autonomia de Voo	28 min	48 min	68 min
Fator de Carga Máximo	3,11	2,88	4,54
Peso	1,58 kg	4,71 kg	11,54 kg
Carga Útil	0,88 kg	3,44 kg	16,78 kg
Tamanho Sem as Hélices	0,40 m	0,75 m	1,20 m
Custo	R\$ 5.480,51	R\$ 11.503,59	R\$ 26.770,75

Fonte: Do autor, 2023.

O Drone Leve possui uma autonomia de voo relativamente baixa, limitando o tempo de voo em 28 minutos. Seu peso é de 1,58 kg, permitindo uma carga útil máxima de apenas 0,88 kg. O tamanho do drone, sem as hélices, é de 0,40 m. Considerando esses parâmetros, o Drone Leve pode ser mais adequado para tarefas que não exigem longos períodos de voo ou uma carga útil significativa. Seu custo é de R\$ 5.480,51.

O Drone Intermediário possui uma autonomia de voo maior em comparação ao Drone Leve, com 48 minutos de voo possível. Seu peso é de 4,71 kg, permitindo uma carga útil máxima de 3,44 kg. O tamanho do drone, sem as hélices, é de 0,75 m. Com essas especificações, essa aeronave é capaz de realizar tarefas que demandam períodos de voo mais longos e uma carga útil relativamente maior. Seu custo é de R\$ 11.503,59.

O Drone Pesado possui a maior autonomia de voo entre os três, com a capacidade de voar por até 68 minutos. Seu peso é de 11,54 kg, permitindo uma carga útil máxima de 16,78 kg. O tamanho do drone, sem as hélices, é de 1,20 m. Com essas características, o Drone Pesado é capaz de executar tarefas que requerem uma capacidade de carga significativa e períodos de voo prolongados. No entanto, seu custo é o mais alto entre os três, totalizando R\$ 26.770,75.

Após o dimensionamento dos 3 drones, fez-se um estudo no software DIALux para definir uma configuração de iluminação específica para a execução da atividade. Esse software calcula a quantidade de iluminância em uma superfície pelo método ponto a ponto baseado na Lei de Lambert. Para definir essa configuração de iluminação específica, tomou-se como referência a iluminação mínima de 0,3 lux nas bordas da superfície de análise. Esse valor representa a quantidade média de iluminação em uma noite de lua cheia sem nebulosidade. De acordo com o autor, com 0,3 lux de iluminação, uma pessoa consegue ter um senso mínimo de direção e orientação dentro do mar. Uma superfície circular de 100 metros de diâmetro foi usada para as simulações. Foram simuladas 3 configurações distintas de iluminação, uma para cada drone projetado respeitando o valor de carga útil calculada.

Para o Drone Leve, foram utilizadas 4 luminárias similares ao Refletor LED de 100 W da Tabela 7 a uma altura de 33 metros. Na simulação uma iluminância de 0,3 lux foi calculada na borda da superfície, 1,0 lux a uma distância de 35 metros do centro do círculo e 5,0 lux a uma distância de 12 metros do centro do círculo. Os resultados obtidos na simulação do software podem ser observados na Figura 9.

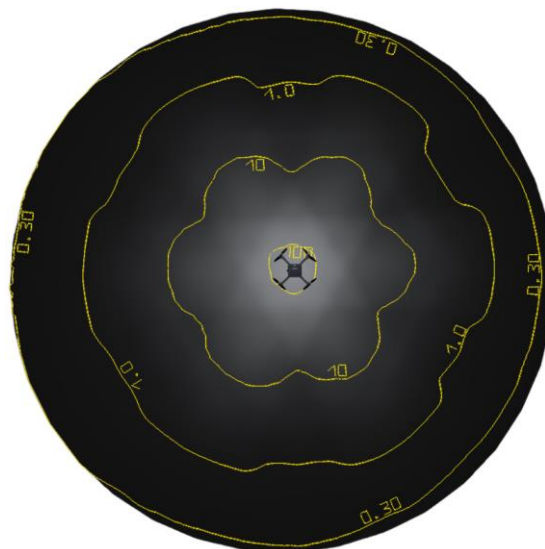
Figura 9: Resultado do sistema de iluminação do Drone Leve.



Fonte: Do autor, 2023.

