

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Estudo do Estado da Arte: Quadrotores

Apresentada por: Mateus Zarth Seixas

Orientado por: Prof. Marco Reis, M.Eng.

Novembro de 2021

Mateus Zarth Seixas

Estudo do Estado da Arte: Quadrotores

Salvador
Centro Universitário SENAI CIMATEC
2021

Resumo/abstract, sumário e siglas

Resumo

Quadrotores são veículos aéreos não tripulados de asas rotativas que, por possuírem diversas habilidades, vêm sendo utilizados cada vez mais tanto para fins civis, como para fins militares. Este documento traz o estudo do estado da arte (SOTA) sobre quadrotores, fazendo um review das suas aplicações, classificações, opções de design, estudos sobre seus principais componentes, principais funcionalidades, como controle, planejamento de trajetória, localização e estudo sobre modelagem e identificação.

Palavras-chave: Quadrotores, Estado da Arte, Review, veículos aéreos não tripulados, SOTA

Abstract

Escreva aqui, em inglês, o resumo da dissertação, incluindo os contextos geral e específico, dentro dos quais a pesquisa foi realizada, o objetivo da pesquisa, assunção filosófica, os métodos de pesquisa usados e as possíveis contribuições que o que é proposto pode trazer à sociedade.

Keywords: Keyword 1, Keyword 2, Keyword 3, Keyword 4, Keyword 5

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
1.2	Justificativa	1
1.3	Organização do documento	2
2	Ambiente de Desenvolvimento	3
2.1	Ambiente de Aplicação	3
2.2	Situação Atual do Desenvolvimento	3
2.3	Mercado de Atuação	4
3	Metodologia	5
3.1	Ciclo Ingênuo	6
3.2	Ciclo Otimizado	6
3.3	Ciclo de Impacto	7
3.4	Ciclo de Produção	7
4	Estudo do Estado da Arte	8
4.1	Quadrotores	8
4.1.1	Classificações	9
4.1.1.1	Classificação Quanto ao Peso	10
4.1.1.2	Classificação Quanto a Configuração	10
4.1.2	Principais Componentes	11
4.1.2.1	Sensores Inerciais	11
4.1.2.2	Motores	11
4.1.2.3	Baterias	12
4.1.2.4	Microcontrolador	13
4.2	Funcionalidades	14
4.2.1	Modelagem	14
4.2.2	Controle	14
4.2.3	Localização	16
4.2.4	Planejamento de Trajetória	17
4.3	Revisão Bibliográfica	18
4.3.1	Rede de Cocitação	18
4.3.2	Principais Autores	19
5	Conclusão	21
5.1	Considerações finais	21
	Referências	22

Lista de Figuras

2.1	Quadrotor Usado para Delivery	4
3.1	Método BILI	5
4.1	Movimentos do Quadrotor	9
4.2	Configurações	10
4.3	Benchmark dos Microcontroladores	13
4.4	Rede de Cocitação	19
4.5	Gráfico de Total Citation	20

Introdução

Este documento aborda o estudo do estado da arte de veículos aéreos não tripulados (VANTs) do tipo quadrotor, que são aeronaves de asas rotativas com quatro propulsores que podem se deslocar em todas as direções no espaço tridimensional. Esses veículos são comumente chamados de *drones*, que em inglês significa zangão ou zumbido, pelo barulho gerado pelos seus rotores em sua operação.

Os quadrotores são veículos muito ágeis, com grande manobrabilidade e payload, além de possuírem a habilidade de realizar vôos estacionários e também pouso e decolagem vertical. Esses atributos tornam essas aeronaves muito úteis em diversas aplicações. Entretanto existem desafios a serem enfrentados na concepção de uma plataforma desse tipo, como escolha de componentes, controle, localização, tempo de vôo e planejamento de trajetória.

Esta pesquisa apresenta os principais estudos acadêmicos realizados sobre este tipo de aeronave, principais autores, técnicas mais utilizadas aplicadas em suas funcionalidades e modelos já desenvolvidos, para embasar o desenvolvimento de um projeto de concepção de um veículo desse tipo.

1.1 Objetivos

Este estudo foi realizado para dar suporte no desenvolvimento de um quadrotor autônomo com capacidade de realizar pouso em uma plataforma móvel. Trazendo conhecimento das melhores técnicas que vem sendo utilizadas em áreas como navegação, controle e localização e mapeamento simultâneos (SLAM), assim como os melhores modelos, arquiteturas para conceber um veículo eficiente e principais componentes.

1.2 Justificativa

Os VANTs tem sido cada vez mais utilizados para fins civis e militares. Tarefas que envolvem risco podem ser facilmente executadas por esse tipo de aeronave sem expor o piloto aos perigos associados a essa missão. Os drones tem sido utilizados em áreas como cinematografia, cartografia, vigilância, entrega de encomendas, mapeamento, entre

outras. Devido a isso surge a importância de estudar essas aeronaves que apresentam alguns desafios a serem enfrentados como autonomia de vôo, localização e controle.

1.3 Organização do documento

Este documento apresenta 5 capítulos e está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Apresenta o estudo que é desenvolvido neste documento, contextualizando a pesquisa, trazendo o objetivo principal, a justificativa e a organização do documento.
- **Capítulo 2 - Ambiente de Desenvolvimento:** Apresenta os possíveis ambientes de atuação desse tipo de plataforma, a situação atual do desenvolvimento e as aplicações de mercado;
- **Capítulo 3 - Metodologia:** Apresenta a metodologia utilizada para desenvolver esta pesquisa;
- **Capítulo 4 - Estudo do Estado da Arte:** Apresenta os conceitos básicos de quadrotores, as classificações, principais componentes no desenvolvimento de uma plataforma desse tipo, principais funcionalidades, a revisão bibliográfica e o mapa conceitual;
- **Capítulo 5 - Conclusão:** Apresenta as conclusões, resultados obtidos e contribuições desta pesquisa.

Ambiente de Desenvolvimento

2.1 *Ambiente de Aplicação*

Existem basicamente dois tipo de ambiente que os quadrotores aéreos podem atuar: o ambiente indoor e o ambiente outdoor. Nas missões em ambiente outdoor os quadrotores são expostos a ambientes desconhecidos, onde existe a forte presença de perturbações, como rajadas de vento e obstáculos dinâmicos. Nesse tipo de missão, os quadrotores muitas vezes vão precisar de sensores do tipo GPS para ajudar na localização do veículo e também, um controlador adequado para lidar com a rejeição de perturbação e com as incertezas paramétricas, além de um planejador de trajetória online. As missões indoor possuem menos perturbações e ambientes mais estruturados. Sendo possível fazer o mapeamento prévio do ambiente para realizar as operações.

