

Lucas José de Souza Batista

**Sistema de Planejamento de Trajetória para  
Veículo Aéreo Não Tripulado em Ambiente  
Desconhecido**

Manaus - AM

2023

Lucas José de Souza Batista

## **Sistema de Planejamento de Trajetória para Veículo Aéreo Não Tripulado em Ambiente Desconhecido**

Projeto de Pesquisa desenvolvido durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Universidade do Estado do Amazonas – UEA

Escola Superior de Tecnologia – EST

Curso de Engenharia de Controle e Automação

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Farias Araújo

Manaus - AM

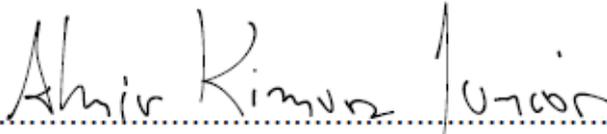
2023

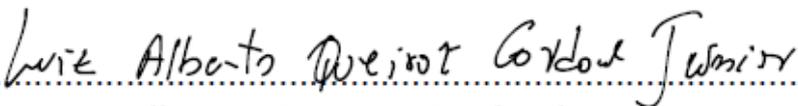
Lucas José de Souza Batista

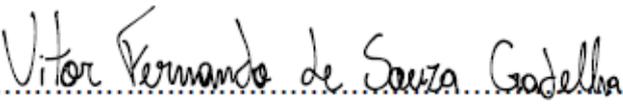
## **Sistema de Planejamento de Trajetória para Veículo Aéreo Não Tripulado em Ambiente Desconhecido**

Projeto de Pesquisa desenvolvido durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Trabalho aprovado. Manaus - AM, 10/03/2023:

  
.....  
**Almir Kimura Junior**

  
.....  
**Luiz Alberto Queiroz Cordovil Junior**

  
.....  
**Vitor Fernando de Souza Gadelha**  
.....

Manaus - AM  
2023

# Agradecimentos

Meus agradecimentos



# Resumo

[VERSÃO ANTIGA] Esta pesquisa apresenta como tema central o estudo sobre planejamento de trajetória para um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) e tem como objetivo geral gerar uma trajetória executável em ambiente desconhecido. A partir de um levantamento bibliográfico foi observado que existem diversas técnicas utilizáveis. Quanto a metodologia foi proposto adaptar um VANT comercial a fim de que ele calcule sua trajetória de forma autônoma, para isto um microcontrolador Raspberry Pi 4 será embarcado ao sistema. Os sensores utilizados são o GPS para localização e o LIDAR para detecção de obstáculos. Por fim o algoritmo de geração de caminho utilizado é o RRT. Os resultados que corroboram a hipótese desta pesquisa serão obtidos através de testes em ambiente controlado.

**Palavras-Chave:** Veículos aéreos não tripulados, planejamento de caminho, geração de trajetórias.

# Abstract

Abstract

**Keywords:** System Identification, Glow Motor, Estimation of Time Variant Systems, ARX Models.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – VANT de asas fixas. . . . .	13
Figura 2 – VANT de asas rotativas. . . . .	14
Figura 3 – VANT com quatro rotores. . . . .	14
Figura 4 – VANT com asas fixas e rotativas. . . . .	15
Figura 5 – Kit F450 com: frame, placa central e PCB de distribuição de energia. . . . .	16
Figura 6 – Sistema de aviônica básica para piloto automático. . . . .	17
Figura 7 – Controlador de Voo Pixhawk. . . . .	17
Figura 8 – Exemplo da bateria LiPo e seus principais parâmetros. . . . .	19
Figura 9 – Sensor RPLidar A1. . . . .	20
Figura 10 – Software de demonstração dos dados do sensor RPLidar A1. . . . .	21
Figura 11 – Sensor GPS Ublox M8N. . . . .	22
Figura 12 – Raspberry Pi 4 Model B. . . . .	24
Figura 13 – GPIOs. . . . .	25
Figura 14 – Tela inicial do programa Mission Planner. . . . .	27
Figura 15 – Regulador de tensão UBEC. . . . .	28
Figura 16 – Diagrama de alimentação elétrica geral. . . . .	28
Figura 17 – Placa de distribuição de energia. . . . .	29
Figura 18 – Experimento de conexão entre Raspberry Pi e Pixhawk. . . . .	29
Figura 19 – Linha de comandos do Raspberry Pi acessada via SSH. . . . .	30
Figura 20 – Pixhawk e as entradas de cada componente do sistema. . . . .	31
Figura 21 – Pinos de conexão do sensor LIDAR TF-Luna. . . . .	31
Figura 22 – Pinos de conexão Pixhawk para os motores e rádio controlador. . . . .	32
Figura 23 – Configuração escolhida para o F450. . . . .	33
Figura 24 – Diagrama de conexão para o receptor do rádio controlador. . . . .	34
Figura 25 – Componentes soldados a placa de distribuição de energia. . . . .	35
Figura 26 – Braço do VANT com motor e ESC fixados. . . . .	35
Figura 27 – Visão de cima dos componentes do VANT montados. . . . .	36
Figura 28 – Conectores do motor com defeito. . . . .	36

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>11</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>12</b>
1.2.1	Geral	12
1.2.2	Específicos	12
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da Monografia</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Veículo Aéreo Não Tripulado</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Plataforma de Ensaio - Modelo F450</b>	<b>15</b>
2.2.1	Controlador de voo	15
2.2.2	Motores e ESC (Controlador de Velocidade Elétrico - do inglês <i>Electrical Speed Controller</i> )	18
2.2.3	Bateria	18
<b>2.3</b>	<b>Sensores do Modelo F450</b>	<b>19</b>
2.3.1	LIDAR	19
2.3.2	GPS	21
<b>2.4</b>	<b>Algoritmo de geração de caminho e trajetória</b>	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Raspberry Pi</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Aquisição do VANT F450</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Primeira conexão com o Pixhawk</b>	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Alimentação elétrica</b>	<b>27</b>
<b>3.4</b>	<b>Interface Raspberry Pi e Pixhawk</b>	<b>28</b>
<b>3.5</b>	<b>Conexões eletrônicas ao Pixhawk</b>	<b>30</b>
<b>3.6</b>	<b>Montagem do VANT</b>	<b>32</b>
<b>3.7</b>	<b>Calibração</b>	<b>34</b>
<b>3.8</b>	<b>Programação</b>	<b>37</b>
<b>3.9</b>	<b>Testes</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>39</b>

<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>40</b>
--------------------------	-----------

# 1 Introdução

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) são um classe específica dos veículos autônomos, e portanto necessitam navegar pelo ambiente sem colidir com obstáculos, seguir um caminho ótimo e o mais curto possível.

Atualmente, existem diversas abordagens e técnicas utilizadas para o planejamento de trajetória de VANTs. Este problema, porém, não possui uma solução fechada e, sendo assim, encontra-se na literatura diversas aplicações que utilizam uma determinada técnica e avaliam parâmetros como (AQUI) . O principal objetivo é encontrar uma técnica que consiga gerar uma trajetória ótima utilizando a menor capacidade computacional e no menor tempo possível.

Para se locomover no espaço é relevante considerar o ambiente, visto que o nível de autonomia cresce conforme o VANT se torna capaz de navegar sem colidir e sem a interação de um piloto. O nível de autonomia é considerado desde sistemas remotamente guiados até sistemas completamente autônomos. O maior desafio para desenvolver tais sistemas é atingir vários critérios, como:

- Comprimento do percurso: é definido como a distância total percorrida pelos UAVs, desde o ponto de partida até o ponto final do alvo.
- Otimalidade: estabelece que o sistema deve ser eficiente em termos de tempo, custo e energia. Pode ser definida de três maneiras: ótima, subótima e não ótima.
- Completude: é definida como o critério utilizado no planejamento de trajetórias para encontrar um caminho, caso ele exista. Ela proporciona uma plataforma para os UAVs e oferece uma solução caso a técnica de planejamento de trajetórias seja capaz de buscar um caminho ótimo.
- Eficiência de custo: depende do custo total de computação da comunicação em rede dos UAVs. Isso inclui vários fatores, tais como o custo entre dois nós, custo de combustível, custo de recarga de bateria, custo de espaço de memória, custo de software e hardware dos UAVs.
- Eficiência de tempo: significa que os UAVs percorrem a operação do alvo, desde o ponto inicial até o ponto de destino, enfrentando obstáculos no menor tempo possível. Isso só é possível se os UAVs utilizarem uma trajetória ótima e mais curta para concluir a operação do alvo.

- Eficiência energética: é definida como o consumo mínimo de energia pelos UAVs, em termos de combustível, energia da bateria e energia utilizada para suavizar a trajetória durante as operações do alvo.
- Robustez: é definida de forma que os UAVs possuam a capacidade de tolerar erros de dispositivos sensíveis à posição, erros de direção rotacional e erros de direção linear durante o planejamento de trajetórias.
- Evitar colisões: é definido como o mecanismo pelo qual os UAVs possuem a capacidade de detectar colisões, a fim de evitar danos físicos aos UAVs.

Dentro das aplicações encontradas é importante ressaltar que configurações diferentes de hardware dos VANTs influenciam variáveis, como o tempo de cálculo da trajetória, bem como o tempo de sua execução. Sendo assim, a escolha do algoritmo gerador de trajetória é tão importante quanto a escolha de componentes eletrônicos, como sensores, atuadores, motores, bateria, computador de bordo, etc.

## 1.1 Trabalhos Relacionados

Esta seção visa apresentar alguns trabalhos relacionados a aplicações de diferentes abordagens para solucionar o problema de planejamento de trajetória para VANTs.