Para o Drone Intermediário, foram utilizadas 3 luminárias similares ao Refletor LED de 300 W da Tabela 7 a uma altura de 33 metros. Nessa simulação uma iluminância de 0,3 lux foi calculada na borda da superfície, 1,0 lux a uma distância de aproximadamente 35 metros do centro do círculo, 10,0 lux a uma distância aproximada de 20 metros do centro do círculo e uma iluminação de 100,0 lux no centro da superfície. Os resultados obtidos na simulação do software podem ser observados na Figura 10.

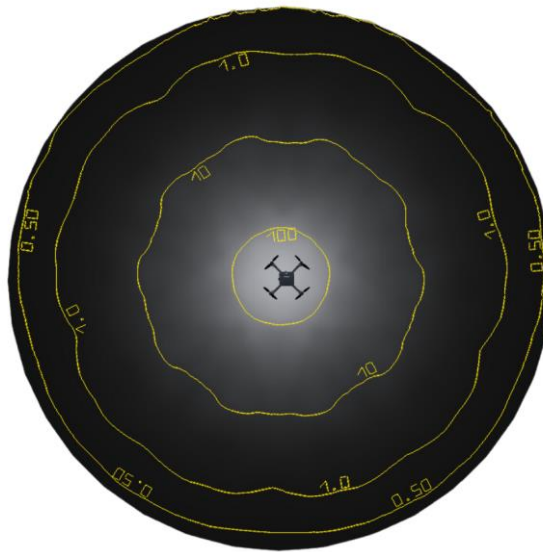
Figura 10: Resultados do sistema de iluminação do Drone Intermediário.



Fonte: Do autor, 2023.

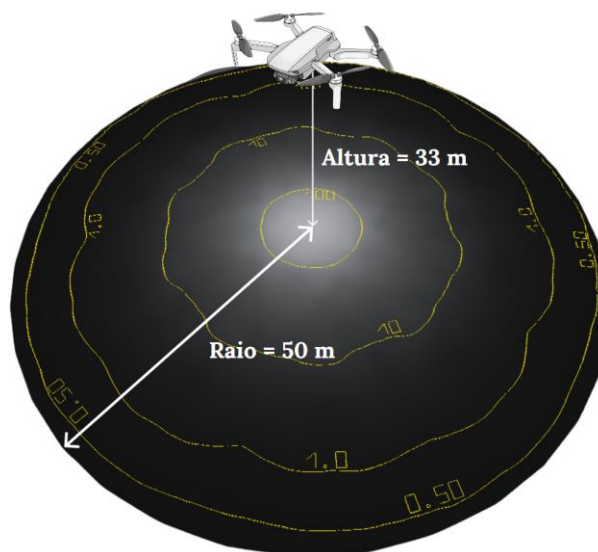
Para o Drone Pesado, foram utilizadas 5 luminárias similares ao Refletor LED de 300 W da Tabela 7 a uma altura de 33 metros. Nessa simulação uma iluminância de 0,5 lux foi calculada na borda da superfície, 1,0 lux a uma distância de 42 metros do centro do círculo, 10,0 lux a uma distância de 25 metros do centro do círculo. Valores superiores a 100,0 lux foram calculados até a distância de aproximadamente 8 metros do centro do círculo. Os resultados obtidos na simulação do software podem ser observados nas Figuras 11 e 12.

Figura 11: Resultados do sistema de iluminação do Drone Pesado.



Fonte: Do autor, 2023.

Figura 12: Vista diagonal do Drone e da superfície iluminada.



Fonte: Do autor, 2023.

Após as simulações no software DIALux, calculou-se novamente os valores dos parâmetros de voo previamente obtidos na Tabela 13 agora com os sistemas de iluminação instalados nas aeronaves. Os resultados são demonstrados na Tabela 14. Esse cálculo contou com o acréscimo de mais duas versões do Drone Pesado com o aumento do número de baterias.

Tabela 14: autonomia de voo, carga útil máxima, peso, tamanho e custo de cada drone projetado.

	DRONE LEVE	DRONE INTERMEDIÁRIO	DRONE PESADO (2 Baterias)	DRONE PESADO (4 Baterias)	DRONE PESADO (6 Baterias)
Autonomia de Voo	19 min	20 min	22 min	35 min	42 min
Fator de Carga Máximo	2,00	2,16	3,48	2,64	2,13
Peso	2,46 kg	7,56 kg	16,28 kg	21,44 kg	26,59 kg
Carga Útil	0,00 kg	0,59 kg	12,03 kg	6,88 kg	1,75 kg
Tamanho Sem as Hélices	0,40 m	0,75 m	1,20 m	1,20 m	1,20 m
Custo	R\$ 5.589,99	R\$ 11.800,92	R\$ 27.266,30	R\$ 32.799,35	R\$ 38.020,95

Fonte: Do autor, 2023.