2.2 *Situação Atual do Desenvolvimento*

As pesquisas mais atuais na área se concentram em áreas como controle, planejamento de trajetória, autonomia, percepção e navegação autônoma. O controle ainda é muito estudado pelo fato desse tipo de aeronave ser naturalmente instável, não-linear e subatuada, sendo necessário o desenvolvimento de controladores eficientes para realizar o segmento de trajetória, a rejeição de perturbação e ter insensibilidade a erros de modelagem e de incertezas paramétricas de forma ótima, com o menor gasto energético. O planejamento de trajetória também é desafiador pelo fato do ambiente de atuação ser tridimensional, que aumenta muito o custo computacional dos algoritmos. Isso torna necessário o estudo de algoritmos otimizados, com custos computacionais menores, permitindo que o planejador calcule trajetórias em tempos inferiores. Na questão de autonomia, uma grande limitação dos veículos aéreos de asas rotativas de forma geral é o gasto energético que a aeronave tem para manter vôo. Utilizar baterias maiores aumenta também o peso da aeronave, sendo necessário o estudo das melhores tecnologias que vem sendo usadas. Tem surgido pesquisas também de recarregamento desse tipo de aeronave wireless em estações preparadas para isso (MULGAONKAR et al., 2014; SIERRA et al., 2019; ABDILLA; RICHARDS; BURROW, 2015). Para alcançar essas plataformas muitas vezes é necessário realizar um pouso autônomo, quesito que vem sendo muito estudado também em (LIM et al., 2021; SIMON et al., 2018; FALANGA et al., 2017; JIN et al., 2016; SERRA et al., 2016; KIM et al., 2016; LING et al., 2014; SERRA et al., 2014; HERISSÉ et al., 2012).

2.3 Mercado de Atuação

O uso do veículos aéreos não tripulados do tipo quadrotor tem se expandido em diversas áreas, como civil, militar e acadêmica. Em aplicações militares, pelo fato desse tipo de aeronave possuir alta manobrabilidade e possibilidade de realizar vôos estacionários ou quase estacionários, eles podem ser utilizados em missões de espionagem, monitoramento e vigilância. Como elas não necessitam de um piloto embarcado, não colocando em risco o operador, e também por poderem ser muito pequenas, podem ser utilizadas em missão de busca e resgate em ambientes hostis, como em situações de desmoronamento. Na área civil, seu uso tem se popularizado muito para entretenimento, diversos modelos são comercializados com finalidade exclusivamente lúdica, sendo muitas vezes equipados com câmeras para captar imagens. Na área cinematográfica, tem sido utilizados para a realização de vídeos e fotografias aéreas, substituindo os helicópteros, que tinham custos associados maiores na sua operação. Seu uso tem se popularizado também na agricultura, para realização de monitoramento das plantações, irrigação agrícola, semeadura e distribuição de defensivos. Os quadrotor já tem sido utilizado até para a realização de entregas do tipo delivery, como mostrado na Figura 2.1. No ambiente acadêmico, os quadrotores são utilizados como plataforma para teste de estratégias de controle, dada a dificuldade de se estabilizar e de controlar esse tipo de veículo, e também para teste de técnicas de planejamento de trajetória, pelo seu espaço de atuação ser tridimensional, o que torna as soluções mais complexas e com maior custo computacional.

Figura 2.1: Quadrotor Usado para Delivery



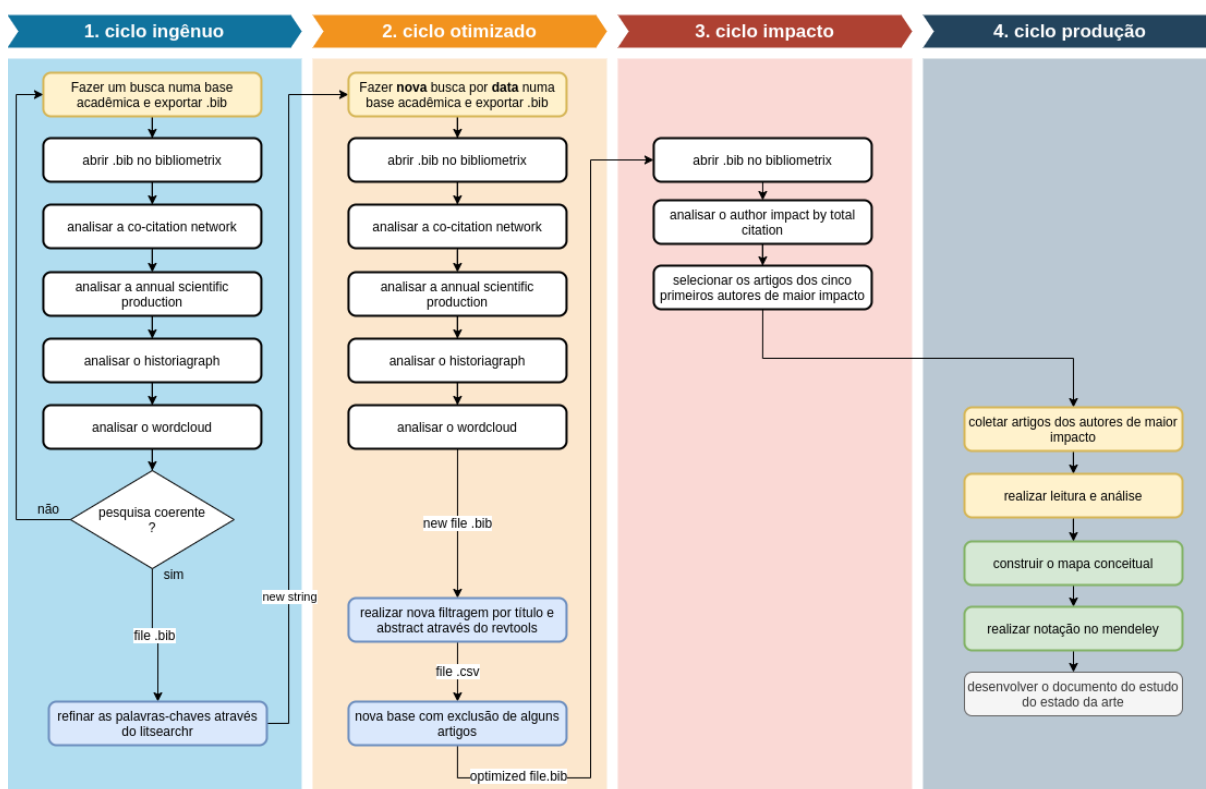
Fonte: ([WIKIPEDIA](#), 2021)

Metodologia

A pesquisa do estudo do estado da arte desenvolvida neste documento foi elaborada principalmente a partir do método BILI, que permite realizar uma pesquisa bibliográfica em um banco de dados de artigos científicos, publicações em periódicos, livros e outras fontes de conhecimento científicos, fazendo o levantamento das publicações e dos autores mais impactantes na área pesquisada. Também foram realizadas pesquisas para avaliar as soluções já encontradas no mercado.

O método BILI é dividido em quatro ciclos que acontecem em sequência, como mostrado na Figura 4.3. Eles são chamados de ciclo ingênuo, ciclo otimizada, ciclo de impacto e ciclo de produção.

Figura 3.1: Método BILI



Fonte: Autoria própria.

3.1 *Ciclo Ingênuo*

No primeiro ciclo do método BILI, é feita uma busca das pesquisas desenvolvidas na área estudada em um banco de dados de documentos acadêmicos através de palavras-chave que tenham conexão o tema proposto. O banco de dados escolhido para aplicar o método foi o Scopus.

O resultado da busca no banco de dados com as palavras-chave é um arquivo .bib, que contém o nome dos documentos encontrados, palavras-chave, ano de publicação, nome dos autores, DOI, resumo, entre outros.