([BENHADHRIA et al., 2021](#)) apresentam uma arquitetura que inclui o microcontrolador Raspberry Pi 3B+ no VANT, e comentam sobre a vantagem deste ser mais leve e utilizar menos energia quando comparado às plataformas FPGA (Arranjo de Porta Programável em Campo - do inglês *Field-Programmable Gate Array*), DSP (Processador Digital de Sinais - do inglês *Digital Signal Processor*) e GPU (Unidade de Processamento Gráfico - do inglês *Graphics Processing Unit*). É utilizado o sistema operacional Android para realizar todos os cálculos de trajetória, realizar a coleta de dados e atuar sobre o sistema de navegação. A abordagem para desviar dos obstáculos é modelar o ambiente utilizando o método *oriented graph* e utiliza o *visibility graph* para calcular a melhor rota. O sensor infravermelho E18-D80NK é utilizado para alimentar o sistema com as informações de distâncias dos obstáculos.

([JIA et al., 2020](#)) apresentam um trabalho com foco na utilização de dois algoritmos para o planejamento, sendo o RRT\* global e o DWA local. Os resultados foram obtidos por meio de simulações utilizando o ROS. Nele um pequeno modelo 3D de um ambiente representando uma sala é utilizado, e um VANT percorre o mesmo desviando de obstáculos. As informações de ambiente são lidas por meio de um sensor LIDAR. Ao fim, um novo obstáculo é colocado enquanto está sendo executada a simulação e o sistema é capaz de responder ao evento.

(ZI et al., 2020) apresentam a utilização do LIDAR Rplidar S1, controlador de voo Pixhawk e computador NVIDIA TX2, em conjunto com a plataforma de voo Carto F4. Utilizando o método de probabilidade bayesiana binária como mapa do ambiente e o algoritmo RRT para encontrar o caminho de menor custo, os resultados são obtidos por meio de simulações no ROS. O foco do trabalho consiste em aprimorar o algoritmo RRT no replanejamento de rotas, o qual demonstrou uma redução de aproximadamente 23.69% no custo computacional. Além disso, os resultados indicam que os tempos de planejamento de trajetória atendem aos requisitos para a evasão de obstáculos em tempo real.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Geral

Desenvolver um sistema de planejamento de trajetória que seja capaz de ser executada por um VANT em ambiente desconhecido.

### 1.2.2 Específicos

- Adaptar um VANT comercial a fim de que seja comandado por um microcontrolador.
- Aplicar uma técnica de modelagem de ambiente.
- Mapear obstáculos do ambiente em tempo de voo.
- Implementar o algoritmo de geração e suavização de caminho.
- Fazer levantamento das restrições do sistema, como a autonomia de voo e o tempo de geração da trajetória.
- Testar o sistema em ambiente controlado para validar os resultados.
- Realizar ajustes conforme os dados obtidos no teste.

## 1.3 Estrutura da Monografia

Este estudo está organizando conforme os seguintes capítulos. O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico utilizado pela monografia, apresentado os tópicos: VANT, Algoritmo de geração de caminho e trajetória. No Capítulo 3 é exposto a metodologia a ser empregada neste projeto. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos testes em campo. Por fim, o Capítulo 5 discorre sobre as considerações finais e conclusão do trabalho.

## 2 Referencial Teórico

Neste capítulo serão abordados os principais temas teóricos utilizados como base para o desenvolvimento do estudo, tais como, veículo aéreo não tripulado, algoritmo de geração de caminho e trajetória e navegação e sensoriamento.

### 2.1 Veículo Aéreo Não Tripulado

Segundo a (ICAO, 2022) (Organização da Aviação Civil Internacional - do inglês *International Civil Aviation Organization*) um VANT é uma aeronave sem piloto a bordo que é controlada de outro lugar (chão, outra aeronave, espaço) ou programada e completamente autônoma. O Brasil é um dos membros fundadores da ICAO e portanto segue todas as normativas do órgão. Na literatura existem várias formas de classificar os VANTs, seguindo aspectos como tipo de asa, rotor, aplicação, peso, tamanho e autonomia.

É importante notar que muitas categorias se assemelham àquelas utilizadas na aviação tradicional, pois o VANT é apenas um caso especial no campo da aeronáutica. A princípio, o tipo de asa pode ser classificado em asa fixa ou rotativa, e como o nome sugere a asa fixa é aquele que permanece imóvel em relação a aeronave. Por sua vez, a asa rotativa é aquela que é acoplada a um rotor que a gira gerando a sustentação. As Figuras 1 e 2 apresentam VANTs de asa fixa e rotativa, respectivamente.

Figura 1 – VANT de asas fixas.



Fonte: (BOEING, 2022).

No entanto, existem outras configurações possíveis para a quantidade de rotores. E ainda, um tipo que mescla as asas fixas e rotativas. Na Figura 3 é ilustrado um VANT quadrirrotor como exemplo para os múltiplos rotores. E por fim, na Figura 4 é mostrado um modelo híbrido de asas fixas e rotativas.

Figura 2 – VANT de asas rotativas.



Fonte: (YAMAHA, 2022).

Figura 3 – VANT com quatro rotores.



Fonte: (DJI, 2022).

A depender da aplicação o veículo também sofre alterações de hardware e software. Alguns casos de uso são: recreativo, militar, fotográfico, monitoramento, transporte de carga, agropecuária, e etc.. Segundo (KENDOUL, 2012) pode-se dividir os VANT de asa rotativa em cinco categorias, levando em consideração o peso e tamanho:

- Categoria I: Helicópteros de escala comercial não tripulados e autônomos. Suas maiores vantagens são a sua resistência, carga de transporte útil, autonomia e a opção de transportar uma pessoa com segurança.
- Categoria II: Veículo de média escala, sendo autônomo ou pilotado remotamente, que pese mais que 30 Kg possuindo uma carga de transporte útil de mais de 10 Kg. A sua principal vantagem é, por ser capaz de suportar uma quantidade de peso

Figura 4 – VANT com asas fixas e rotativas.



Fonte: (JOUAV, 2022).

maior, poder transportar sensores de alta qualidade, uma vez que estes são mais pesados.

- Categoria III: Veículo de pequena escala com opção piloto automático que pese menos que 30 Kg e carregue cargas entre 2 e 10 Kg. São geralmente de menor custo de aquisição em comparação com as categorias I e II, porém ainda podem carregar sensores pesados.
- Categoria IV: Veículo que possui dimensões centimétricas e pesa não mais que poucos quilogramas. Geralmente é onde a maior parte dos multirrotores estão inseridos. Possui baixo custo, fácil manutenção e é capaz de operar em ambientes confinados.
- Categoria V: Veículo de escala micro que pesa algumas centenas de gramas. É projetado para operar em ambientes confinados e possui restrição na utilização de sensores devido ao baixo peso de transporte útil.

## 2.2 Plataforma de Ensaio - Modelo F450

Segundo a DJI em (DJI, 2023a) o modelo F450 é uma plataforma de quadrirotor totalmente customizável. Este geralmente é utilizado para aplicações recreativas, aerofotografia, pilotagem em primeira pessoa (First Person View) entre outras. O kit de montagem vem com os elementos básicos para montagem como o frame, hélices, placa central e PCB de distribuição de energia além dos parafusos para encaixe, conforme ilustrado na Figura 5

### 2.2.1 Controlador de voo

O controlador de voo é um conjunto de diversos sistemas integrados que produzem informações utilizadas para navegar e guiar um VANT. Em um contexto básico o controlador de voo é apenas auxiliar aos comandos mandados por um humano, sendo responsável

Figura 5 – Kit F450 com: frame, placa central e PCB de distribuição de energia.



Fonte: (DJI, 2023b).

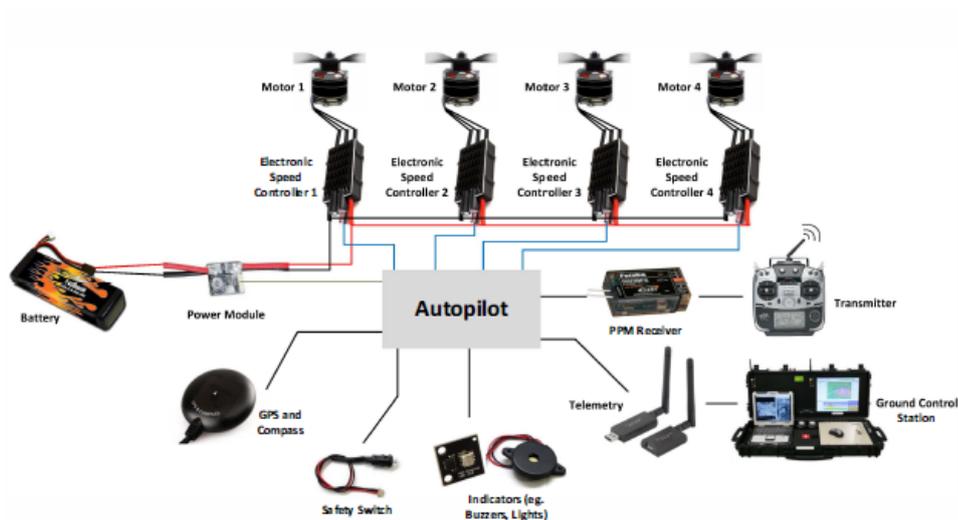
apenas por enviar sinais aos controladores de velocidade dos motores para que o VANT navegue pelos três eixos.

Segundo (YANG; LIN; CHEN, 2016) em um sistema de controle de voo básico de um VANT é considerado que comandos sejam transmitidos de uma base terrestre por um piloto humano ao VANT. Estes comandos são processados e por meio da coleta de dados de voo é possível alimentar um algoritmo de controle que mande sinais aos atuadores para que a altitude e posição seja controlada.

