

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

---

Escreva aqui 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.

**Palavras-chave:** Palavra-chave 1, Palavra-chave 2, Palavra-chave 3, Palavra-chave 4, Palavra-chave 5

---

## 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

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	1
1.2	Justificativa . . . . .	1
1.3	Organização do documento . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>3</b>
2.1	Ciclo Ingênuo . . . . .	4
2.2	Ciclo Otimizado . . . . .	4
2.3	Ciclo de Impacto . . . . .	5
2.4	Ciclo de Produção . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Estudo do Estado da Arte</b>	<b>6</b>
3.1	Quadrotores . . . . .	6
3.1.1	Classificações . . . . .	6
3.1.1.1	Classificação Quanto ao Peso . . . . .	7
3.1.1.2	Classificação Quanto a Configuração . . . . .	7
3.1.1.3	Ambiente de Operação . . . . .	7
3.1.2	Principais Componentes . . . . .	8
3.1.2.1	IMU . . . . .	8
3.1.2.2	Rotores . . . . .	8
3.1.2.3	Baterias . . . . .	8
3.1.2.4	Microprocessador . . . . .	8
3.2	Revisão Bibliográfica . . . . .	8
3.2.1	Autores . . . . .	8
3.2.2	Artigos . . . . .	8
3.3	Ambiente de Aplicação . . . . .	8
3.4	Funcionalidades . . . . .	9
3.4.1	Modelagem . . . . .	9
3.4.2	Controle . . . . .	9
3.4.3	Localização . . . . .	10
3.4.4	Planejamento de Trajetória . . . . .	10
3.5	Mapa Conceitual . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>12</b>
4.1	Testes unitários . . . . .	12
4.2	Integração do sistema . . . . .	12
4.3	Testes integrados . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>14</b>
5.1	Considerações finais . . . . .	14
<b>A</b>	<b>Diagramas mecânicos</b>	<b>15</b>
<b>B</b>	<b>Diagramas eletro-eletrônicos</b>	<b>16</b>
	<b>Referências</b>	<b>17</b>

---

## Lista de Figuras

---

2.1	Método BILI . . . . .	3
-----	-----------------------	---

---

## 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.

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 objetivo de trazer conhecimento das melhores técnicas que vem sendo utilizadas em áreas como navegação, controle e localização e mapeamento simultâneos (SLAM), assim como os melhores modelos e arquiteturas para conceber um veículo eficiente.