Em seguida o arquivo .bib gerado no banco de dados é aberto no Bibliometrix, que é um pacote desenvolvido para R que permite uma clara visualização das informações levantadas e também realiza análises dos dados obtido.

É então realizada a análise da rede de cocitação, que é um gráfico que relaciona os autores, mostrando a proximidade da pesquisa realizada por eles através de citações realizadas nas pesquisas. O resultado dessa análise é positivo se a rede de cocitação estiver coesa, com todos elementos conectados.

É avaliada também a produção científica anual, que é um gráfico que mostra quantas pesquisas foram realizadas na área pesquisada ao longo do tempo. O resultado desse gráfico é coerente quando se tem um crescimento positivo do número de pesquisas realizadas com o passar do tempo.

São avaliados por último os gráficos de histogram e wordcloud, que dão ideia das pesquisas mais importantes realizadas ao longo do tempo e das palavras-chave mais utilizadas, respectivamente.

Se a pesquisa não apresentar resultados coerentes, é realizada uma nova pesquisa com palavras-chave diferentes. Caso seja coerente, o próximo passo é fazer um refinamento das palavras-chave através do litsearchr, que é um pacote desenvolvido para R, que através do arquivo .bib obtido, fornece as palavras-chave mais impactantes dos dados.

3.2 *Ciclo Otimizado*

Com as palavras-chave otimizadas obtidas através do litsearchr, é feita uma nova busca no banco de dados acadêmico escolhido, no caso o Scopus, para obter um novo arquivo .bib, da mesma forma que foi obtido no primeiro ciclo.

Os gráfico de rede de cocitação, produção científica anual, wordcloud e histogramh são analisados novamente, para avaliar a coerência. Caso verificada a coerência do resultado, é realizada uma filtragem dos resultados através do revtools. O revtools é um pacote desenvolvido também para R que possibilita a realização da leitura do resumos das pesquisas e é possível manter a pesquisa caso ela seja útil ou excluir caso ela não sirva.

O resultado do revtools é um arquivo .csv contendo apenas os documentos que são úteis para a pesquisa. O arquivo então é convertido novamente para o formato .bib e então passado para o próximo ciclo.

3.3 *Ciclo de Impacto*

O arquivo .bib gerado no ciclo anterior é novamente aberto no Bibliometrix. Nessa etapa é avaliado o gráfico de author impact by total citation e levantados de três a cinco autores com maior impacto apresentados no gráfico.

3.4 *Ciclo de Produção*

Por último são coletados os artigos dos autores selecionados no banco de dados e é feita a leitura completa dos artigos.

É feito o upload dos artigos e leitura na plataforma Mendeley. Nesse aplicativo é possível compartilhar os artigos com grupos de estudo, fazer anotações e grifar trechos importantes.

A partir dos conhecimentos adquiridos é feito um mapa conceitual que relaciona os principais conceitos apresentados para servir de base para o desenvolvimento desse documento.

Estudo do Estado da Arte

Nessa pesquisa foram abordados diversos aspectos que envolvem o desenvolvimento de um projeto de criação de um UAV do tipo quadrotor. O desenvolvimento de uma plataforma desse tipo envolve desafios estruturais, autonomia, controle, localização, planejamento de trajetória, entre outros, que necessitam de estudo prévio detalhado para ser alcançado um bom resultado com o veículo.

4.1 *Quadrotores*

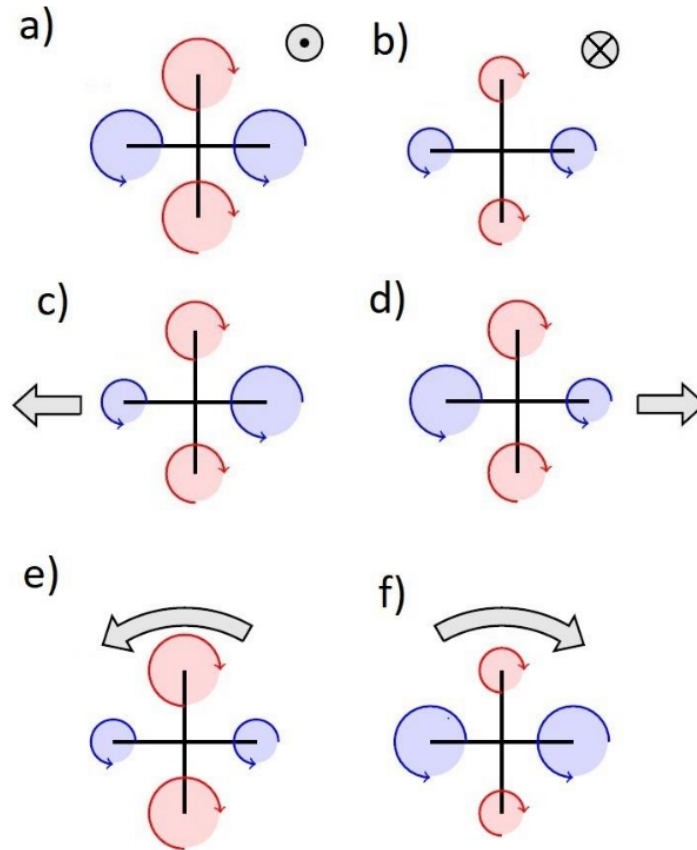
Quadrotores são aeronaves de asas rotativas, ou seja, são sustentadas e movimentadas por rotores. Diferente das aeronaves de asas fixas, como aviões, as aeronaves de asas rotativas não utilizam seu movimento horizontal para sustentar seu voo. Isso faz com que esse tipo de veículo apresente um consumo energético muito alto. Apesar disso, as aeronaves de asas rotativas possuem a habilidade de realizar pouso e decolagem vertical e também de realizar vôos estacionários ou quase estacionários.

As aeronaves de asas rotativas são classificadas como multirrotores, sendo classificadas quanto ao número de propulsores que elas possuem, podendo ser: quadrotores, hexarrotores, octarrotores, coaxiais ou helicópteros. Os quadrotores são veículos que apresentam alta manobrabilidade e alto payload, mas apresentam também alto gasto energético, tornando baixa o seu tempo de voo, sendo um desafio achar baterias mais eficientes que aumentem sua autonomia. A medida que aumenta-se o número de rotores, passando de quadrotores para hexarrotores e octarrotores, aumenta-se também o payload, que é o quanto a aeronave consegue carregar em relação ao seu peso, e a tolerância a falha, que é a habilidade continuar realizando um voo controlado mesmo com alguns rotores apresentando falhas de funcionamento. Entretanto, diminui-se também a manobrabilidade e aumenta-se o consumo energético.