Para obter um sistema totalmente autônomo se faz necessário um sistema de piloto automático, que consiste em um sistema que tenha *hardware* e *software* capaz de tomar decisões de um piloto para determinada missão. Dentro deste sistema estão presentes diversos componentes como módulos de gerenciamento de bateria, computadores de bordo, IMU ( sistema de medida inercial ?), sensores de pressão, sensores de velocidade do ar, GPS, antenas de comunicação, sensores ópticos,etc. Na Figura 6 podemos ver os elementos que compõem o sistema para um quadricóptero.

Neste trabalho foi escolhido o controlador Pixhawk, mostrado na Figura 7. Segundo o site oficial (PIXHAWK, 2023b), o Pixhawk é um sistema de controle de voo de código aberto amplamente utilizado em aeronaves não tripuladas, como drones e veículos aéreos autônomos. Desenvolvido pela comunidade de código aberto, o Pixhawk oferece uma plataforma flexível e poderosa para controlar os sistemas de voo, navegação e missões dessas aeronaves.

Figura 6 – Sistema de aviãoica básica para piloto automático.



Fonte: (YANG; LIN; CHEN, 2016).

Figura 7 – Controlador de Voo Pixhawk.



Fonte: (PIXHAWK, 2023a).

O Pixhawk consiste em um *hardware* e *software* integrados. O *hardware* é uma placa de controle de voo baseada em microcontrolador ARM Cortex-M4 de 32 bits, com uma unidade de processamento Pixhawk FMU (Flight Management Unit) e uma unidade de processamento Pixhawk IO (Input/Output). Além disso, o Pixhawk possui sensores embutidos, como giroscópios, acelerômetros, magnetômetros, barômetros e receptores GPS, que fornecem informações cruciais para o controle de voo e a navegação precisa.

O *software* inclui o *firmware* do Pixhawk, que executa algoritmos de controle de voo, e a interface de usuário *Mission Planner*, que permite a configuração, monitoramento e planejamento de missões. O Pixhawk é conhecido por sua estabilidade, precisão e capacidade de integração com uma ampla gama de veículos aéreos e periféricos. Ele suporta

uma variedade de modos de voo, como controle manual, estabilizado, semi-autônomo e totalmente autônomo, permitindo que os operadores personalizem as características de voo de acordo com suas necessidades e requisitos específicos.

Além disso, o Pixhawk é altamente modular, o que significa que é possível adicionar e personalizar recursos adicionais, como câmeras, sensores de visão, sistemas de comunicação. Isso torna o Pixhawk uma escolha popular para uma variedade de aplicações, incluindo mapeamento aéreo, inspeção de infraestrutura, monitoramento agrícola e pesquisa científica.

### 2.2.2 Motores e ESC (Controlador de Velocidade Elétrico - do inglês *Electrical Speed Controller*)

Os motores de um VANT desempenham um papel crucial no seu funcionamento e desempenho. Esses motores, geralmente sem escova, são responsáveis por gerar a força necessária para impulsionar as hélices e proporcionar o voo. Eles são projetados para girar em alta velocidade, permitindo que o VANT se mova em diferentes direções. Os motores são controlados por meio de ESCs, que ajustam a velocidade dos motores com base nos comandos recebidos do controlador de voo.

A ReadyTosky fabrica tanto ESCs quanto motores *brushless*. Neste projeto serão utilizados modelos compatíveis com a plataforma F450. O ESC é o modelo SIMONK30A que é capaz de entregar uma resposta rápida no controle dos motores devido sua alta taxa atualização, este modelo pode ser alimentado por baterias LiPo de 2 a 4 células. Os Motores utilizados são da mesma empresa do modelo RS212-920KV, estes podem ser alimentados com tensões elétrica contínuas entre 7 a 12 volts. A rotação dos motores segue a relação de 920 rpm por volt, sendo assim podendo chegar a até 11.040 rpm.

### 2.2.3 Bateria

Os VANTs são veículos que trabalham em condições de alta corrente e sua bateria precisa suprir energia aos diversos dispositivos que compõem o sistema, conforme apresentado na Figura 6. Portanto, é necessário que a escolha da bateria esteja de acordo com a necessidade do VANT, caso contrário problemas em relação ao tempo de voo, consumo elétrico de dispositivos e peso do VANT, podem surgir.

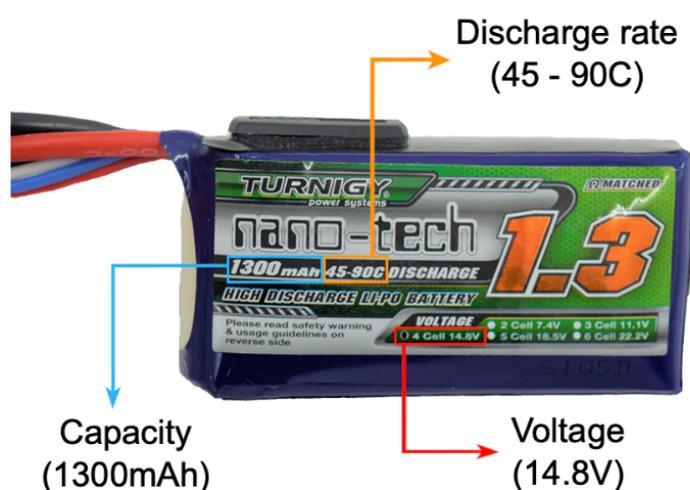
As baterias de íon de lítio polimérico, mais conhecidas como baterias LiPo, são uma tecnologia avançada e popular no campo das baterias recarregáveis. Elas são amplamente utilizadas em uma variedade de dispositivos eletrônicos, como *smartphones*, *laptops*, VANTs, brinquedos controlados remotamente e veículos elétricos.

As baterias LiPo se destacam por sua alta densidade de energia, o que significa que são capazes de armazenar uma grande quantidade de energia em um tamanho compacto

e leve. Além disso, elas possuem uma taxa de descarga elevada, o que lhes permite fornecer correntes intensas de forma eficiente, sendo ideais para dispositivos que exigem alto desempenho. No geral, as baterias LiPo oferecem uma excelente combinação de potência, eficiência e tamanho compacto, tornando-as uma escolha popular em muitas aplicações eletrônicas.

Segundo (ROBOTICS, 2021) é interessante que durante o processo de escolha da bateria para VANTs alguns parâmetros sejam observados. Os principais são a capacidade, a voltagem e a taxa de descarga. Na Figura 8 podemos observar um exemplo de bateria.

Figura 8 – Exemplo da bateria LiPo e seus principais parâmetros.



Fonte: (ROBOTICS, 2021).

A capacidade é medida em miliampere-hora(mAh) e pode ser definida como o número de horas que uma bateria pode prover a corrente elétrica, esta medida está associada com o tempo de voo. A voltagem é medida em volts (V) e está ligada a velocidade dos motores, já que existe a razão rpm/Volt que é dada por quilovolt (kV). Por fim, a taxa de descarga é medida em "C" e utilizada para informar o quanto que a bateria pode descarregar em segurança, quanto maior for a taxa de descarga mais corrente pode ser entregue ao sistema. Como exemplo podemos ter uma bateria de 2200 mAh e 30C, e se multiplicarmos estes dois fatores resulta na corrente disponível para ser drenada da bateria, no caso 66 amperes.

## 2.3 Sensores do Modelo F450

### 2.3.1 LIDAR

A tecnologia LIDAR (Detecção e Mapeamento a Laser - do inglês *Light Detection and Ranging*) é um sistema avançado que utiliza pulsos de luz laser para medir distâncias

e criar mapas tridimensionais detalhados do ambiente ao redor. Funciona enviando pulsos de luz laser em direção a um objeto e medindo o tempo que leva para o sinal retornar, calculando assim a distância com extrema precisão. Esses dados são combinados para formar uma nuvem de pontos, que pode ser utilizada para mapear o terreno, criar modelos 3D, detectar obstáculos e até mesmo auxiliar na condução autônoma de veículos.

O sensor LIDAR pode ser utilizado em diversas aplicações para VANTs, tanto para odometria quanto para o mapeamento de ambientes. O trabalho feito por (BOLOURIAN; HAMMAD, 2020) demonstra a utilização do sensor para realizar o planejamento de caminho do VANT por meio da detecção de obstáculos, no caso colunas de sustentação, em baixo de uma ponte. Os dados também são utilizados para escanear possíveis rachaduras ou fissuras encontradas na construção.

No mercado é possível encontrar diversos modelos do sensor de diferentes preços de acordo com as especificações de distância de trabalho, acurácia da medida, frequência da amostragem dos pulsos de laser, velocidade rotacional e a faixa de graus (entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ ) que atua. Neste trabalho o modelo utilizado foi o RPlidar A1, este modelo é fabricado pela (SLAMTEC, 2023a) que é especializada na fabricação de sensores para localização e navegação de robôes autônomos. Podemos visualizar o modelo RPlidar A1 na Figura 9.

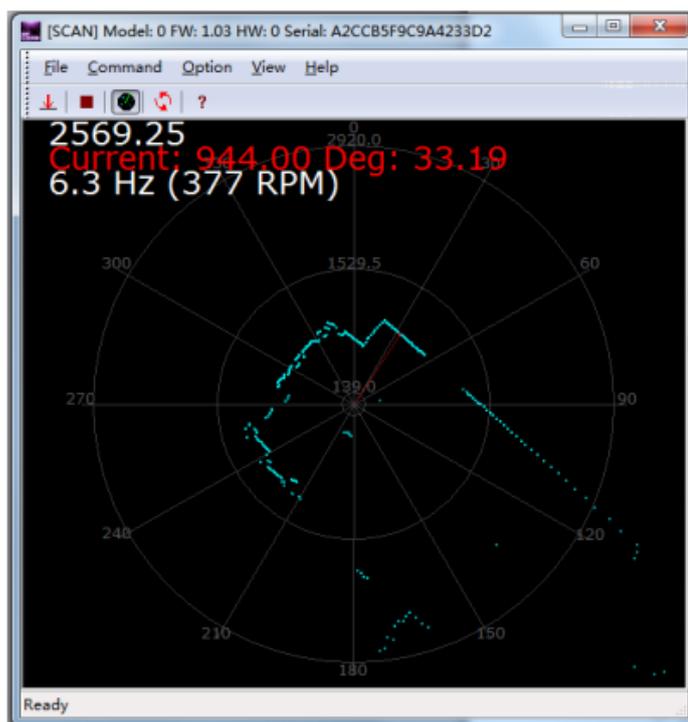
Figura 9 – Sensor RPlidar A1.