### **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 voo, localização e controle.

### **1.3    *Organização do documento***

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



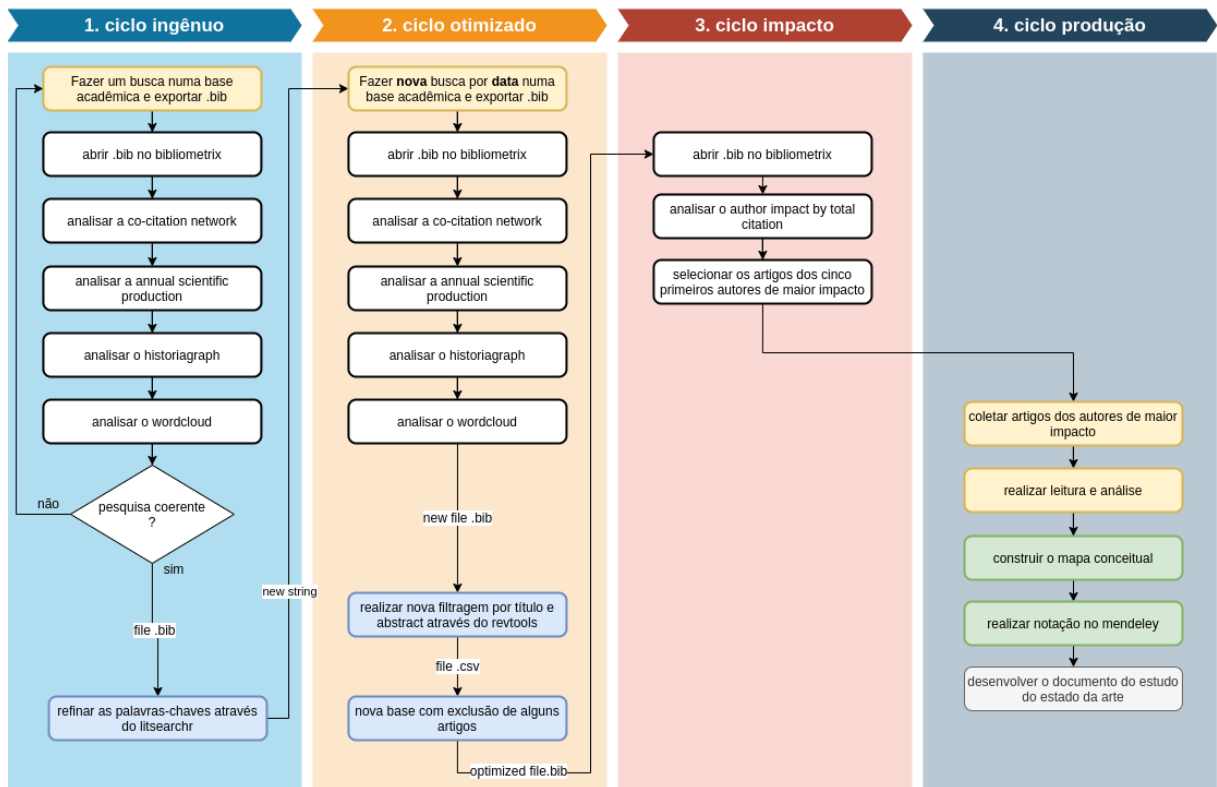
- **Capítulo 1 - Introdução:** Contextualiza o âmbito, no qual a pesquisa proposta está inserida. Apresenta, portanto, a definição do problema, objetivos e justificativas da pesquisa e como este está estruturado;
- **Capítulo ?? - Fundamentação Teórica:** XXX;
- **Capítulo 3 - Materiais e Métodos:** XXX;
- **Capítulo 4 - Resultados:** XXX;
- **Capítulo 5 - Conclusão:** Apresenta as conclusões, contribuições e algumas sugestões de atividades de pesquisa a serem desenvolvidas no futuro.

## 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 encontradas já no mercado.

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

Figura 2.1: Método BILI



Fonte: Autoria própria.

## 2.1 *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 idéia das pesquisas mais importantes realizadas ao longo do tempo e das palavras chaves 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.

## 2.2 *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 histogram 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 onde é possível realizar a 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.

## **2.3 *Ciclo de Impacto***

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

## **2.4 *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 e também 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 a concepção de um projeto envolvendo um UAV do tipo quadrotor. O desenvolvimento de uma plataforma desse tipo ainda envolve desafios estruturais, autonomia, controle, localização entre outros, que necessitam de estudo prévio detalhado para ser alcançado um bom resultado com o veículo.

### **3.1 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 maior. Apesar disso, as aeronaves de asas rotativas possuem a habilidade de realizar pouso e decolagem vertical, além de poder realizar vôos estacionários.

As aeronaves de asas rotativas são classificadas como multirotores, sendo seus tipos mais importantes quadrotores, hexarotores, octarotores, 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. À medida que aumenta-se o número de rotores, passando de quadrotores para hexarotores e octarotores, 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 continuar realizando um voo controlado mesmo com algumas das hélices apresentando falhas de funcionamento. Entretanto, diminui-se também a manobrabilidade e aumenta-se o consumo energético.

#### **3.1.1 Classificações**

Os quadrotores são classificados em diversas 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.

### 3.1.1.1 *Classificação Quanto ao Peso*

Os UAVs são classificados em diversas categorias de acordo com o quanto eles pesam. UAVs que pesam até 2 quilogramas (kg) são classificados como micro, de 2 kg até 7 kg são classificados como mini, de 7 kg até 25 kg são classificados como pequenos, de 25 kg até 150 kg, como médios e de 150 kg em diante são classificados como grandes. Quadrotores mais leves são mais ágeis por serem menores e por isso terem inércias menores. Possuindo assim maiores. acelerações angulares

### 3.1.1.2 *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.

A configuração em "+" é mais acrobática, entretando, como desvantagens, a haste dos rotores bloqueia o campo de visão da câmera e também apresenta um momento de guinada ao translacionar, 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, entretando apresenta menor manobrabilidade.