Os movimentos do quadrotor são obtidos através da combinação das velocidades angulares dos rotores, como mostrado na Figura 4.1. Para balancear o contra-torque gerado por seus propulsores, é necessário que um par de rotores que estão em uma mesma haste esteja girando no sentido horário, enquanto o outro par de rotores esteja girando no sentido anti-horário. Para um quadrotor realizar movimentos verticais é necessário aumentar ou diminuir a velocidade dos quatro rotores simultaneamente. Para um quadrotor de translação horizontal, é necessário manter a velocidade de rotação de um par de rotores

igual, enquanto a velocidade de rotação do outro par de rotores no sentido do movimento é desbalanceada, fazendo com que o quadrotor se incline, no caso de um quadrotor em configuração em "+". Para realizar o movimento de rotação em torno do eixo vertical, conhecido como movimento de guinada, é necessário que a velocidade de um par de rotores seja superior a velocidade de rotação do outro par, fazendo com que o contra-torque resultante não seja nulo. (BOUABDALLAH, 2007)

Figura 4.1: Movimentos do Quadrotor



Fonte: (MONTEIRO, 2015), adaptada.

4.1.1 Classificações

Os quadrotores são classificados em categorias, possuindo cada uma delas características específicas, que podem ajudar no design do projeto e também na escolha de componentes que vão ajudar na operação da aeronave.

4.1.1.1 Classificação Quanto ao Peso

L. Brooke-Holland, Unmanned Aerial Vehicles (drones): An Introduction, House of

Em (BROOKE-HOLLAND, 2012), Os UAVs são classificados em categorias de acordo com o quanto eles pesam. UAVs que pesam até 200 gramas (g) são classificados como nano drones, de 200 g até 2 quilogramas (kg) são classificados como micro drones, de 2 kg até 20 kg são classificados como mini drones, de 20 kg até 150 kg, como small drones, de 150 kg até 600 kg, como tactical drones e de 600 kg em diante são classificados como MALE, HALE ou Strike drones. Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (ANAC, 2021), os drones que pesam mais que 150 kg são classificados como Classe 1, os drones de 25 kg até 150 kg são classificados como Classe 2 e os drone de até 25 kg são classificados como Classe 3, sendo dividida esa classe em drone de até 250 g e drone de 250 g até 25 kg. Cada classificação dessa possui regulamentação específica. Quadrotores mais leves são mais ágeis por serem menores e, consequentemente, terem inércias menores. Possuindo assim maiores acelerações angulares e lineares.

4.1.1.2 Classificação Quanto a Configuração

Os quadrotores tem duas configurações possíveis em relação à disposição de seus rotores. Os rotores podem ter a a configuração em forma de "+", em que a frente da aeronave fica alinhada com uma das hastes que suporta um par de rotores. Essa configuração também é conhecida como cruz. A outra configuração possível é a configuração em "x", em que a frente da aeronave fica a 45° do eixo que contém a haste da aeronave, ficando assim a frente da aeronave no meio de duas hastes, como mostrado na Figura 4.2, em que o eixo x está orientado positivamente para a frente da aeronave.

Figura 4.2: Configurações



Fonte: (Norouzi Ghazbi et al., 2016)

A configuração em "+" é mais acrobática, entretanto, como desvantagens, a haste dos

rotores bloqueia o campo de visão da câmera e também apresenta um momento de guinada ao transladar, necessitando de um maior gasto energético para estabilizar a aeronave.

A configuração em "x" não apresenta esse efeito, por ter os movimentos de arfagem e rolagem desacoplados do de guinada. Apresenta menor esforço para transladar pois todos rotores agem nesses movimentos, diferente da configuração em "+", em que apenas um par de rotores é responsável pelo deslocamento enquanto o outro se mantém com velocidades constantes. É mais estável, entretanto apresenta menor manobrabilidade. (Norouzi Ghazbi et al., 2016)

4.1.2 Principais Componentes

Os principais componentes envolvidos no desenvolvimento de um VANT do tipo quadrotor são os rotores que serão responsáveis por toda movimentação do drone, baterias que irão garantir a energia necessária para os rotores, sensores inerciais que irão ser responsáveis pela localização do drone e microcontroladores, responsáveis pela integração de hardware, software e pelo cálculo das ações de controle.

4.1.2.1 Sensores Inerciais

Os VANTs são geralmente equipados com uma IMU (Inertial Measurement Unit), que são dispositivos compostos por giroscópios, acelerômetros e magnetômetros. Os giroscópios são sensores capazes de medir a velocidade angular do veículo nos três eixos, os acelerômetros são responsáveis por calcular as acelerações lineares nos três eixos e o magnetômetro mede campos magnéticos também nos três eixos. Devido ao forte campo magnético existente no planeta Terra, é possível obter a orientação do robô através da obtenção da magnitude do campo magnético atuando no eixos da aeronave. Através da fusão sensorial é possível obter a atitude do robô e realizar odometria. Muitas vezes também são utilizados sensores do tipo barômetro, que são sensores capazes de medir a pressão atmosférica. Como a pressão atmosférica varia com a altitude, é possível mensurar a altura da aeronave em relação ao nível do mar com a utilização desse sensor.

4.1.2.2 Motores

Como a alimentação do quadrotor ser a base de baterias de corrente contínua é adequado que sejam utilizados motores que utilizem esse tipo de alimentação. Os motores DC são máquinas elétricas de corrente contínua (CC) que são constituídos por uma armadura ou

rotor, que é a parte giratória montada sobre o eixo da máquina, um estator de material ferromagnético envolvido pelo enrolamento de campo, um comutador com função de manter o torque gerado em um determinado sentido e de escovas, que são conectores fixos que permitem o deslizamento do comutador no eixo da armadura. Os motores DC possuem uma grande variabilidade de velocidade de operação, podendo operar acima e abaixo do valor nominal, possuem alta aceleração, podendo variar de velocidade rapidamente, inclusive mantendo o torque constante e não necessitam de conversores complexos. Como desvantagens, eles necessitam de manutenção constante para a troca de escovas, são mais caros e maiores do que motores CA com mesma potência e também possuem centelhamento.

O motor brushless DC (BLDC) é um motor de corrente contínua síncrono que é alimentado por corrente contínua (CC) e não possui escovas de contato elétrico. Ele é composto por ímãs permanentes, chamados de magnetos, que podem ser localizados no estator externo ou no centro no estator interno. A vantagem desse tipo de motor é que eles são altamente eficientes, pois possuem menos perdas por atrito, resultando em torques maiores. Essa eficiência é de grande valia para os quadrotores, pois um grande desafio associado a operação com esse tipo de veículo é a autonomia. A redução do atrito também faz com que a vida útil desse tipo de motor seja maior e que seja necessário ter menos manutenções, por não necessitar trocar as escovas. Sendo esse tipo de motor uma ótima opção de escolha para o desenvolvimento de um drone.