Fonte: (SLAMTEC, 2023b).

Em (SLAMTEC, 2023b) é instruído como o sensor deve ser utilizado, além disso é comentado que o sensor utiliza um conversor UART para USB para se comunicar com o computador. Por fim, a empresa disponibiliza um software de demonstração para realizar testes de leitura e visualizar os dados do sensor em formato de um mapa que pode ser visto na Figura 10. As linhas azuis na Figura 10 representam obstáculos encontrados no ambiente.

Figura 10 – Software de demonstração dos dados do sensor RPlidar A1.



Fonte: (SLAMTEC, 2023b).

### 2.3.2 GPS

O GPS (Sistema de Posicionamento Global - do inglês *Global Positioning System*) é uma tecnologia que permite determinar a localização geográfica de um objeto ou pessoa em qualquer lugar do mundo. Baseado em uma rede de satélites em órbita ao redor da Terra, o GPS utiliza trilateração para calcular as coordenadas precisas de um receptor GPS. Ao receber sinais de no mínimo quatro satélites, o receptor pode determinar sua posição com uma margem de erro mínima. O GPS tem uma ampla gama de aplicações, desde navegação em veículos e dispositivos móveis até rastreamento de frota, geoposicionamento em atividades ao ar livre, mapeamento e monitoramento de ativos.

Um sensor GPS, por sua vez, é um receptor que obtém dados de posição geográfica e pode repassar-los a outro sistema. No caso deste trabalho foi utilizado o modelo M8N da Ublox que pode ser visto na Figura 11. O sensor M8N é capaz de se comunicar com o controlador de voo Pixhawk mencionado na Seção 2.2.1.

## 2.4 Algoritmo de geração de caminho e trajetória

(CORMEN et al., 2012) definiram algoritmo como um procedimento computacional bem definido que toma algum valor, ou conjunto de valores, como entrada e produz algum valor, ou conjunto de valores, como saída. Portanto, um algoritmo é uma sequência

Figura 11 – Sensor GPS Ublox M8N.



Fonte: (SLAMTEC, 2023b).

de etapas computacionais que transformam a entrada em uma saída.

Seguindo este conceito podemos atingir uma infinidade de problemas, do mais simples ao mais complexo. Em certa medida os problemas algorítmicos mais simples são geralmente resolvidos com base em técnicas consolidadas na literatura, no entanto existem cenários em que não há uma solução ótima global, mas sim diversas soluções sub-ótimas, e encontrar a melhor entre várias opções é um desafio. Um desses problemas é encontrar o caminho entre dois pontos que minimize o custo de travessia.

Antes de apresentar os algoritmos que resolvem o problema, consideraremos um caminho como sendo um conjunto de segmentos de reta conectados sucessivamente de modo a ligar um ponto inicial a um ponto final (ARAÚJO, 2017). No contexto de planejamento de caminho para VANTs é preciso ressaltar que nem todos os caminhos encontrados são possíveis de serem trafegados, sendo necessário uma técnica que suavize o caminho e gere a trajetória, a qual é possível de ser seguida por algum VANT.

O planejamento de caminho pode ser dividido entre global e local. De maneira resumida, a forma global é aplicada quando o VANT tem conhecimento de todo mapeamento do ambiente, e a local é aplicada quando o VANT está presente em ambiente incerto ou desconhecido. Na Tabela 1 é mostrado alguns outros pontos de diferença.

Tabela 1 – Tipos de planejamento de caminho.

	<b>Local</b>	<b>Global</b>
Navegação	Sensores	Mapeamento
Caso de uso	O Ambiente é parcialmente ou totalmente desconhecido	O Ambiente é bem conhecido
Objetivo	Gerar o caminho movendo-se ao destino considerando os obstáculos encontrados	Gerar um caminho ao destino, antes do início do deslocamento, que seja praticável
Como é implementado	Online (a bordo do VANT)	Offline (fora do VANT)

Fonte: AUTOR, 2022.

Segundo (KOUBAA et al., 2018) o início da pesquisa de algoritmos para a geração de caminho começou por volta de 1960, porém o campo de pesquisa ganhou força nos anos 1980. A partir de então diversas soluções apareceram e podem ser classificadas em três categorias baseadas na abordagem: clássica, heurística e procura em grafo. Na Figura ?? podemos observar alguns exemplos e a que categoria cada um pertence.

Além dos algoritmos principais de cada categoria existem suas variações e outras soluções sendo pesquisadas envolvendo inteligência artificial. Na literatura é encontrado com muita frequência aplicações envolvendo os algoritmos de procura em grafo (ALLAIRE et al., 2019). Neste caso utiliza-se do conceito de grafo que é o objeto matemático que une nós (representado por pequenos círculos) por meio de arestas (representado por linhas). Na Figura ?? podemos ver um exemplo de um grafo.

Em 1959, Edsger Wybe Dijkstra encontrou um método para resolver o problema do caminho mais curto em um grafo tomando dois nós como sendo o início e o fim do percurso. Atualmente o algoritmo de Dijkstra ainda é muito utilizado no planejamento de caminho para VANTs, porém outras soluções tomaram espaço, como o algoritmo RRT. O Algoritmo ?? é o algoritmo básico RRT.

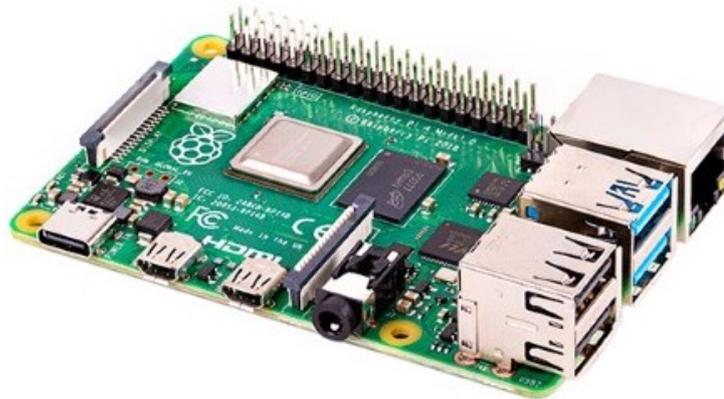
(LAVALLE, 1998) foi o primeiro que descreveu o algoritmo acima e sugeriu seu uso no problema de planejamento de caminho. No trabalho o autor considera o espaço métrico  $X$  e uma posição inicial  $x_{início}$  onde se pretende chegar na região  $X_{fim} \subset X$  ou atingir a posição  $x_{fim}$ , e com isso o algoritmo retorna uma estrutura semelhante a uma árvore que atinge diversas posições no espaço. Uma melhor visualização deste processo está na Figura ??.

Ao utilizar este algoritmo em ambientes com obstáculos haverá uma região a ser evitada, sendo ela representada por  $X_{obstaculos} \subset X$ . Dessa forma, resta procurar um caminho pela região  $X_{livre}$ , que é complementar de  $X_{obstaculos}$ . Assim, o VANT, utilizando o algoritmo RRT, pode chegar na posição  $x_{fim}$ , partindo da posição  $x_{início}$  em uma região com obstáculos.

## 2.5 Raspberry Pi

O Raspberry Pi é uma série de computadores desenvolvidos pela Raspberry Pi Foundation. Geralmente utilizados em projetos embarcados, por ser de tamanho compacto, e possuir todas as interfaces comuns em computadores pessoais, como: portas USB, Wi-Fi, Bluetooth, porta Ethernet, saídas de áudio e vídeo. O modelo mais recente é o Raspberry Pi 4 Model B, este possui um processador ARM quad-core 64-bit de 1,5 GHz e memória RAM de 2,4 ou 8 GB além de slot para cartão SD, que é usado como memória secundária para carregamento do sistema operacional e dados.

Figura 12 – Raspberry Pi 4 Model B.

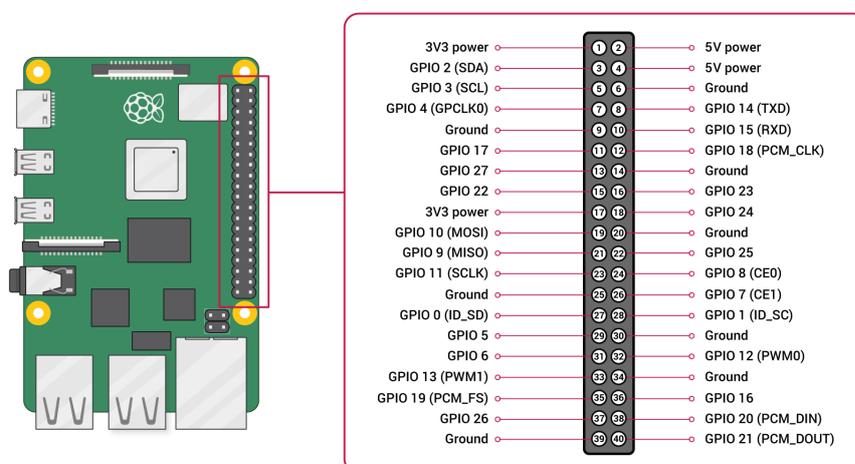


Fonte: ([FILIPFLOP, 2022](#)).