De acordo com a Tabela 14, nota-se que existe uma diminuição da autonomia de voo, do fator de carga máximo e da carga útil máxima de cada aeronave. Essa diminuição é explicada pelo aumento de peso das aeronaves, visto que parte da carga útil calculada na Tabela 13 foi utilizada pelos sistemas de iluminação instalados, diminuindo também o fator de carga e a autonomia de voo. Apesar da diminuição desses parâmetros, as aeronaves ainda apresentam parâmetros aceitáveis para efetuar um voo seguro e controlado segundo a literatura estudada, mantendo um fator de carga máximo maior ou igual a 2. Inclusive, como o fator de carga do Drone Pesado com 2 baterias instaladas ficou muito acima do limite estipulado, pode-se projetar mais duas versões com mais baterias a bordo. A versão projetada com 4 baterias apresentou um aumento de aproximadamente 60% na autonomia de voo em relação a versão com 2 baterias e um aumento de 20% no custo total. O fator de carga diminuiu de 3,48 para 2,64. A versão do Drone Pesado com 6 baterias instaladas obteve uma autonomia de voo superior as demais aeronaves, e um fator de carga acima do limite, porém o seu peso total de decolagem extrapolou o valor de 25 kg que dificulta o processo de regulamentação e operação da aeronave.

9. CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho demonstra a capacidade da tecnologia de ampliar os horizontes das atividades humanas, tornando-as mais acessíveis e emocionantes. Ao permitir que surfistas desfrutem das ondas do mar sob a luz de um sistema de iluminação embarcado em um drone, este projeto expande as possibilidades da prática esportiva.

É importante salientar que, por mais que se tenha buscado referências objetivas para efetuar a análise da iluminação, esse aspecto do trabalho continua sendo muito subjetivo, sendo necessária a exploração experimental do tema para encontrar uma configuração que seja, ao mesmo tempo, confortável e segura para o surfista. Em todas as configurações projetadas, foi possível obter uma iluminação de 0,3 lux nas bordas da superfície circular de 100 metros de diâmetro. Porém, nos drones mais pesados e robustos, foi possível alcançar níveis de iluminância maiores, próximos dos 100 lux no centro da superfície, trazendo uma melhor visão e percepção do ambiente. Explorar diferentes modelos de iluminação, variando a altura de voo e geometria das luminárias instaladas, juntamente com uma análise experimental desse aspecto, podem trazer resultados mais consolidados para a prática.

Nota-se também que, drones mais robustos, com motores mais potentes e hélices maiores, possuem uma relação de carga útil pelo peso que aumentam gradativamente com o tamanho e dimensões da aeronave. Essa característica possibilita a instalação de sistemas de iluminação mais robustos sem afetar tanto a autonomia de voo e o fator de carga. Portanto, após definir uma configuração de iluminação ideal, pode-se trabalhar com essa característica afim de projetar um drone com melhor custo benefício.

O sistema de controle da aeronave não foi explorado nesse estudo. Portanto, para futuros trabalhos, sugere-se um estudo sobre um modelo de controle autônomo da aeronave. Esse controle pode ser feito de maneira híbrida, aliando um sistema de navegação por satélite (GPS), instalado na aeronave e no surfista, e um sistema de rastreamento do usuário por imagem. Utilizando esses sistemas junto com um algoritmo de programação, é possível fazer com que o drone siga e ilumine o usuário durante toda a prática do esporte.

Além do modelo de controle da aeronave, sugere-se também um modelo para efetuar um sensoriamento autônomo para prevenir colisões entre aeronaves. Esse modelo possibilitará o uso simultâneo de diversos drones para a prática.