4.1.2.3 Baterias

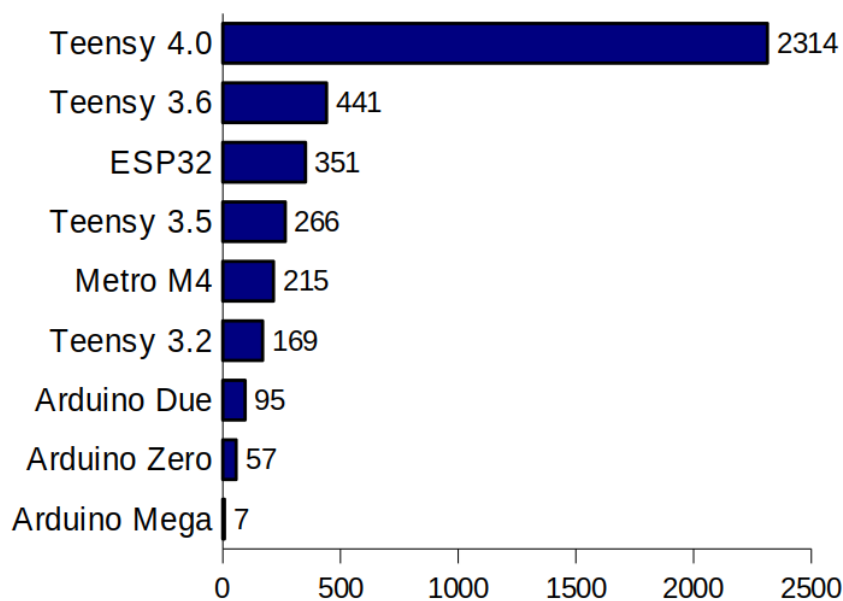
Um grande desafio a ser enfrentado no trabalho com veículos aéreos de asas rotativas é a autonomia. Graças ao grande gasto energético que essas aeronaves possuem para se sustentar no ar, o tempo de voo desses veículos acaba se tornando baixo.

As baterias mais amplamente utilizadas para UAVs são baterias polímero de lítio (LiPo). Esse tipo de bateria tem uma das melhores relações entre capacidade e peso, o que é de vital importância para esse tipo de veículo, já que o peso das baterias pode representar até 50% do peso da aeronave, como mostrado em (MULGAONKAR et al., 2014). As baterias LiPo possuem uma capacidade regular e um bom ciclo de vida. Em (ABDILLA; RICHARDS; BURROW, 2015), é feito um estudo do consumo de energia de multirrotores e uma modelagem para estimação da autonomia do veículo operando com baterias LiPo.

4.1.2.4 Microcontrolador

O microcontrolador é responsável por realizar a comunicação entre componentes e funcionalidades e a implementação do controlador que irá atuar nos propulsores. Existem diversos modelos no mercado, com diferentes frequências de operação ou clock, memória flash, RAM, EEPROM e tensão de alimentação. O clock determina quantas operações o microprocessador consegue fazer por unidade de tempo, quanto maior essa velocidade, menor é o tempo entre ações de controle, tornando o controle mais preciso. Entre as plataformas mais utilizadas estão o Arduino, a Raspberry, ARM, PIC, ESP32 e Teensy. A plataforma Arduino é baseada em chips ATmega, chegando a frequência máxima de 84 Mhz em seu modelo Arduino DUE, com SRAM de 96 kB e memória flash de 512 kB. A plataforma Raspberry Pi utiliza chips ARM, sendo seu modelo raspberry Pi 4 utilizando 4 núcleos ARM com 1.5 Ghz de clock. A plataforma Teensy é baseado em chips ARM, seu modelo teensy 4.0 apresenta um chip ARM Cortex-M7 de 600mHz. Como mostrado em um benchmark que são medidos o número de operações por segundo dos microcontroladores fazendo tarefas comuns, mostrado na Figura x, mas que não inclui a Raspberry Pi 4, o Teensy 4.0 aparece como muito superior a todas outras opções.

Figura 4.3: Benchmark dos Microcontroladores



Fonte: ([STOFFREGEN, 2019](#))

4.2 Funcionalidades

4.2.1 Modelagem

A modelagem de um quadrotor é uma das etapas mais importantes no desenvolvimento de um projeto envolvendo esse tipo de veículo. Por ser uma plataforma instável, se torna inviável realizar técnicas de identificação em malha aberta. Sendo assim, é necessário obter o modelo dinâmico da aeronave através de técnicas de modelagem.

A modelagem da aeronave pode ser obtida através das equações de Newton-Euler ou através do formalismo de Euler-Lagrange ([CASTILLO; LOZANO; DZUL, 2005](#)). Através dessa modelagem é possível obter o modelo de alto nível, onde os torques e forças são entradas e as saídas são posições angulares e lineares.

4.2.2 Controle

Os quadrotores são veículos subatuados, ou seja, possuem mais graus de liberdade do que atuadores, são naturalmente instáveis e apresentam comportamento não-linear. Devido a esses fatores, esse tipo de veículo necessita de uma estrutura de controle adequada bem ajustada para que seja possível a estabilização e o seguimento de referência.

Os controladores que atuam no quadrotor geralmente são utilizados em cascata ([NONAMI et al., 2010](#)), de forma que existe um controle de baixo nível para garantir uma velocidade de rotação desejada nos rotores, um controlador em um nível mais alto para controlar a altitude e as velocidade angulares de rolagem, arfagem e guinada e por último um controlador no nível mais alto controlando posições lineares no espaço tridimensional ([KENDOUL et al., 2007](#)), formando assim uma estrutura de controle hierárquica.

Os controlador mais comumente usado em baixo nível para controlar a velocidade de de rotação dos propulsores é o controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) já que os rotores são sistemas SISO (single-input single-output) que podem ser representado por dinâmicas de primeira ordem.

Os controladores que controlam atitude, altitude e posições lineares no quadrotor podem ser controladores lineares ou não-lineares. Para serem utilizados controladores lineares é necessário realizar uma linearização em um ponto de operação no modelo matemático do quadrotor, considerando pequenas variações de ângulo.

Os controladores lineares que são mais amplamente utilizados são os controladores PID,

LQR e H_∞ . Como alguns parâmetros do quadrotor podem apresentar incertezas ou até mesmo variar durante a operação, sendo possível adicionar robustez a esses controladores, podendo ajudar também na rejeição de perturbação.

O controlador PID é um controlador prático e de fácil implementação que pode ser usado sem o conhecimento da dinâmica do sistema ajustando os parâmetros empiricamente. A técnica foi uma das primeiras a ser utilizada e é constantemente utilizada como parâmetro de comparação para outras técnicas. Foi implementado com sucesso em trabalho como (BOUABDALLAH; MURRIERI; SIEGWART, 2004; HOFFMANN et al., 2007).

O Regulador Quadrático Linear (LQR) é um controlador de realimentação de estado que minimiza uma função custo que pondera o sinal de controle e o erro do segmento de referência. Foi implementado com sucesso em (BOUABDALLAH; MURRIERI; SIEGWART, 2004; WASLANDER et al., 2005).

O controlador H_∞ é um controlador por realimentação de estado que minimiza a norma H_∞ através da solução de desigualdades matriciais lineares. O quesito de robustez pode ser facilmente adicionado nessa técnica solucionando o problema de otimização para um politopo convexo. O controlador se mostra eficiente em lidar com perturbações. Em (RAFFO; ORTEGA; RUBIO, 2008), é utilizado um controlador H_∞ não linear robusto para estabilizar a orientação da aeronave enquanto a técnica de Backstepping é utilizada para controlar as posições se mostrando eficiente para controlar o sistema com a presença de perturbações e incertezas paramétricas. A ação integral também pode ser utilizada para aprimorar os resultados, como mostrado em (RAFFO; ORTEGA; RUBIO, 2010).

Os controladores não-lineares mais amplamente utilizados são backstepping, o sliding mode control (SMC) e o controlador Fuzzy.