Ainda segundo a Raspberry Pi Foundation, uma funcionalidade importante é a presença dos GPIOs (General-Purpose Input/Output) que pode ser observada na Figura 12. Este barramento de pinos serve diversas funcionalidades como, por exemplo, energizar o computador com 5V de uma bateria sem a necessidade de uma fonte AC.

Por fim, na Figura 13 temos outros usos para os pinos, como comunicação serial RX/TX, comandos PWM e pinos programáveis via software para uso em aplicações analógicas e digitais.

Figura 13 – GPIOs.



Fonte: (FOUNDATION, 2023).

## 3 Metodologia

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada no projeto. Abaixo está organizado em tópicos as principais etapas para o funcionamento do sistema.

### 3.1 Aquisição do VANT F450

Como mencionado na figura 5, o Kit da plataforma F450 vem com elementos estruturais e uma placa de distribuição de energia central para os ESCs e motores. No processo de aquisição foi verificado que geralmente se vende o kit juntamente com motores, escs, hélices, GPS, radio controlador e seu receptor e o controlador Pixhawk. Sendo assim, o kit adquirido foi este a fim de que não houvesse problemas de conexão entre os vários elementos distintos e poupar tempo na escolha dos mesmos. Abaixo a lista de materiais do Kit:

- Frame.
- GPS.
- 4 Motores.
- 4 ESCs.
- Controlador de Voo Pixhawk.
- Rádio Controle FS-i6.
- Receptor de rádio FS-IA6.

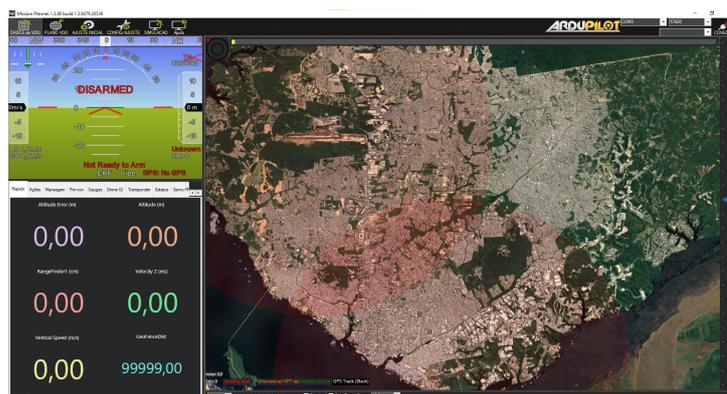
Além disso, outros materiais foram adquiridos para completar o projeto ou solucionar problemas no decorrer do desenvolvimento. Abaixo a lista dos materiais adicionais:

- Raspberry Pi.
- Sensor LIDAR Benewake TF-Luna.
- Ubec Hobbywing 3A.
- Gravador ST-Link V2 para STM32.
- Bateria Lipo CNHL 11,1V 2200 mAh 3S.
- Decodificador PPM de canais de rádio para Pixhawk.
- Conector Bullet Gold 4mm.

## 3.2 Primeira conexão com o Pixhawk

Inicialmente foi realizado um teste de conexão do controlador Pixhawk ao computador, a fim de que este se conectasse ao programa Mission Planner. O programa Mission Planner é, segundo o site oficial, uma aplicação completa para o planejamento de missões do projeto Ardupilot e sua tela inicial pode ser vista na figura 14. Vale ressaltar que este é o projeto por trás do desenvolvimento do controlador Pixhawk.

Figura 14 – Tela inicial do programa Mission Planner.



Fonte: AUTOR.

Ao realizar a conexão foi observado que o controlador não era reconhecido pelo computador. Ao fim foi necessário reprogramar o firmware do dispositivo utilizando um gravador de STM32. Após a regravação o Pixhawk conectou-se ao Mission Planner e foi possível obter os primeiros parâmetros do controlador.

## 3.3 Alimentação elétrica

As conexões elétricas foram feitas tomando como base as instruções do site oficial do projeto Ardupilot e o manual de instruções da fabricante do VANT. No início foi observado que deveria ter uma adaptação para que a bateria pudesse alimentar o Raspberry Pi. Segundo o fabricante é necessário fornecer 5V 3A em corrente contínua, sendo assim foi utilizado um UBEC, sendo este um regulador DC que trabalha com tensão de entrada entre 5-26V e fornece 5V/3A ou 6V/3A que conta com proteção contra sobrecorrente e sobreaquecimento. Na figura 15 é possível ver este regulador.

Seguindo a figura 6 e implementando as alterações acima citadas chegou-se no resultado apresentado na figura 16.

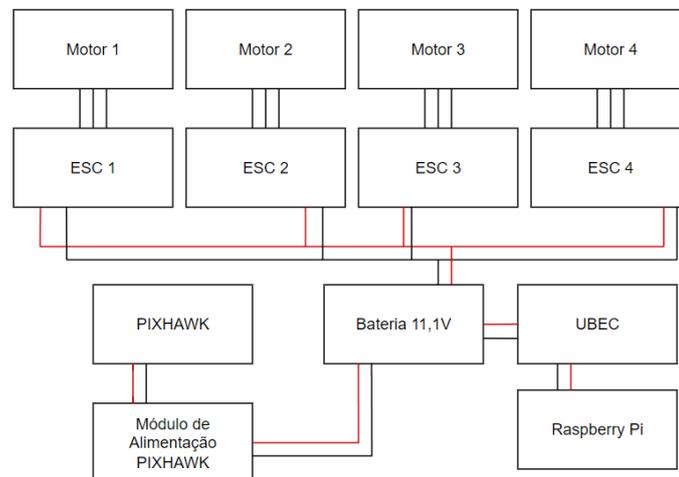
Sendo assim, é possível fornecer energia elétrica para todo o sistema conectando todos a placa de distribuição de energia mostrada na figura 17. Nota-se que os outros elementos, como o GPS, LIDAR e módulo de telemetria são diretamente ligados ao Pixhawk pois em suas entradas já é fornecido 5V.

Figura 15 – Regulador de tensão UBEC.



Fonte: (SHOP.CH, 2023).

Figura 16 – Diagrama de alimentação elétrica geral.



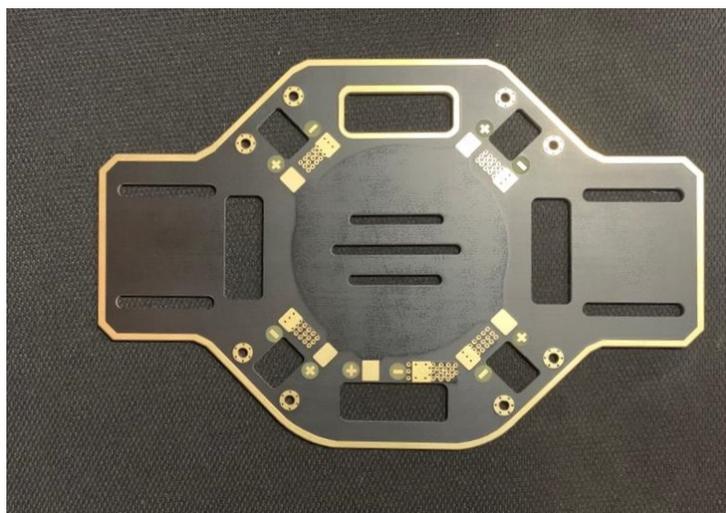
Fonte: AUTOR.

### 3.4 Interface Raspberry Pi e Pixhawk

A fim de validar a conexão entre o Raspberry Pi e o Pixhawk foi montado um pequeno experimento onde se conectou alguns dispositivos ao Pixhawk, entre eles o próprio Raspberry Pi, em cima de uma plataforma com alimentação a bateria. Na figura 18 é possível visualizar a conexão feita.

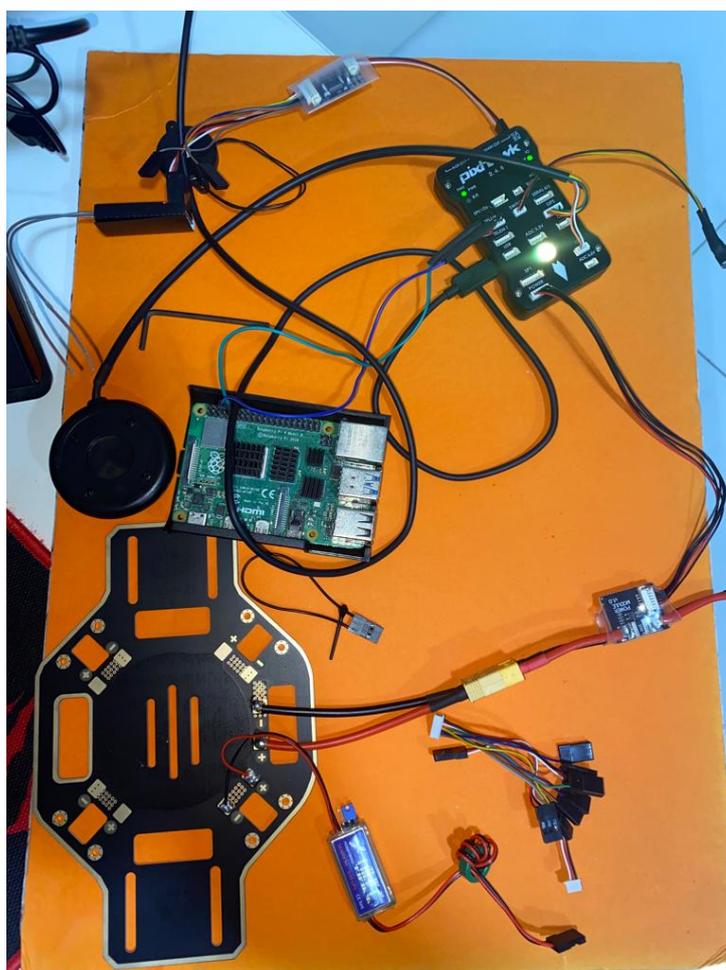
Dessa forma, foi possível se conectar via SSH ao Raspberry Pi e assim obter parâmetros como a localização e enviar comandos utilizando a linguagem Python. Isto está demonstrado na figura 19.