A elaboração do projeto de um drone é um assunto complexo e cheio de detalhes que integra diversas áreas do conhecimento da engenharia. Dentro desse contexto, buscou-se detalhar ao máximo o funcionamento e as peças que contemplam um quadricóptero, mas que também podem ser aplicadas e utilizadas em outras configurações de multirotores. Por fim, escrita desse trabalho pode servir como base para futuros estudos e projetos que envolvam multirotores em geral.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AEROPROJECTO. **Jornal300**, 2022. Disponível em: <<http://jonal300.no.comunidades.net/6-a-helice>>. Acesso em: 19 de Setembro de 2022.
- [2] BALAKRISHNAN, S. **Duct Fanned Shielding Design For Quadrotors**, 2016. Tese de Mestrado em Design de Engenharia – Faculdade de Ciências em Engenharia e Tecnologia – Norges Arktiske Universitet. Disponível em: <https://munin.uit.no/bitstream/handle/10037/9982/thesis.pdf?sequence=2>. Acesso em: 19 de Junho de 2023.
- [3] CREDER, H. **Instalações Elétricas**, 2016. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.
- [4] BRAGA, P. **Projeto de um Quadricóptero - Uma Visão Geral**, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Mecânica - Universidade Federal Fluminense. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/7800>. Acesso em: 20 de Julho de 2023.
- [5] DEMOLINARI, H. **Projeto de Construção de um Drone Hexacóptero**. 2016. 62p. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/handle/1/1792>>. Acesso em: 11 de Março de 2022.
- [6] DIAS, G. **Projeto de um Drone Híbrido**, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Mecânica - Universidade Federal Fluminense. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/4522/ModeloProjetoFinal-Drone%20h%c3%adbriado%28sem%20assinatura%29%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 de Maio de 2023.

- [7] DOS ANJOS, G. **Estudo e Desenvolvimento da Aplicação de um Sistema Fotovoltaico em Drones**, 2016. 79p. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, UFRGS, Porto Alegre. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/157857>>. Acesso em: 11 de Março de 2022.
- [8] ELETRONICLINIC. **Electronic Speed Controller ESC**, 2021. Disponível em: <https://www.electronicclinic.com/electronic-speed-controller-esc/>. Acesso em: 24 de Fevereiro de 2023.
- [9] FLYING SELFIE BOTS. **IEEE Spectrum**, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6995634>. Acesso em: 22 de Julho de 2022.
- [10] FLYPRO. **Anatomia de um Drone**, 2022. Disponível em: <<https://www.flypro.com.br/pagina/anatomia-de-um-drone.html>>. Acesso em: 05 de Abril de 2022.
- [11] HANGAR33. **Como as Hélices Funcionam?**, 2015. Disponível em: <http://blog.hangar33.com.br/como-as-helices-funcionam/>. Acesso em: 20 de Setembro de 2022.
- [12] HEINZMANN, M. **Avaliação Estrutural da Asa de um Vant: Estudo de Caso Para uma Aeronave da Competição SAE Brasil Aerodesign**, 2020. Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Caxias do Sul - Engenharia Mecânica. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/9013/TCC%20Maiquel%20Rodrigo%20Heinzmann.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 29 de Julho de 2023.
- [13] HOW DOES FOLLOW ME MODE WORK IN DRONES. **Droneblog**, 2022. Disponível em: <https://www.droneblog.com/follow-me-mode/#:~:text=The%20Follow%20Me%20feature%20on,follow%2C%20or%20GPS%20or%20GLONASS.>>. Acesso em: 08 de Abril de 2022.

[14] LABORATÓRIO IMOBILIS. **Construa um Drone “Do Zero” - Parte 1**, 2016. Universidade Federal de Ouro Preto - Departamento de Computação. Disponível em: <<http://www2.decom.ufop.br/imobilis/como-construir-um-drone-quadricoptero/>>.

Acesso em: 19 de Setembro de 2022.

[15] LABORATÓRIO IMOBILIS. **Drone: Construa o Seu “Do Zero” - Parte 2**, 2016. Universidade Federal de Ouro Preto - Departamento de Computação. Disponível em: <http://www2.decom.ufop.br/imobilis/drone-zero-parte-2/>. Acesso em: 19 de Setembro de 2022.

[16] LABORATÓRIO IMOBILIS. **Construa um Drone “Do Zero” - Parte 3**, 2016. Universidade Federal de Ouro Preto - Departamento de Computação. Disponível em: <<http://www2.decom.ufop.br/imobilis/construa-um-drone-do-zero-parte-3/>>. Acesso em: 19 de Setembro de 2022.

[17] MENDONÇA, João et al. **Trabalho Acadêmico Integrador Pré Moldagem de uma hélice de passa fixo**, 2017. Trabalho Acadêmico Integrador do curso de Engenharia Mecânica – Instituto Federal de Minas Gerais – campus Arcos. Disponível em: https://www.ifmg.edu.br/arcos/ensino-1/tai/20172_TAI2_Helicepassofixo.pdf. Acesso em: 20 de Setembro de 2022.