A técnica de sliding mode control (SMC) é um método de controle não-linear baseado do critério de estabilidade de lyapunov, que atinge seu objetivo através da definição de uma superfície de deslizamento onde estarão as trajetórias do sistema que são atingidas através de funções de chaveamento. O SMC é uma técnica que une robustez com velocidade de convergência, o que permite a aeronave realizar missões de difíceis trajetórias, lidar com grandes variações de parâmetros e perturbações. A técnica SMC também permite construir um observador de estados, para aplicações em que a medição de determinados pode se encontrar ausente ou falhar por alguns instantes. Em (ZHAO et al., 2018) foi utilizada a um SMC adaptativo utilizando a técnica de backstepping em um quadrotor e comparados os resultados com o PID e com o SMC padrão em ambiente de simulação, mostrando que o SMC adaptativo apresenta melhores resultados.

A técnica Backstepping é uma técnica de controle não linear recursiva baseada também

no critério de Lyapunov, que obtêm um controlador que estabiliza a aeronave formalmente. Essa é uma técnica que se encaixa bem em uma arquitetura de controle em cascata cumprindo a função de controlador de atitude. A técnica se mostra eficiente para lidar com o controle da orientação da aeronave na presença de fortes perturbações. Em (BOU-ABDALLAH; SIEGWART, 2005) é feita uma comparação entre a técnica backstepping e a técnica SMC. Em (MADANI; BENALLEGUE, 2006) a técnica é utilizada para estabilizar todo o sistema.

O controlador Fuzzy é feito de tal forma que entradas e saídas são mapeadas através da definição de funções de pertencimento. Em (SANTOS; LOPEZ; MORATA, 2010), é aplicado um controlador Fuzzy em um quadrotor para controlar a orientação da aeronave e a altitude, enquanto as entradas era a potência designada para cada motor. A técnica Fuzzy pode ser combinada com outras técnicas de controle também. Em (NICOL; MACNAB; RAMIREZ-SERRANO, 2008) é utilizada uma técnica chamada Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC) que garante um aprendizado e adaptação rápida. O CMAC associa rede neural, com técnica fuzzy e controle adaptativo. A técnica se mostrou ser computacionalmente eficiente, mas sendo necessário ajustes para adicionar robustez. Em (GAUTAM; HA, 2013) é utilizado um self-tuning PID através de algoritmo Fuzzy. Foram obtidos resultados melhores do que um controlador PID segundo o critério de integral do erro quadrático.

4.2.3 Localização

A localização do quadrotor pode ser auxiliada por uso de diversos sensores como LiDAR, GPS, IMU, câmeras monoculares, sensores ultrassônicos e lasers.

A IMU pode ser utilizada para a funcionalidade de localização através da odometria. A IMU pode contar com giroscópio, acelerômetro, magnetômetro e até mesmo barômetro.

Os sensores que são mais amplamente utilizados atualmente são os sensores baseados em visão. É possível obter bons resultados apenas utilizando câmeras monoculares, como mostrado em (MUR-ARTAL; MONTIEL; TARDOS, 2015) utilizando o pacote ORB SLAM.

Os sensores GPS são amplamente utilizados para missões outdoor e os sensores ultrassônicos e baseados em laser são utilizados para auxiliar na medição da altitude.

Pode-se realizar a fusão sensorial de diversos sensores para se obter uma boa estimativa da localização da aeronave. A técnica mais amplamente utilizada é a de filtragem, como a do filtro estendido de kalman (EKF), porém ela sofre com o drift, que é um deslocamento

não considerado pela medição. Outra opção são frameworks de otimização não-linear, que apresentam resultados mais consistentes, porém apresentam custos computacionais superiores.

4.2.4 *Planejamento de Trajetória*

O planejamento de trajetória é fundamental para que o quadrotor se torne uma plataforma completamente autônoma. Através dessa funcionalidade o veículo pode calcular uma rota para se deslocar da sua posição atual até uma posição final sem a interferência humana, sendo de extrema importância para o objetivo final do projeto que é tornar o drone capaz de realizar um pouso autônomo em uma plataforma móvel.

Em (ROBERGE; TARBOUCHI; LABONTE, 2013) foi feito um estudo de comparação entre o planejamento de trajetória através do algoritmo genético (GA) e da otimização por enxame de partículas (PSO) em simulação. Ambas as técnicas apresentaram boas soluções em tempos computacionais relativamente curtos. Como conclusão foi observado que com significância estatística o GA apresenta melhores trajetórias ao PSO. Para comparar os resultados foi realizado o t-teste sobre a função custo.

Em (CHEN et al., 2016b) é feito o planejamento de trajetória através da técnica Artificial Potential Field (APF), que é vantajosa por ser implementada através de um algoritmo de estrutura simples, com uma descrição matemática consistente e conveniente para controle em tempo real, além de possuir uma grande portabilidade, podendo solucionar o problema de desvio de obstáculos mudando a fonte do campo potencial artificial. A técnica também pode ser utilizada para o planejamento de trajetória de voo em formações de múltiplos UAVs. Apesar das diversas vantagens, o APF na configuração padrão não resulta na trajetória ótima, sendo possível ser combinado com outras técnicas como o algoritmo genético ou algoritmos evolucionários para melhorar seus resultados. O APF é baseado na ideia de que o destino funciona como um campo potencial atrativo para o UAV, enquanto os obstáculos funcionam como campos potenciais repulsivos. Nessa pesquisa, o APF é reconstruído sobre a otimização com restrições introduzida com a força de controle adicional.

Em (CHEN et al., 2016a), é utilizado um algoritmo de otimização derivado do Central Force Optimization (CFO), chamado de Modified Central Force Optimization. O CFO é um algoritmo de otimização de partícula inteligente baseado na lei da gravidade, onde cada solução é uma partícula. As partículas se atraem com a força gravitacional virtual. As massas dessas partículas são dependentes da função custo de cada solução. Na metáfora do CFO, quando uma massa está sob forte influência de uma massa, ela fica presa em seu campo gravitacional, o que é análogo a localizar um valor máximo para uma

função objetivo. No MCFO são adicionados conceitos da otimização por Enxame de partículas (PSO) além do operador de mutação do algoritmo genético (GA) para melhorar os resultados do CFO. Os resultados da pesquisa mostraram resultados em simulação superiores aos das técnicas com o algoritmo CFO, GA, PSO e de buscas aleatórias.

Em (MUELLER; HEHN; ANDREA, 2015), é apresentado um método computacionalmente eficiente que calcula trajetórias com funções de posição polinomiais três vezes diferenciáveis, considerando as restrições de velocidade e aceleração do veículo. O algoritmo foi testado com a captura de uma bola arremessada.

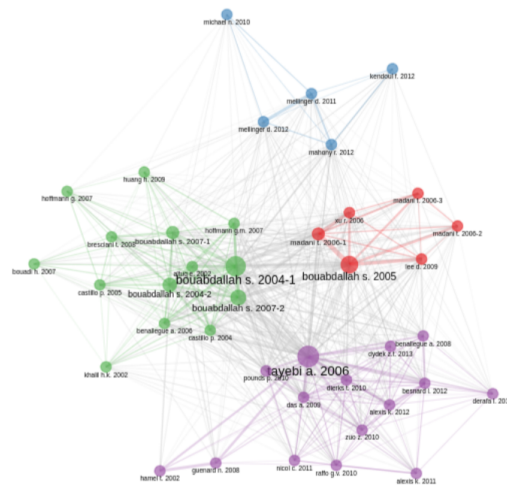
4.3 Revisão Bibliográfica

Os resultados obtidos através do método BILI apresentam a rede de cocitação e os principais autores envolvidos nas pesquisas desenvolvidas no assunto abordado.