Figura 17 – Placa de distribuição de energia.



Fonte: AUTOR.

Figura 18 – Experimento de conexão entre Raspberry Pi e Pixhawk.



Fonte: AUTOR.

Figura 19 – Linha de comandos do Raspberry Pi acessada via SSH.

```

pi@raspberrypi:~
pi login as: pi
pi@192.168.0.106's password:
Linux raspberrypi 5.15.84-v7l+ #1613 SMP Thu Jan 5 12:01:26 GMT 2023 armv7l

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Tue Feb 14 15:20:24 2023
pi@raspberrypi:~$ mavproxy.py
Auto-detected serial ports are:
/dev/ttyS0
Connecting to /dev/ttyS0
Connect /dev/ttyS0 source_system=255
Failed to connect to /dev/ttyS0 : Could not configure port: (5, 'Input/output er
ror')
No mode mapping available
Log Directory:
Telemetry log: mav.tlog
MAV> pi@raspberrypi:~$ sudo -s
root@raspberrypi:/home/pi# mavproxy.py --master=/dev/serial0 --baudrate 921600 -
--aircraft MyCopter
Connect /dev/serial0 source_system=255
no script MyCopter/mavinit.Scr
Log Directory: MyCopter/logs/2023-02-14/flight2
Telemetry log: MyCopter/logs/2023-02-14/flight2/flight.tlog
Waiting for heartbeat from /dev/serial0
MAV> AP: ArduCopter V4.3.3 (34e8e02c)
AP: ChibiOS: 66e5de0d
AP: Pixhawk1 0049003F 34355114 30303830
AP: RCOut: PWM:1-14
AP: IMU0: fast sampling enabled 8.0kHz/1.0kHz
AP: Frame: QUAD/X
Detected vehicle 1:1 on link 0
online system 1
STABILIZE> Mode STABILIZE
AP: ArduCopter V4.3.3 (34e8e02c)
AP: ChibiOS: 66e5de0d
AP: Pixhawk1 0049003F 34355114 30303830
AP: RCOut: PWM:1-14
AP: IMU0: fast sampling enabled 8.0kHz/1.0kHz
AP: Frame: QUAD/X
AP: ArduCopter V4.3.3 (34e8e02c)
AP: ChibiOS: 66e5de0d
AP: Pixhawk1 0049003F 34355114 30303830
AP: RCOut: PWM:1-14
AP: IMU0: fast sampling enabled 8.0kHz/1.0kHz
AP: Frame: QUAD/X
Received 936 parameters (ftp)
Saved 936 parameters to MyCopter/logs/2023-02-14/flight2/mav.parm
Saved 936 defaults to MyCopter/logs/2023-02-14/flight2/defaults.parm
MAV> fence present
AP: PreArm: Throttle below failsafe
AP: PreArm: Hardware safety switch
AP: PreArm: Baro: GPS alt error 5901m (see BARO_ALTERR_MAX)
AP: PreArm: 3D Accel calibration needed
AP: PreArm: Compass not calibrated
AP: PreArm: Logging failed
GPS lock at 44 meters

```

Fonte: AUTOR.

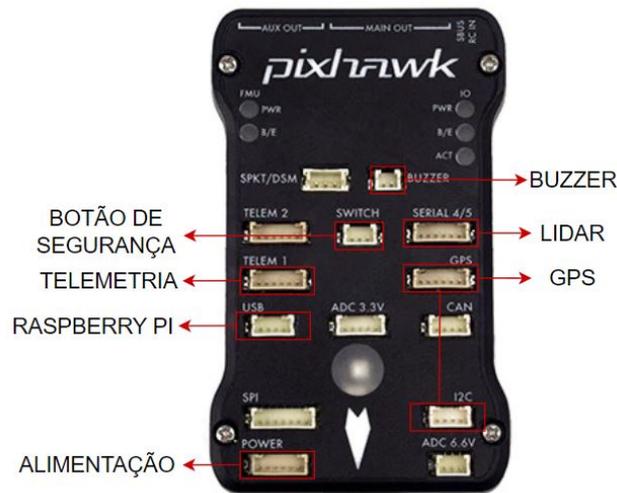
### 3.5 Conexões eletrônicas ao Pixhawk

As conexões ao Pixhawk são feitas a partir de conectores conhecidos comercialmente como “Conector KK” e “Conector Dupont”. Todos os dispositivos que se conectam ao pixhawk possuem uma destas conexões e portanto não necessitam de solda. Seguindo a documentação oficial pode se chegar a um esquema de conexões demonstrado na figura 20.

Os dois dispositivos que não fazem parte do kit inicial são o Raspberry Pi e o LIDAR. No primeiro caso a conexão foi feita por meio de um cabo USB, para o LIDAR foi necessário olhar na documentação e verificar como o sensor enviava e recebia os dados. Na figura 21 é possível visualizar a parte da documentação usada como referência.

A porta do Pixhawk que é destinada para conectar o sensor LIDAR é a Serial 4/5 que pode ser visualizada na figura 20 e, conforme descrito no site do projeto, possui

Figura 20 – Pixhawk e as entradas de cada componente do sistema.



Fonte: AUTOR.

Figura 21 – Pinos de conexão do sensor LIDAR TF-Luna.

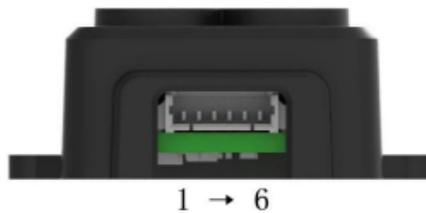


Figure 4 TF-Luna's pin numbers

Table 6: The Function and Connection Description of each pin

No.	Function	Description
1	+5V	Power supply
2	RXD/SDA	Receiving/Data
3	TXD/SCL	Transmitting/Clock
4	GND	Ground
5	Configuration Input	Ground: I2C mode /3.3V: Serial port Communications mode
6	Multiplexing output	Default: on/off mode output I2C mode: Data availability signal on but not switching value mode

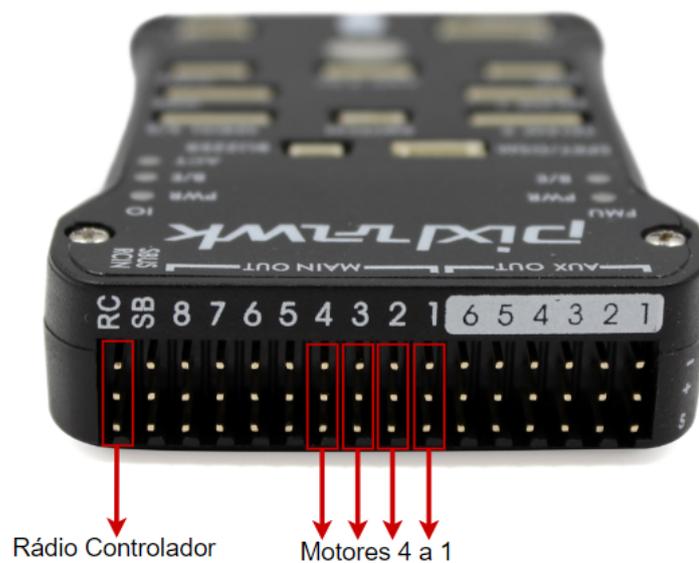
Fonte: (BENEWAKE, 2023).

6 pinos de conexão que são denominados da esquerda para a direita: VCC/5V, TX(4), RX(4), TX(5), RX(5), GND. Por fim, para utilizar o LIDAR nesta porta foi necessário

retirar os cabos de conexão dos pinos 5 e 6 do sensor e ligar o pino 4 ao pino 6 da porta serial do Pixhawk, a partir disto foi possível transmitir os dados do sensor ao controlador de voo.

As conexões restantes foram feitas ao longo dos pinos localizados acima do controlador, estes são conectados aos motores e a servomotores se for o caso, bem como o rádio controlador do VANT. A figura 22 mostra os pinos de conexão e seus componentes.

Figura 22 – Pinos de conexão Pixhawk para os motores e rádio controlador.



Fonte: AUTOR.

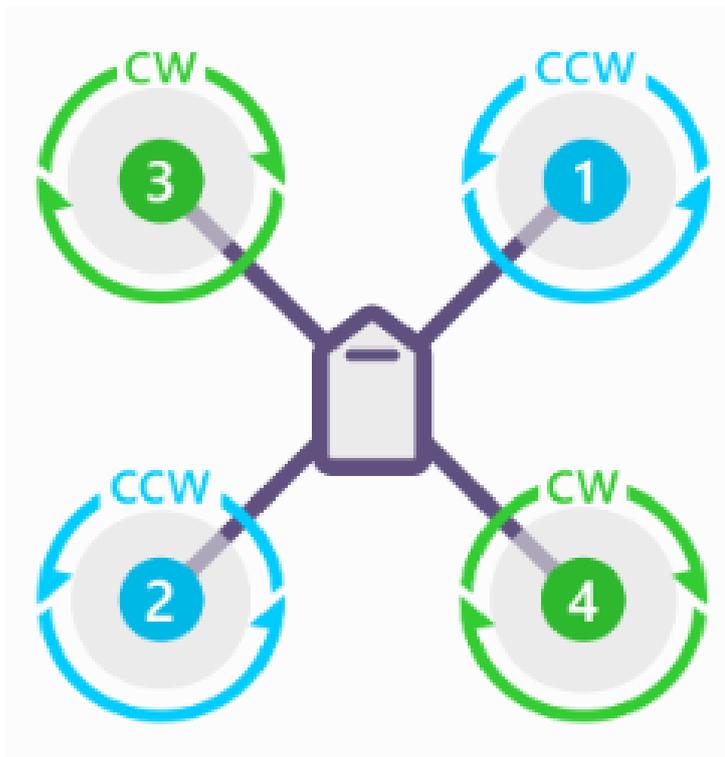
Para conectar os motores foi utilizado o cabo de sinal do ES. Ele contém três cabos, sendo cada um um sinal, VCC e GND. A conexão de cada motor depende da posição que ele está em relação ao Pixhawk e a configuração escolhida, conforme a documentação orientada. A figura 23 mostra a configuração escolhida, a numeração de cada motor em relação ao Pixhawk e os sentidos de giro.