### 3.1.1.3 *Ambiente de Operação*

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

### *3.1.2 Principais Componentes*

#### *3.1.2.1 IMU*

#### *3.1.2.2 Rotores*

#### *3.1.2.3 Baterias*

#### *3.1.2.4 Microprocessador*

## **3.2 Revisão Bibliográfica**

### *3.2.1 Autores*

### *3.2.2 Artigos*

## **3.3 Ambiente de Aplicação**

O uso do veículos aéreos não tripulados do tipo quadrotor tem se expandido em diversas áreas, tanto civil, quanto militar e também acadêmica.

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, por se deslocar no espaço tridimensional.

Os quadrotores por não necessitarem de um piloto embarcado, poderem ser pequenos e ágeis podem ser utilizados em missões de busca e resgate em ambientes hostis, como casos de desmoronamento ou soterramento, e também em missões de espionagem e vigilância, por chamarem pouca atenção.

Tem-se crescido muito o uso de aeronaves do tipo quadrotor na área de agricultura de precisão. Os drones podem ser utilizados para monitorar uma lavoura, mapear, distribuir uso de defensivos, semear e até mesmo irrigar.

Outra área de grande utilização é a de entretenimento. Existem muitos drones são

comercializados com finalidade exclusivamente lúdica, podendo ser equipados com câmeras para produzir fotografias e vídeos. São utilizados também na cinematografia para realizar essas filmagens aéreas, que antes eram feitas por helicópteros tripulados que tinham custo associados muito maiores.

### **3.4 Funcionalidades**

#### **3.4.1 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 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.

#### **3.4.2 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, 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 velocidades angulares de rotação, arfagem e rolagem e por último um controlador no nível mais alto controlando posições lineares no espaço tridimensional. (Kendoul)

Controlador hierárquico, estabilidade global

Os controlador mais comumente usado em baixo nível para controlar a velocidade de rotação dos propulsores é o PID.



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 do modelo matemático do quadrotor, considerando pequenas variações de ângulo. Os controladores lineares que são mais amplamente utilizados são os controladores PID, LQR, H2,  $H_\infty$  e controle adaptativo. Como alguns parâmetros do quadrotor podem apresentar incertezas ou até mesmo variar durante a operação, também é possível adicionar robustez a esses controladores, podendo ajudar também na rejeição de perturbação.

Os controladores não-lineares mais amplamente utilizados são os controladores por inversão de modelo, o sliding mode control (SMC) e o controlador Fuzzy.

### 3.4.3 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 ... 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 é o ? framework de otimização não-linear, que apresenta resultados mais consistentes, porém apresenta um custo computacional superior.

### 3.4.4 Planejamento de Trajetória

Existem diversos algoritmos que podem ser utilizados para realizar o planejamento de trajetória do quadrotor.

- Artificial potential field
- probabilistic roadmap
- belief roadmap
- potential fields (PF)
- Heuristic search algorithms
- Optimization methods
- planning under uncertainties
- reactive and bio-inspired obstacle avoidance methods

### **3.5    *Mapa Conceitual***

---

## Resultados

---

Importante sempre ter um parágrafo introdutório para explicar os resultados encontrados.

### **4.1 Testes unitários**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

### **4.2 Integração do sistema**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

### 4.3 *Testes integrados*

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

---

## Conclusão

---

Chegou a hora de apresentar o apanhado geral sobre o trabalho de pesquisa feito, no qual são sintetizadas uma série de reflexões sobre a metodologia usada, sobre os achados e resultados obtidos, sobre a confirmação ou rechaço da hipótese estabelecida e sobre outros aspectos da pesquisa que são importantes para validar o trabalho. Recomenda-se não citar outros autores, pois a conclusão é do pesquisador. Porém, caso necessário, convém citá-lo(s) nesta parte e não na seção seguinte chamada **Conclusões**.

### **5.1 Considerações finais**

Brevemente comentada no texto acima, nesta seção o pesquisador (i.e. autor principal do trabalho científico) deve apresentar sua opinião com respeito à pesquisa e suas implicações. Descrever os impactos (i.e. tecnológicos, sociais, econômicos, culturais, ambientais, políticos, etc.) que a pesquisa causa. Não se recomenda citar outros autores.

---

## Diagramas mecânicos

---

---

## Diagramas eletro-eletrônicos

---

---

## Referências

---



*Estudo do Estado da Arte:*  
*Quadrotores*

Mateus Zarth Seixas

Salvador, Novembro de 2021.