4.3.1 Rede de Cocitação

A rede de cocitação obtida mostram uma coesão. As linhas mais fortes indicam uma proximidade maior entre as pesquisas ligadas.

Figura 4.4: Rede de Cocitação

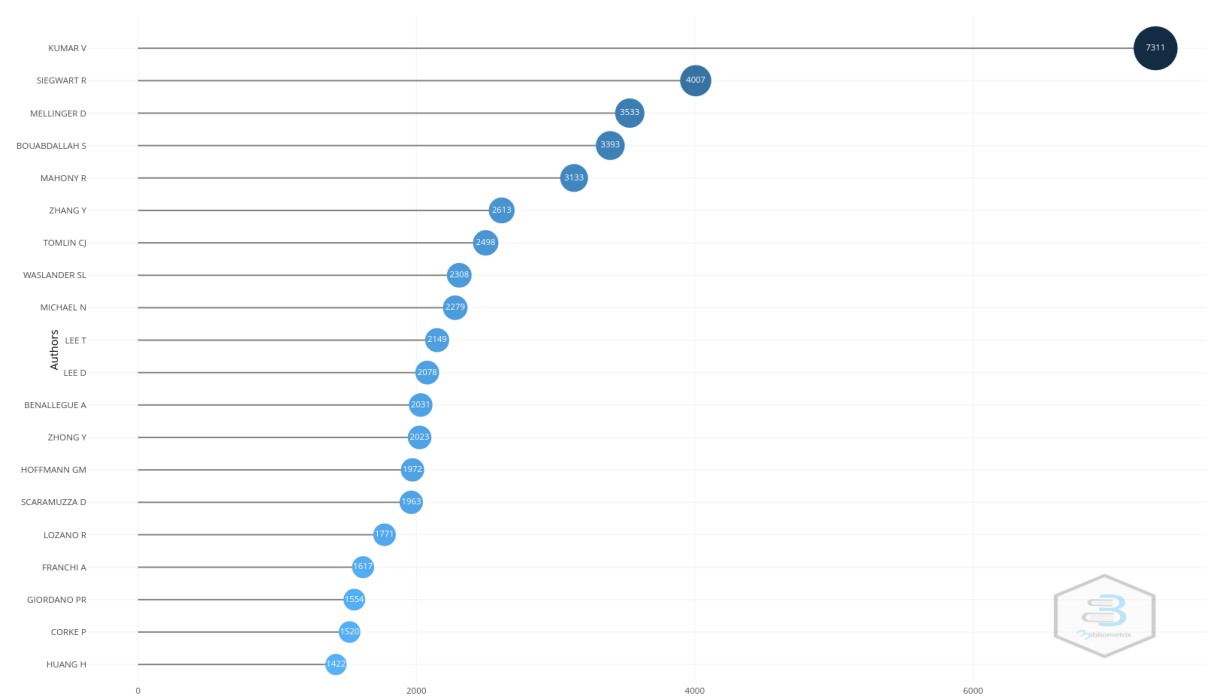


Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Principais Autores

Os principais autores envolvidos nas pesquisas com tema quadrotor são Kumar V., Siegwart R., Mellinger D., Bouabdallah S. e Mahony R. Bouabdallah junto com Siegwart foram um dos precursores no desenvolvimento de pesquisas sobre o design de quadrotores e controladores. Mellinger traz pesquisas na área de exploração e de planejamento de trajetória. Mahony traz pesquisas na área de pouso autônomo e Kumar diversas pesquisas com técnicas diferentes de planejamento de trajetória.

Figura 4.5: Gráfico de Total Citation



Fonte: Autoria própria.

Conclusão

Nesse documento foi feito o estudo do estado da arte de veículos aéreos não tripulados do tipo quadrotor através do método BiLi. Primeiramente foi feito um estudo do ambiente de desenvolvimento que os quadrotores se encontram, com seu ambiente de aplicação, estado do desenvolvimento e mercado de atuação. O método BiLi foi importante para trazer os autores mais impactantes e áreas mais pesquisadas sobre o tema, sendo feitas outras buscas no Scopus mais direcionadas para cada tema para complementar o acervo bibliográfico. Foi feito um estudo das possíveis configurações de quadrotores e suas classificações. Foi feito um estudo dos principais componentes e opções disponíveis no mercado para integrar essa plataforma. E por último o estudo das principais funcionalidades envolvidas nos projetos de quadrotor, como localização, controle, planejamento de trajetória e energia.

5.1 Considerações finais

A pesquisa trouxe conhecimento significativo para a tomada de decisão em relação a escolha entre os designs possíveis para o desenvolvimento de uma plataforma do tipo quadrotor se mostrando a configuração em "x" que traz mais benefícios. A escolha de estratégias de controle não lineares robustas, como o SMC, se mostraram melhores para lidar com o seguimento de referência para situações com perturbações, incertezas paramétricas e erros de modelagem. As técnicas de planejamento de trajetória que se mostram mais eficientes são as que possuem menores custos computacionais.

Referências

- ABDILLA, A.; RICHARDS, A.; BURROW, S. Power and endurance modelling of battery-powered rotorcraft. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, v. 2015-Decem, p. 675–680, 2015. ISSN 21530866. Citado 2 vezes nas páginas 2.2 and 4.1.2.3.
- ANAC. *Classes de Drones (RPA) — Português (Brasil)*. 2021. <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/classes-de-drones>>. (Accessed on 12/14/2021). Citado na página 4.1.1.1.
- BOUABDALLAH, S.; MURRIERI, P.; SIEGWART, R. Design and control of an indoor micro quadrotor. In: IEEE. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*. [S.l.], 2004. v. 5, p. 4393–4398. Citado na página 4.2.2.
- BOUABDALLAH, S.; SIEGWART, R. Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor. In: IEEE. *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*. [S.l.], 2005. p. 2247–2252. Citado na página 4.2.2.
- BOUABDALLAH, S. P. T. design and control of quadrotors with application to autonomous flying Samir BOUABDALLAH THÈSE N O 3727 (2007). v. 3727, 2007. ISSN 0921-0296. Disponível em: <https://infoscience.epfl.ch/record/95939/files/EPFL_{_}TH3727.> Citado na página 4.1.
- BROOKE-HOLLAND, L. Unmanned aerial vehicles (drones): an introduction. *House of Commons Library: London, UK*, 2012. Citado na página 4.1.1.1.
- CASTILLO, P.; LOZANO, R.; DZUL, A. E. Modelling and control of mini-helicopters. *Modelling and Control of Mini-Flying Machines*, Springer, p. 81–119, 2005. Citado na página 4.2.1.
- CHEN, Y. et al. Modified central force optimization (mcfo) algorithm for 3d uav path planning. *Neurocomputing*, Elsevier, v. 171, p. 878–888, 2016. Citado na página 4.2.4.
- CHEN, Y.-b. et al. Uav path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory. *International Journal of Systems Science*, Taylor & Francis, v. 47, n. 6, p. 1407–1420, 2016. Citado na página 4.2.4.
- FALANGA, D. et al. Vision-based autonomous quadrotor landing on a moving platform. *SSRR 2017 - 15th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, Conference*, p. 200–207, 2017. Citado na página 2.2.
- GAUTAM, D.; HA, C. Control of a quadrotor using a smart self-tuning fuzzy pid controller. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 10, n. 11, p. 380, 2013. Citado na página 4.2.2.
- HERISSÉ, B. et al. Landing a VTOL unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 28, n. 1, p. 77–89, 2012. ISSN 15523098. Citado na página 2.2.