Sendo assim, os motores foram conectados ao Pixhawk conforme sua numeração, seguindo as marcações mostradas na figura 22. Outro dispositivo que pode ser visto na figura 22 é a marcação de conexão do rádio controlador. Como o VANT apresenta 4 motores foi utilizado um decodificador de sinais PPM, que codifica até 8 sinais PWM em um sinal PPM que é conectado ao Pixhawk. Na figura 24 é mostrado como a conexão entre o Pixhawk e o receptor de rádio utilizando o codificador PPM.

### 3.6 Montagem do VANT

A montagem do VANT foi realizada seguindo os diagramas e esquemáticos levantados nas seções 3.3 e 3.5. Primeiramente foi realizada a soldagem dos 4 ESC, regulador UBEC e o conector da bateria. A figura 25 mostra o resultado.

Figura 23 – Configuração escolhida para o F450.



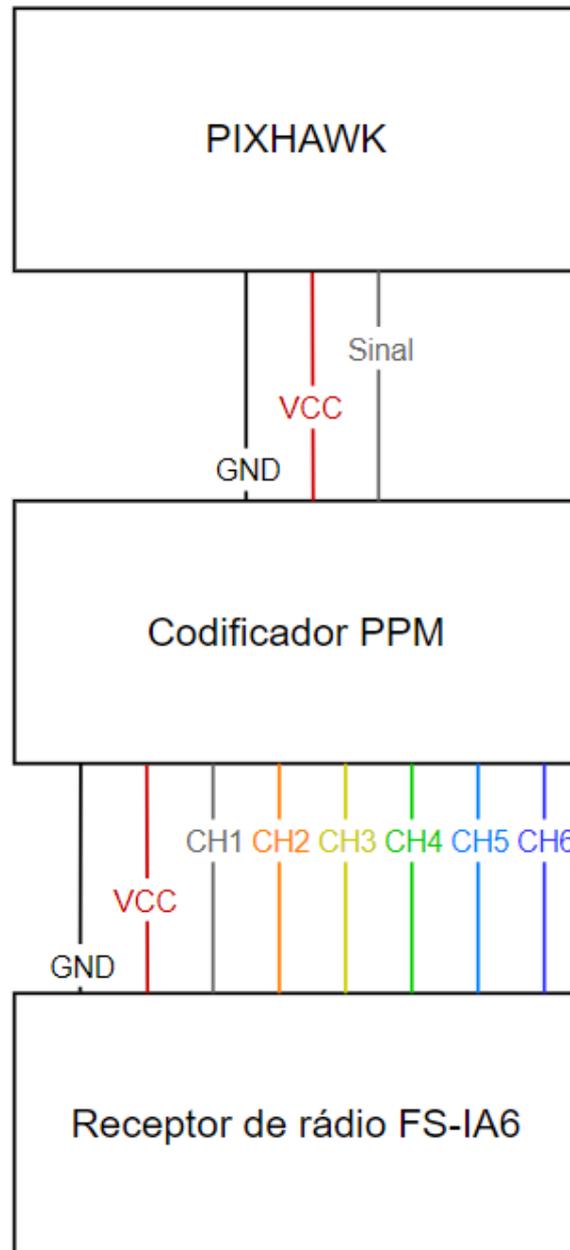
Fonte: (ARDUPILOT, 2023).

Em seguida foram montado os braços do VANT, e para sua fixação foram utilizados os parafusos que acompanham o kit. Na ponta do braço foi parafusado o motor e seu ESC foi fixado com fita Hellermann na parte de baixo conforme pode ser visto na figura 26. Este processo foi realizado para os 4 braços do VANT.

Posteriormente os componentes restantes foram sendo fixados de acordo com o espaço disponível. Para ter fácil acesso ao Pixhawk foi pensado em coloca-lo na parte de cima do VANT, o que também facilitaria sua fixação, pois este possui uma base que atenua vibrações que poderiam afetar a leitura de sensores internos. Outro ponto considerado seria a posição do GPS, este possui uma haste para sua fixação, o que ajuda na atenuação de interferências eletromagnéticas geradas por outros componentes, portanto também foi fixado na parte de cima do VANT.

Na fixação do Raspberry Pi e do LIDAR foi possível organiza-los de forma que coubesse nas extremidades da placa de distribuição de energia, sendo respectivamente posicionados na parte traseira e frontal do VANT. Por fim, o restante dos componentes foi fixado em posições livres ao longo do braço do VANT, acima da caixa do Raspberry Pi ou abaixo do VANT como é o caso da bateria. Na figura 27 podemos ter uma visão geral de todos os componentes acima citados e já conectados.

Figura 24 – Diagrama de conexão para o receptor do rádio controlador.

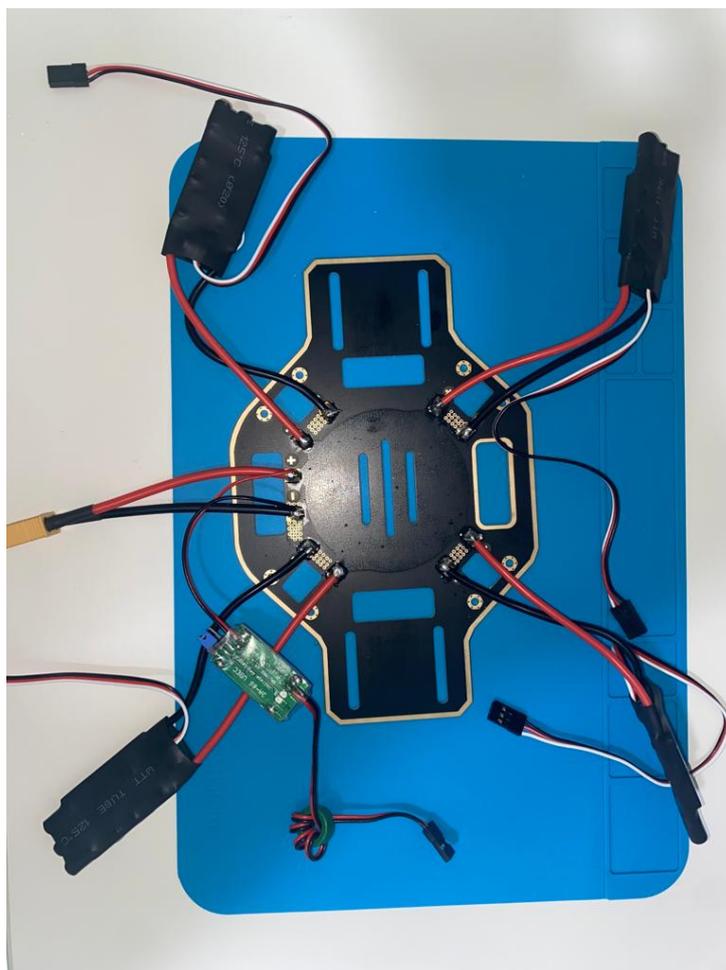


Fonte: AUTOR.

### 3.7 Calibração

A calibração é um processo necessário para que o Pixhawk possa trabalhar de forma adequada. No caso do F450 foram realizadas calibrações no compasso e acelerômetro conforme a documentação, não apresentando problemas. Outro processo de calibração necessário é referente ao ESC, sua calibração não necessita do Pixhawk, porém ao seguir o passo a passo da documentação a calibração só pode ser feita de forma manual, ou seja, cada ESC teria de ser conectado a saída do receptor de rádio FS-IA6 de forma individual.

Figura 25 – Componentes soldados a placa de distribuição de energia.



Fonte: AUTOR.

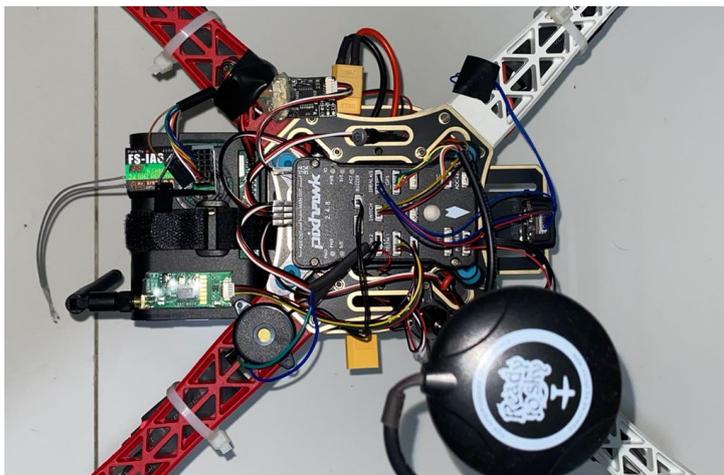
Figura 26 – Braço do VANT com motor e ESC fixados.



Fonte: AUTOR.