[18] MEYER, I. **Caracterização de Motores Brushless de Pequeno Porte para Veículos Aéreos não Tripulados**, 2019. Dissertação de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/RAOA-BCGGNR/1/dissertacao_ivo_zatti_lima_meyer.pdf. Acesso em: 9 de Julho de 2023.

[19] NOLASCO, J. **Controlador de Leds de Elevado Fator de Potência Conectado à Rede CA Baseado no Conversor Cuk Isolado**, 2018. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Juiz de Fora. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/8777/1/josimarribeironolasco.pdf>. Acesso em: 20 de Agosto de 2023.

[20] PLIEV, A. **Reinforcement Learning Applied to an Autonomous Drone for Follow-Me Behavior**. 2021. 78p. Monografia (Graduação) - Curso de Inteligência Artificial - Utrecht University. Disponível em: <<https://studenttheses.uu.nl/handle/20.500.12932/39433>>. Acesso em: 01 de Abril de 2022.

[21] SILVEIRA, F. **Sobre a Forma e o Brilho da Lua**, 2018. Centro de Referência para o Ensino de Física - CREF - Apoio SEAD/UFRGS. Disponível em: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=sobre-a-forma-e-brilho-da-lua>. Acesso em: 16 de Maio de 2023.

[22] STEVENS, B. L.; LEWIS, F. L. **Aircraft control and simulation**. New York: John Wiley & Sons, 2003.

[23] T-MOTOR. **Specifications and Test Report - U11 II**, 2023. Disponível em: <https://store.tmotor.com/goods-768-U11.html>. Acesso em: 5 de Junho de 2023.

[24] YOON, M. **On Driving Signal of Electronic Speed Controller for Small Multi-Rotor Helicopter**, 2015. Department of Precision Mechanical Engineering - Gangneung-Wonju National University - South Korea. Disponível em: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/63168390/on-driving-signal-of-electronic-speed-IJERTV4IS11052520200501-107583-1jt0q7u-libre.pdf?1588402783=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DIJERT On Driving Signal of Electronic Sp.pdf&Expires=1694831900&Signature=EA-pifav0Qj1Im3DH3CQhQphGDzfbIZqNHEWDVzGWQ2gQOSZ-pyUbaI89H2OWUHdo~Odr1zER-LA1bOT1vmPVMtTb3cjtjkjNW~cj8OxHwyweM7PwpYZlO5tNYe~EqXiyOzDveZZjBLI2EGLLxsKaMkxI5kDvC~b8Bbkoa8knwgDPuocQ~ai4A~AG1CjA2Jc1HDbmC-9zr0XzS-HLkR-4zgR0DmMx02MNEI4KhReDopUZscNA9TzXu0gJf5EU4OU9D0~an0RTUsJeVb02BVCXWgMfRfe52uNOjedPZzw5SrjJu-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/63168390/on-driving-signal-of-electronic-speed-IJERTV4IS11052520200501-107583-1jt0q7u-libre.pdf?1588402783=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DIJERT%20On%20Driving%20Signal%20of%20Electronic%20Sp.pdf&Expires=1694831900&Signature=EA-pifav0Qj1Im3DH3CQhQphGDzfbIZqNHEWDVzGWQ2gQOSZ-pyUbaI89H2OWUHdo~Odr1zER-LA1bOT1vmPVMtTb3cjtjkjNW~cj8OxHwyweM7PwpYZlO5tNYe~EqXiyOzDveZZjBLI2EGLLxsKaMkxI5kDvC~b8Bbkoa8knwgDPuocQ~ai4A~AG1CjA2Jc1HDbmC-9zr0XzS-HLkR-4zgR0DmMx02MNEI4KhReDopUZscNA9TzXu0gJf5EU4OU9D0~an0RTUsJeVb02BVCXWgMfRfe52uNOjedPZzw5SrjJu-)

[8xJoPENlrAbfiz~EImhJdwBjnSFDso5J7XFYhqBQ_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://www.zikodrives.com/...). Acesso em: 15 de Agosto de 2023.

[25] ZIKODRIVE. **Sensored versus sensorless brushless DC (BLDC) motors and controllers**, 2018. Disponível em: <https://zikodrives.com/support/zikouniversity-motor-control-theory-application/sensored-versus-sensorless-brushless-motors-controllers/> . Acesso em: 15 de Junho de 2023.