- HOFFMANN, G. M. et al. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. *Collection of Technical Papers - AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference 2007*, v. 2, n. August, p. 1670–1689, 2007. Citado na página 4.2.2.
- JIN, S. et al. On-board vision autonomous landing techniques for quadrotor: A survey. *Chinese Control Conference, CCC*, v. 2016-Augus, p. 10284–10289, 2016. ISSN 21612927. Citado na página 2.2.
- KENDOUL, F. et al. Real-time nonlinear embedded control for an autonomous quadrotor helicopter. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, v. 30, n. 4, p. 1049–1061, 2007. ISSN 15333884. Citado na página 4.2.2.
- KIM, J. W. et al. Landing Control on a Mobile Platform for Multi-copters using an Omnidirectional Image Sensor. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, Journal of Intelligent & Robotic Systems, v. 84, n. 1-4, p. 529–541, 2016. ISSN 15730409. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10846-016-0339-y>>. Citado na página 2.2.
- LIM, J. et al. Hemispherical InfraRed(IR) marker for reliable detection for autonomous landing on a moving ground vehicle from various altitude angles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 4435, n. c, p. 21–28, 2021. ISSN 1941014X. Citado na página 2.2.
- LING, K. et al. Autonomous maritime landings for low-cost VTOL aerial vehicles. *Proceedings - Conference on Computer and Robot Vision, CRV 2014*, p. 32–39, 2014. Citado na página 2.2.
- MADANI, T.; BENALLEGUE, A. Backstepping control for a quadrotor helicopter. In: IEEE. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. [S.l.], 2006. p. 3255–3260. Citado na página 4.2.2.
- MONTEIRO, J. C. E. *MODELAGEM E CONTROLE DE UM VEÍCULO QUADRIRROTOR*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015. Citado na página 4.1.
- MUELLER, M. W.; HEHN, M.; ANDREA, R. D. for Quadrocopter Trajectory Generation. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 31, n. 6, p. 1294–1310, 2015. Citado na página 4.2.4.
- MULGAONKAR, Y. et al. Power and weight considerations in small, agile quadrotors. *Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VI*, v. 9083, p. 90831Q, 2014. ISSN 1996756X. Citado 2 vezes nas páginas 2.2 and 4.1.2.3.
- MUR-ARTAL, R.; MONTIEL, J. M. M.; TARDOS, J. D. Orb-slam: a versatile and accurate monocular slam system. *IEEE transactions on robotics*, IEEE, v. 31, n. 5, p. 1147–1163, 2015. Citado na página 4.2.3.
- NICOL, C.; MACNAB, C.; RAMIREZ-SERRANO, A. Robust neural network control of a quadrotor helicopter. In: IEEE. *2008 Canadian conference on electrical and computer engineering*. [S.l.], 2008. p. 001233–001238. Citado na página 4.2.2.
- NONAMI, K. et al. *Autonomous flying robots: Unmanned aerial vehicles and micro aerial vehicles*. [S.l.: s.n.], 2010. 1–329 p. ISBN 9784431538554. Citado na página 4.2.2.
- Norouzi Ghazbi, S. et al. Quadrotors unmanned aerial vehicles: A review. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, v. 9, n. 1, p. 309–333, 2016. ISSN 11785608. Citado 2 vezes nas páginas 4.2 and 4.1.1.2.

RAFFO, G. V.; ORTEGA, M. G.; RUBIO, F. R. Backstepping/nonlinear h-infinity control for path tracking of a quadrotor unmanned aerial vehicle. In: IEEE. *2008 American Control Conference*. [S.l.], 2008. p. 3356–3361. Citado na página 4.2.2.

RAFFO, G. V.; ORTEGA, M. G.; RUBIO, F. R. An integral predictive/nonlinear H-infinity control structure for a quadrotor helicopter. *Automatica*, Elsevier Ltd, v. 46, n. 1, p. 29–39, 2010. ISSN 00051098. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2009.10.018>. Citado na página 4.2.2.

ROBERGE, V.; TARBOUCHI, M.; LABONTE, G. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 9, n. 1, p. 132–141, 2013. ISSN 15513203. Citado na página 4.2.4.

SANTOS, M.; LOPEZ, V.; MORATA, F. Intelligent fuzzy controller of a quadrotor. In: IEEE. *2010 IEEE international conference on intelligent systems and knowledge engineering*. [S.l.], 2010. p. 141–146. Citado na página 4.2.2.

SERRA, P. et al. Landing on a moving target using image-based visual servo control. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, v. 2015-Febru, n. February, p. 2179–2184, 2014. ISSN 07431546. Citado na página 2.2.

SERRA, P. et al. Landing of a quadrotor on a moving target using dynamic image-based visual servo control. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 32, n. 6, p. 1524–1535, 2016. ISSN 15523098. Citado na página 2.2.

SIERRA, G. et al. Battery health management for small-size rotary-wing electric unmanned aerial vehicles: An efficient approach for constrained computing platforms. *Reliability Engineering and System Safety*, Elsevier Ltd, v. 182, p. 166–178, 2019. ISSN 09518320. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.04.030>. Citado na página 2.2.

SIMON, L. et al. Studies on autonomous landing of an unmanned aerial vehicle on a vessel. *AIAA Information Systems-AIAA Infotech at Aerospace*, 2018, n. 209989, p. 1–18, 2018. Citado na página 2.2.

STOFFREGEN. *Classes de Drones (RPA) — Português (Brasil)*. 2019. <https://github.com/PaulStoffregen/CoreMark>. (Accessed on 12/14/2021). Citado na página 4.3.

WASLANDER, S. L. et al. Multi-agent quadrotor testbed control design: Integral sliding mode vs. reinforcement learning. In: IEEE. *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. [S.l.], 2005. p. 3712–3717. Citado na página 4.2.2.

WIKIPEDIA. *Classes de Drones (RPA) — Português (Brasil)*. 2021. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/Package_copter_microdrones_dhl.jpgs. (Accessed on 12/14/2021). Citado na página 2.1.

ZHAO, B. et al. Vision-Based Tracking Control of Quadrotor with Backstepping Sliding Mode Control. *IEEE Access*, IEEE, v. 6, p. 72439–72448, 2018. ISSN 21693536. Citado na página 4.2.2.

Estudo do Estado da Arte:
Quadrotores

Mateus Zarth Seixas

Salvador, Novembro de 2021.