Após este processo foi verificado que, quando era enviado um sinal para os motores girarem, um dos motores apresentava uma rotação abaixo dos demais. Durante uma rápida

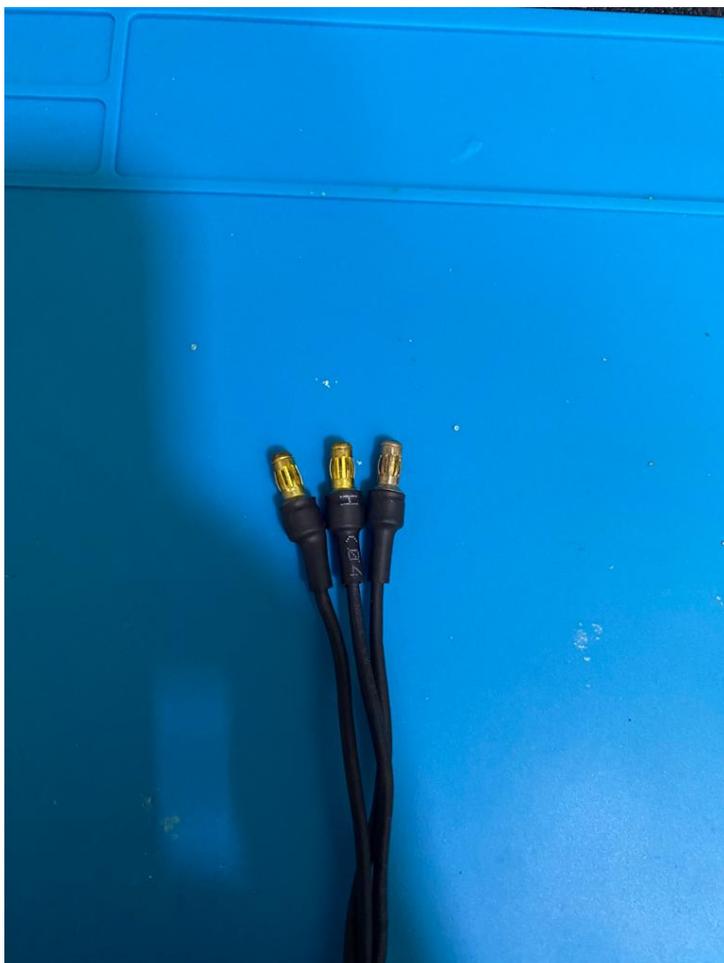
Figura 27 – Visão de cima dos componentes do VANT montados.



Fonte: AUTOR.

verificação foi observado que um de seus conectores apresentava uma cor suavemente diferente dos demais, não sendo este um ponto observado nos outros motores que operavam normalmente. Na figura 28 pode ser observado o conector citado mais a direita.

Figura 28 – Conectores do motor com defeito.



Fonte: AUTOR.

A partir de então o objetivo era constatar que o problema era o conector e não o motor. Para isto foi feito um teste de continuidade entre os conectores de um motor sem defeito e o motor com defeito. A única diferença apresentada era que um dos conectores do motor com defeito não apresentava continuidade para com seus pares. Por fim, um novo conector foi colocado e o problema foi solucionado.

Por ultimo foi realizada a verificação do sentido de rotação dos motores, esta é parte fundamental, pois garante a sustentação do VANT no ar. Conforme visto na figura 23 o sentido de rotação é indicado pelas setas em torno da numeração dos motores, quando apresenta "CW" significa que o motor deve girar no sentido horário e "CCW" no sentido anti-horário. No fim, dois motores apresentaram contrariedade ao seu sentido de rotação sendo trocado dois de seus conectores para fazer a inversão.

### 3.8 Programação

O desenvolvimento do algoritmo foi feito na linguagem de programação Python por já possuir o pacote dronekit que facilita a comunicação com o VANT e também no envio de comandos e recebimento de parâmetros. O algoritmo foi desenvolvido para que calcule um caminho partindo da localização atual do VANT, durante o deslocamento do no espaço se for detectado pelo LIDAR qualquer objeto a menos de 1 metro o VANT para nesta posição e recalcula um novo caminho, tentando novamente chegar ao destino. Ao chegar a posição o VANT começa o processo de pouso e encerra sua atividade

### 3.9 Testes

## 4 Resultados

## 5 Conclusão

### 5.1 Trabalhos Futuros

# Referências

- ALLAIRE, F. C. J. et al. Recent advances in unmanned aerial vehicles real-time trajectory planning. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, v. 7, n. 4, p. 259–295, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/juvs-2017-0004>>. Citado na página 23.
- ARAÚJO, R. F. *Um novo método de otimização baseado em teorias de satisfatibilidade*. 2017. Citado na página 22.
- ARDUPILOT. *Guia de conexão para motores e ESC ao Pixhawk*. 2023. Acesso em: 05.07.2023. Disponível em: <<https://ardupilot.org/copter/docs/connect-escs-and-motors.html>>. Citado na página 33.
- BENEWAKE. *Datasheet do sensor LIDAR TF-Luna*. 2023. Acesso em: 18.07.2023. Disponível em: <[https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-TF\\_Mini\\_LiDAR/res/SJ-PM-TF-Luna-A03-Product-Manual.pdf](https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-TF_Mini_LiDAR/res/SJ-PM-TF-Luna-A03-Product-Manual.pdf)>. Citado na página 31.
- BENHADHRIA, S. et al. Vagadrone: Intelligent and fully automatic drone based on raspberry pi and android. *Applied Sciences*, v. 11, 2021. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/7/3153>>. Citado na página 11.
- BOEING. *VANT com asas fixas*. 2022. Acesso em: 20.04.2022. Disponível em: <<https://www.boeing.com/defense/mq25/index.page>>. Citado na página 13.
- BOLOURIAN, N.; HAMMAD, A. Lidar-equipped uav path planning considering potential locations of defects for bridge inspection. *Automation in Construction*, v. 117, p. 103250, 2020. ISSN 0926-5805. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519309355>>. Citado na página 20.
- CORMEN, T. H. et al. *Algoritmos: Teoria e Prática*. [S.l.]: Elsevier Editora Ltda, 2012. Citado na página 21.
- DJI. *VANT com 4 rotores*. 2022. Acesso em: 20.04.2022. Disponível em: <<https://www.dji.com/newsroom/news/dji-releases-flamewheel-f330-arf-kit>>. Citado na página 14.
- DJI. *DJI modelo F450*. 2023. Acesso em: 22.04.2022. Disponível em: <<https://www-v1.dji.com/product/flame-wheel-arf.html>>. Citado na página 15.
- DJI. *Kit DJI modelo F450*. 2023. Acesso em: 22.04.2022. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/1005002028496845.html>>. Citado na página 16.
- FILIPIFLOP. *Raspberry Pi 4*. 2022. Acesso em: 22.04.2022. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/raspberry-pi-4-model-b/>>. Citado na página 24.
- FOUNDATION, R. P. *Pinagem do Raspberry Pi*. 2023. Acesso em: 13.06.2023. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>>. Citado na página 25.

- ICAO. *Global Air Traffic Management Operational Concept*. 2022. Acesso em: 20.04.2022. Disponível em: <[https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9854\\_cons\\_en\[1\].pde](https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9854_cons_en[1].pde)>. Citado na página 13.
- JIA, T. et al. Dynamic obstacle avoidance path planning for uav. In: *2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 814–818. Citado na página 11.
- JOUAV. *VANT com asas fixas e rotativas*. 2022. Acesso em: 20.04.2022. Disponível em: <<https://www.jouav.com/flightSystem/cw-20.html>>. Citado na página 15.
- KENDOUL, F. Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems. *Journal of Field Robotics*, v. 29, p. 315–378, 3 2012. ISSN 15564959. Citado na página 14.
- KOUBAA, A. et al. *Robot Path Planning and Cooperation: Foundations, Algorithms and Experimentations*. [S.l.]: Springer International Publishing AG, 2018. Citado na página 23.
- LAVALLE, S. M. *Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning*. [S.l.], 1998. Citado na página 23.
- PIXHAWK. *Controlador de voo Pixhawk*. 2023. Acesso em: 01.06.2023. Disponível em: <<https://pixhawk.org/products/>>. Citado na página 17.
- PIXHAWK. *Documentação do Controlador Pixhawk*. 2023. Acesso em: 01.06.2023. Disponível em: <<https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html>>. Citado na página 16.
- ROBOTICS, T. *Artigo sobre as baterias LiPo*. 2021. Acesso em: 01.06.2023. Disponível em: <<https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/a-guide-to-lithium-polymer-batteries-for-drones>>. Citado na página 19.
- SHOP.CH pi. *Foto ilustrativa do regulador UBEC*. 2023. Acesso em: 01.08.2023. Disponível em: <<https://www.pi-shop.ch/hobbywing-5v-3a-ubec-step-down-converter>>. Citado na página 28.
- SLAMTEC. *Página oficial da empresa SLAMTEC*. 2023. Acesso em: 01.06.2023. Disponível em: <<https://www.slamtec.ai/home/about/>>. Citado na página 20.
- SLAMTEC. *RPlidar A1 development kit user manual*. 2023. Acesso em: 01.06.2023. Disponível em: <[https://bucket-download.slamtec.com/e680b4e2d99c4349c019553820904f28c7e6ec32/LM108\\_SLAMTEC\\_rplidarkit\\_usermaunal\\_A1M8\\_v1.0\\_en.pdf](https://bucket-download.slamtec.com/e680b4e2d99c4349c019553820904f28c7e6ec32/LM108_SLAMTEC_rplidarkit_usermaunal_A1M8_v1.0_en.pdf)>. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 22.
- YAMAHA. *VANT com asas rotativas*. 2022. Acesso em: 20.04.2022. Disponível em: <<https://www.yamahamotorsports.com/motorsports/pages/precision-agriculture-rmax>>. Citado na página 14.
- YANG, Z.; LIN, F.; CHEN, B. M. Survey of autopilot for multi-rotor unmanned aerial vehicles. In: *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 6122–6127. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

---

ZI, Z. et al. Obstacle avoidance path planning algorithm for multi-rotor UAVs. , v. 36, n. 23, p. 59, 2020. Citado na página [12](#).